

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАУКИ**

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

**Материалы конференции**

**Минск, 10–21 мая 2022 г.**

**В трех частях**

**Часть 1**

Научное электронное издание

МИНСК, БГУ, 2022

**ISBN 978-985-881-444-1 (ч. 1)  
ISBN 978-985-881-443-4**

© БГУ, 2022

УДК 082(06)  
ББК 9я431

Редакционная коллегия:

В. Г. Сафонов (*гл. ред.*), О. Н. Янковский (*зам. гл. ред.*),  
Г. А. Фофанова (*зам. гл. ред.*), А. А. Кухаренко (*отв. секретарь*),  
М. Н. Василевич, А. В. Вериги, О. В. Вологина, Д. С. Воробьёв,  
Е. А. Головатая, О. И. Губич, И. М. Кимленко, Т. М. Киселева,  
Е. И. Климушко, В. С. Козябо, Н. В. Кошелева, Н. В. Кузьмич,  
В. И. Малюгин, В. В. Манкевич, А. В. Наумова, Г. В. Пальчик,  
С. И. Шатравский, В. И. Шиманский

Рецензенты:

кандидат биологических наук, доцент *Д. А. Новиков*;  
кандидат физико-математических наук, доцент *О. С. Кабанова*

**79-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета [Электронный ресурс]** : материалы конф., Минск, 10–21 мая 2022 г. В 3 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-985-881-444-1.

В первую часть издания включены доклады студентов и аспирантов факультета 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 16.12.2022. Объем 23 Мб.

Белорусский государственный университет.  
Управление редакционно-издательской работы  
Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.  
Телефон: (017) 259-70-70.  
e-mail: [urir@bsu.by](mailto:urir@bsu.by)  
<http://elib.bsu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

Кухаренко А. А., Семенюк Ю. С. Об итогах 79-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ .....10

### БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Авимова К. П. Влияние условий содержания мышей на их поведение в стандартных тестах.....	13
Амелишко П. С., Лазаренко Г. Е. Культурально-морфологические особенности развития мицелия ксилотрофных базидиомицетов родов <i>fomitopsis</i> и <i>trametes</i> на различных питательных средах.....	18
Антонович А. П. Физиолого-биохимические и молекулярные механизмы ранозаживления .....	22
Бурачкова А. В. Анализ воздействия высоких уровней <i>nacl</i> на рост и транспортные процессы в клетках корня высших растений .....	27
Галюк У. П. Влияние БKM-7 на болезни современности .....	31
Гасперович А. О., Козинко Т. Ю., Пирожкова А. А. Общие биохимические показатели в крови и печени при моделировании острого и хронического воспаления кожи у крыс с использованием 2,4-динитрохлорбензола .....	35
Громова Е. М. Эволюционный анализ семейства генов RUNX у позвоночных .....	39
Громько В. Д., Ярошеня А. Е. Генерация активных форм кислорода в корнях высших растений при абиотическом стрессе .....	44
Жизневская А. А. Исследование противоопухолевого потенциала соединений феназинового ряда бактерий <i>Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca</i> .....	48
Зинурова Д. Б. Фенетический анализ полиморфизма жилкования крыла и рисунка верха белорусских популяций <i>leptinotarsa decemlineata say</i> ( <i>coleoptera, crysomelidae</i> ).....	52
Зуева А. В. Влияние экзогенных элиситоров на активность гена фенилаланин-аммиак-лиазы у <i>Solanum lycopersicum L.</i> .....	57
Игнацкая А. Ю. Исследование адаптогенных и антиоксидантных свойств аспалатуса линейного ( <i>aspalathus linearis</i> ) на экспериментальной модели интенсивной физической нагрузки .....	61
Колзун Д. А. Влияние uv-c на стабильность ДНК в клетках протонемы мха <i>physcomitrella patens</i> .....	65
Крюк Д. В. Состояние макрофитов в озерах Нарочь и Мястро на современном этапе развития экосистемы Нарочанских озер .....	69
Кучвальский М. В., Якобсон Е. И. Диагностика измененных форм микобактерий туберкулеза методом полимеразной цепной реакции .....	73
Оковицкая А. А. Влияние зрительной нагрузки на состояния зрительного анализатора студентов .....	77

<i>Пластинина О. В.</i> Определение растворимости в клетках бактерий <i>Escherichia coli</i> фьюжн-белков SUMO-DADB и SUMO-DADBN <sub>His</sub> , включающих главные антигенные домены гликопротеина E2 вируса диареи крупного рогатого скота 2-го типа.....	81
<i>Приступа К. В.</i> Изучение некоторых показателей антиоксидантной системы трансгенных растений <i>nicotiana tabacum</i> в условиях нарушения водного режима.....	85
<i>Прохорчик П. О.</i> Характеристика молекулярно-генетических и биологических свойств бактериофага <i>erwinia amylovora pz321</i> .....	90
<i>Рекиш А. Л., Ныч А. В.</i> Анализ изменения жизнеспособности клеток корня высших растений в ответ на повышенные уровни ионов никеля в среде.....	95
<i>Сергеева А. А.</i> Введение <i>punica granatum l.</i> в культуру in vitro.....	99
<i>Станьковская А. В.</i> Вызываемые хизалофоп-п-этилом изменения ацидофицирующей активности корней проростков пшеницы после гипотермической обработки.....	104
<i>Стефанович А. Е.</i> Участие катионных каналов <i>gork</i> в гравитропической реакции корня высших растений.....	108
<i>Сулим Д. О.</i> Видовой состав и таксономическая характеристика фитоперифитона на разных видах макрофитов в солигорском водохранилище.....	112
<i>Трусов И. С.</i> Python как удобный мультитул при оценке первичных данных геномного секвенирования.....	117
<i>Турков Е. А.</i> Характеристика бактериофага <i>Erwinia amylovora</i> , выделенного из природных источников.....	121
<i>Хвир Д. И.</i> Новые данные по экологии и биологии шмелей ( <i>Bombus Latr.</i> ) и шмелей-кукушек ( <i>Psithyrus Lep.</i> ) на территории Минской области.....	126
<i>Хотянович Ю. Н.</i> Влияние основных типов пластика в различных фракциях на <i>daphnia cristata g. o. sars</i> , 1862 методом биотестирования ...	130
<i>Юй Чао.</i> Особенности синтеза шикимовой кислоты штаммами <i>V.subtilis</i> с инактивированным геном шикиматкиназы.....	134
<i>Чэнь Панышэнь.</i> Идентификация фитопатогенных бактерий группы <i>Pseudomonas</i> , выделенных в Беларуси.....	138
<i>Шао Чэнюе.</i> Пектатлиазная активность штаммов <i>Pectobacterium</i> в зараженных тканях клубней и стеблей картофеля.....	146

#### ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ

<i>Дубовец М. А.</i> Особенности территориальной структуры г. Бреста.....	151
<i>Жуховцова А. Н.</i> Оценка экологической компоненты в кадастре земель урбанизированных территорий (на примере г. Минска).....	154
<i>Зиновик Ю. В.</i> Геоинформационный анализ рынка продовольственного ритейла г. Минска.....	158

<i>Ивашко Е. А.</i> Пространственно-временная динамика биогенного стока водотоков бассейна р. Днепр .....	162
<i>Мачков А. Ю.</i> Разработка тестовых заданий по физической географии в 6 классах учреждений среднего образования .....	166
<i>Медведько М. В.</i> Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на социально-экономическую систему Беларуси .....	170
<i>Науменко А. В.</i> Региональные особенности системы обращения с ртутьсодержащими отходами в Республике Беларусь .....	175
<i>Пядочкина В. А.</i> География горнолыжного туризма в Америке как средство продвижения территории на международном туристском рынке .....	179
<i>Роговский Н. М.</i> Сравнительная характеристика уровня охраны природных территорий полесского региона в разрезе стран .....	183
<i>Розжаловец О. А.</i> Усовершенствование применения способа картограммы при картографировании плотности населения Беларуси.....	187
<i>Рондак У. А.</i> Экологическое состояние зеленых насаждений лесопарка «Медвежино» Фрунзенского района г. Минска.....	192
<i>Силицкая О. В.</i> Основные черты геохимии аллювиального литогенеза на территории Беларуси .....	196
<i>Чумаков Е. А., Прокопчик Е. А., Бурченко Г. Д.</i> Исследование микроклиматических особенностей г. Минска за период 2020-2021 гг. по наземным наблюдениям.....	201

## МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<i>Александрова А. А.</i> Численное моделирование сферического магнитожидкостного экрана с учетом диффузии магнитных частиц .....	205
<i>Клименко К. В.</i> Нейроэволюционные алгоритмы и глубокое обучение беспилотных моделей автомобилей в генерируемых 2D и 3D симуляциях дорожного окружения .....	210
<i>Бадак Б. А.</i> Об активной оценке как о современной стратегии образовательного процесса в средних и высших учебных заведениях.....	215
<i>Ёжикова М. Д.</i> Градуированная топология на алгебрах новых обобщенных функций.....	218
<i>Кухарев А. Л.</i> Задача Коши для телеграфного уравнения с переменными коэффициентами при условиях Коши на кривой в плоскости .....	223
<i>Кухарев А. Л.</i> О количестве компонент связности веерного произведения накрытий.....	229
<i>Лемачко Ф. Р., Шабусов В. А.</i> Система управления телескопом.....	232
<i>Лемачко Ф. Р.</i> Устройство обнаружения микронаушников .....	237
<i>Лицкевич Д. А.</i> Обратная задача для обобщенной модели Лотки-Вольтерра.....	241
<i>Логиновская М. М.</i> Оценка функциональной размерности хаусдорфа графика непрерывной функции .....	246

<i>Назаренко Д. В.</i> Биомеханическое моделирование функционирования нижней челюсти с балочным протезом на имплантатах: сравнительный анализ граничных условий.....	251
<i>Таборов Л. А.</i> Распознавание пневмонии по рентгеновскому снимку методами машинного обучения .....	255
<i>Царёв Н. А.</i> Исследование выпуклости $f$ -потенциала .....	260
<i>Хурсик К. В.</i> Критерии компактности в пространствах суммируемых функций.....	265
<i>Яблонская А. О.</i> Обнаружение сообществ алгоритмом Лейдена .....	268

## ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<i>Wei Heiyi.</i> Measurement of Liquid Coefficient of Viscosity Using Liquid Surface Wave .....	272
<i>Feng Baozhang, Mao Xingyu, Du Yiyang</i> Surface. waveguide mode resonance technology based on optical fiber .....	278
<i>Лабода Н. В.</i> Спектрально-люминесцентные свойства производного родамина б при взаимодействии с ионами металлов .....	284
<i>Мазго Г. С.</i> Электрическая активность нейронов срезов гиппокампа in vitro при варьировании условий регистрации .....	288
<i>Matyush Y. I.</i> Single and double-pulse laser excitation of emission spectra of atoms .....	292
<i>Моисеев М. И.</i> Глубокие сверточные сети для обработки рентгеновских изображений .....	298
<i>Николайчик А. В.</i> Выбор оптимальных режимов расчета коэффициентов диффузии и макроскопических сечений для ТВС и отражателя реактора ВВЭР-1200.....	303
<i>Овсяник Е. А., Судник Я. С.</i> QR-код и процесс нахождения собственных значений и собственных векторов линейных операторов ..	308
<i>Руденик Н. Н.</i> Влияние содержания кремния на эрозию поверхности силуминового сплава при воздействии компрессионных плазменных потоков .....	313
<i>Томкович Н. В., Казак А.В., Симончик Л. В., Кириллов А. А., Стельмах Г.Ф.</i> Исследование процесса конверсии биогаза в несамостоятельном разряде при атмосферном давлении.....	318
<i>Чуднова Ю. Н.</i> Рождение фермионной пары в результате процессов лептон-антилептонной аннигиляции.....	322

## ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

<i>Войтко Т. Д.</i> Разработка генеративной нейронной сети для генерации потенциальных мультикиназных ингибиторов с заданными свойствами .....	327
<i>Герасимчик А. М.</i> Глубокое многозадачное метаобучение с подкреплением .....	331

<i>Голод Т. В.</i> Алгоритмы анализа спекулятивных пузырей на рынке криптовалют .....	336
<i>Корниевич А. К., Малюгин В. И.</i> Мультистрановой анализ типологии пандемии COVID-19 с использованием статистического и машинного обучения .....	341
<i>Лебедев Д. П.</i> Реализация командного интерпретатора для Unix-подобных операционных систем .....	346
<i>Лукашэвіч М. М., Кавалёў М. Я.</i> Мадэль аптымальнага планавання работ па праверцы і рамонце грузавых кантэйнераў з магчымасцю адмовы.....	350
<i>Мальщик А. А.</i> Генерация описаний химических соединений .....	356
<i>Мигас З. И.</i> Распознавание объектов в видеопотоке с применением библиотеки OpenCV.....	360
<i>Роуба Р. Ю.</i> Поиск плагиата в текстах исходных кодов программ .....	364
<i>Семенович Д. А.</i> Применение нейронных сетей для отслеживания ежедневной активности на носимых устройствах под управлением IOS .	368
<i>Сизова Д. В.</i> Разработка алгоритмов и программных средств поиска «цифровых двойников» по рентгеновским изображениям .....	372
<i>Солодуха Д. В.</i> Распознавание рукописного текста с помощью нейронных сетей .....	376
<i>Тарасенко Д. А.</i> Разработка анализатора архитектуры Java-приложений .	380
<i>Шанцов А.В.</i> Модель архитектуры комплексной системы защиты информации облачных ресурсов.....	385
<i>Филиппов М. А.</i> Разработка игры в шведские шахматы с использованием искусственного интеллекта.....	389
<i>Шарыкин Р. Е.</i> Разработка системы защиты от вирусов с использованием модели распределенных объектно ориентированных стохастических гибридных систем.....	393
<i>Шляго Н. А.</i> Разработка программного обеспечения для оценки качества зерна на основе нейросетевых моделей .....	397
<i>Yuxiang Chen</i> Identification of genomic mutations associated with drug-resistant tuberculosis.....	401

#### ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

<i>Афоненко А. А.</i> Моделирование плотности состояний примесных подзон в квантово-каскадных гетероструктурах .....	405
<i>Гаврук Н. А., Капинос А. В.</i> Обработка изображений с использованием технологий машинного обучения .....	410
<i>Горбунова А. А.</i> Предсказание заболеваний рака груди по геномным данным с использованием методов снижения размерности .....	414
<i>Демидик М. А.</i> Модификация машины Больцмана для классификации типов и стадий немелкоклеточного рака легких .....	419

<i>Дроздов А. С.</i> Разработка аппаратно-программной функции измерения напряжения переменного тока на базе преобразователя-мультиметра В-385 .....	424
<i>Жалнерчик А. Д.</i> Организация совместного пользовательского взаимодействия в рамках образовательной платформы проекта "цифровой факультет" .....	428
<i>Захаревич Д. О.</i> Спектральный анализ веществ на основе алгоритмов машинного обучения.....	432
<i>Заяц К. П.</i> Получение и обработка данных дистанционного зондирования .....	436
<i>Исмайлова А. С.</i> Оптоволоконные распределенные сенсоры с использованием рассеяния Манделъштама-Бриллюэна .....	440
<i>Кольчевская И. Н., Трапенок Н. В., Кунин В. М.</i> Моделирование рентгенооптических систем .....	444
<i>Кольчевская М. Н.</i> Композитные материалы на основе полимеров, наполненных углеродными наноматериалами, для систем защиты от электромагнитных излучений .....	448
<i>Королёва Е. А.</i> Повышение эффективности стыковки измерительной аппаратуры с волоконно-оптическими линиями .....	452
<i>Лебедевский А. В.</i> Компьютеризированная система для оценки функциональных показателей сенсорных систем человека.....	456
<i>Мазур С. В.</i> Контроль физиологических параметров человека во время нахождения в виртуальной реальности .....	460
<i>Поживилко А. О., Мозгалёв С. В.</i> Высокочастотный газовый разряд внутри ферритового кольца .....	465
<i>Смолякова Е. В.</i> Определение сайтов однонуклеотидных полиморфизмов с помощью биномиального распределения по данным геномного секвенирования .....	469
<i>Чеплюков А. А.</i> Разработка микропроцессорного индикаторного устройства для контроля структуры чугуна .....	473
<i>Черепанова Ю. В.</i> Обработка результатов измерений микроклиматических параметров при выращивании растений .....	478
<i>Яцков В. Н.</i> Исследование влияния методов понижения размерности данных на точность работы алгоритма предсказания выживаемости .....	482

## ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<i>Алейникова А. А., Орлович А. Ю., Блохин А. В.</i> Термодинамические свойства этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата .....	486
<i>Босякова А. Ю.</i> Разработка новых трансдермальных лекарственных средств на основе нестероидных противовоспалительных препаратов ....	490
<i>Вербило К. М.</i> Синтез и исследование механизма антибактериальной активности 1,4-дизамещенных 1н-1,2,3-триазолов по отношению к микроорганизму <i>staphylococcus aureus</i> методами молекулярного моделирования .....	494



<i>Галуза М. Г., Будник В. С.</i> О возможности использования латунных покрытий на стальных электродах с никелевым подслоем в процессе электролиза воды .....	498
<i>Давыденко А. И., Урбанович О. В., Мельничук Е. С., Шишпор А. Д., Карпович В. А., Карасевич Е. С.</i> Влияние <i>h-d</i> эффекта на радиационно-химические превращения этиленгликоля в деаэрированных водных растворах при рН 7 .....	502
<i>Копыш Е. А.</i> Применение магнитных наночастиц на основе магнетита для повышения термостабильности амилазы .....	507
<i>Овсянникова Е. М.</i> Влияние <i>N</i> -ацетилцистеина на $\text{Cu}^{2+}$ - опосредованное дефосфорилирование глицерофосфата .....	513
<i>Терешко Е. В.</i> Спектрофотометрическое определение $\text{NO}$ -акцепторной активности аскорбиновой кислоты .....	517
<i>Мацкевич В. В.</i> Случайный поиск в задаче обучения нейронных сетей ....	521
<i>Павловский В. А.</i> Некоторые свойства <i>h</i> -целых функций .....	525

## ОБ ИТОГАХ 79-Й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ БГУ

А. А. КУХАРЕНКО, Ю. С. СЕМЕНЮК

С 10 по 21 мая 2022 года в Белорусском государственном университете была проведена 79-я научная конференция студентов и аспирантов. Заслушивание докладов было организовано в офлайн и онлайн форматах на 320 секциях и подсекциях 18 подразделений университета. На конференции выступили с докладами 3844 участника из БГУ, других УВО Республики Беларусь и стран ближнего и дальнего зарубежья. При этом в конференции впервые приняли участие китайские студенты совместного института БГУ и Даляньского политехнического университета. В рамках конференции было прочитано 4379 докладов. По 2 доклада подготовил 321 участник, по 3 доклада – 60 участников, по 4 доклада – 12 участников, по 5 докладов – 2 участника, 6 докладов подготовила студентка 3-го курса юридического факультета Короленко Дарья Сергеевна. В работе конференции также приняли участие учащиеся гимназий и лицеев г. Минска, в том числе 32 лицеиста БГУ.

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

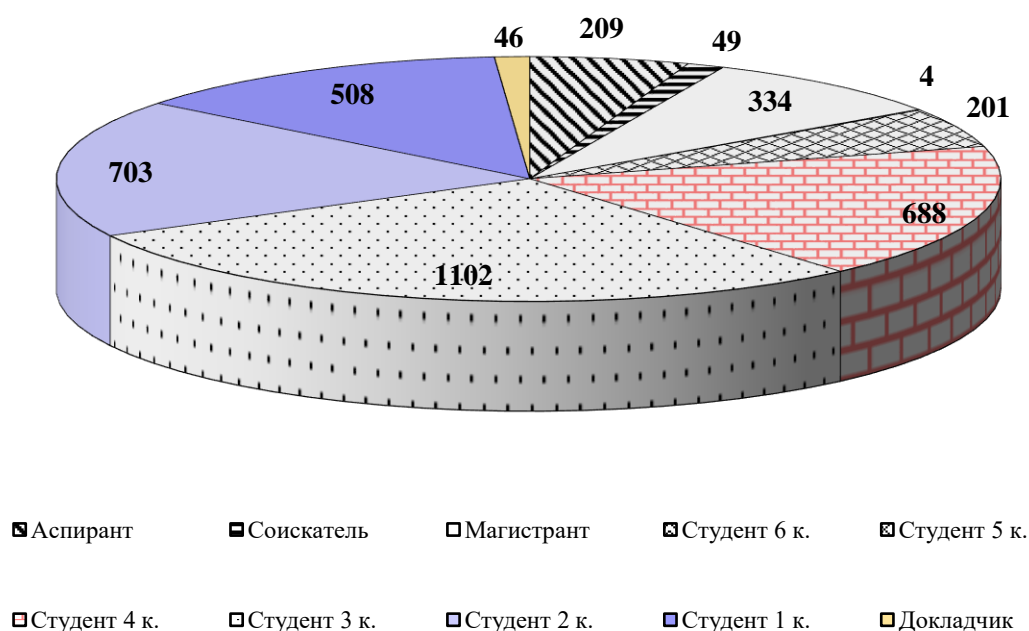
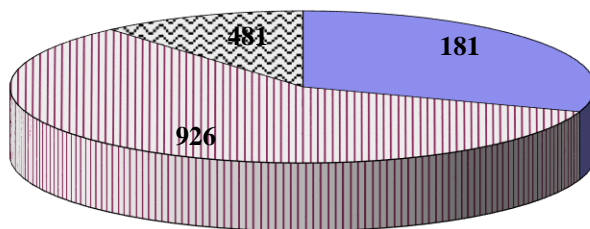


Рис. 1. Участники конференции

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.



■ Д-р наук   ■ Канд. наук   ■ Без уч. ст.

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

Доклады подготовлены под руководством 1588 сотрудников БГУ. Статистические данные по научным руководителям участников конференции представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

**Участие научных руководителей в подготовке докладов, представленных на конференции**

Количество научных руководителей докладчиков	737	291	196	108	78	53	31	26	18	10	8	7
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

*Продолжение таблицы 1*

Количество научных руководителей докладчиков	6	2	2	3	5	1	1	1	1	1	1	1
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	13	14	15	16	17	18	20	22	24	27	29	33

Эффективность участия в конференции студентов и аспирантов разных подразделений БГУ отражена в таблице 2. Наибольшее количество участников (584 человека) являются студентами и аспирантами факультета международных отношений, они прочитали 804 доклада на 75 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	804	584	75
Филологический факультет	527	503	38
Юридический факультет	417	335	23
Факультет социокультурных коммуникаций	371	329	29
Факультет философии и социальных наук	329	299	27
Исторический факультет	294	279	16
Экономический факультет	251	221	14
Факультет прикладной математики и информатики	219	209	15
ГУО «Институт бизнеса Белорусского государственного университета»	206	161	7
Факультет журналистики	182	159	15
Факультет географии и геоинформатики	166	163	15
Факультет радиофизики и компьютерных технологий	150	150	8
Химический факультет	145	144	14
Физический факультет	112	107	11
Механико-математический факультет	98	97	7
Биологический факультет	66	66	4
Кафедра педагогики и проблем развития образования	31	28	1
ГУО «Институт теологии имени святых Мефодия и Кирилла» БГУ	11	10	1

Таким образом, 79-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 XXIX Республиканском конкурсе научных работ студентов учреждений высшего образования Республики Беларусь.

# БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СОДЕРЖАНИЯ МЫШЕЙ НА ИХ ПОВЕДЕНИЕ В СТАНДАРТНЫХ ТЕСТАХ

К. П. Авимова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*bio.avimova@bsu.by;*

*науч. рук. – Д. Б. Сандаков, канд. биол. наук, доц.*

Мыши – социальные животные и для комфорта им требуется среди прочего компания конспецификов, однако присутствие слишком большого количества других животных может вызывать стресс – также как и содержание в одиночестве. Стресс в свою очередь может влиять на поведение животных не только в домашних клетках, но и в тестовых условиях. Мы проверили в двух экспериментах, как влияет количество животных в клетках на их поведение в стандартных тестах («Открытое поле», «Норный тест», «Подвешивание за хвост» и «Приподнятый крестообразный лабиринт»). Для этого содержали животных в разных условиях и спустя месяц тестировали. Во втором эксперименте дополнительно взвешивали и фотографировали повреждения кожи животных. Поведение мышей различалось в зависимости от условий содержания. Содержавшиеся вшестером мыши меньше двигались, проявляли больше стрессового поведения и больше проводили времени за грумингом в «Открытом поле» по сравнению с остальными. Мыши, содержавшиеся попарно, показали устойчивый уровень исследовательской активности в «Норном тесте» в обоих экспериментах. Мыши, содержавшиеся по три в клетке, имели самые тяжёлые повреждения кожи. Все животные за время эксперимента набрали массу, условия содержания на этот показатель не влияли.

**Ключевые слова:** лабораторные животные; поведенческие тесты; открытое поле; норный тест; подвешивание за хвост; приподнятый крестообразный лабиринт; условия содержания животных.

В естественных условиях мыши живут семейными группами или колониями – иерархически организованными (в стесненных условиях) или сформированными по территориальному признаку (в более свободных условиях) [1, с. 276]. В лабораторной практике мыши порой содержатся в одиночестве, что может приводить к аномальному поведению (стереотипиям, неофобии, сверхреактивности и т. п.) [2]. Групповое содержание может вызывать стресс и приводить к физиологическим и поведенческим нарушениям из-за большого количества мышей в одном пространстве и/или если между ними часто происходят конфликты [3]. Экспериментальные мыши зачастую содержатся в малых группах (2–4 особи в клетке) (например, [4]).

Целью нашей работы было изучить, как влияют условия содержания мышей – в одиночестве, в малых группах и в большой группе – на

поведение в стандартных тестах и некоторые физиологические параметры.

Мы провели два эксперимента. В первом из них 18 животных рассадили по клеткам (ДхШхВ 30х20х14 см) – по 1, по 2 или по 6 мышей – и спустя 28 дней провели поведенческие тесты. Во втором эксперименте 24 мыши рассадили по 1, по 2, по 3 и по 6 вместе, протестировали их спустя 31 день; в течение предшествующего тестированию месяца каждые 3–4 дня животных взвешивали и фотографировали. Субстрат – опилки (смена раз в неделю, но не позднее 3 дней до тестов), смена воды – раз в три дня, кормление – *ad libitum*.

Поведенческие тесты – «Открытое поле» (4 мин), «Норный тест» (3 мин), «Подвешивание за хвост» (6 мин). Во втором эксперименте добавили «Приподнятый крестообразный лабиринт» (5 мин).

В «Открытом поле» (ОП), «Норном тесте» (НТ) и «Приподнятом крестообразном лабиринте» (ПКЛ) тестируют исследовательскую активность и стресс-ассоциированное поведение, в «Подвешивании за хвост» (ПХ) – выраженность депрессии у животных.

Достоверными считали различия на уровне  $\alpha=0,01$ , различия на уровне  $\alpha=0,05$  отмечали как тенденцию. Представление значимых различий между группами: разность медиан (99% доверительный интервал) [5, с. 57; 6].

## ОТКРЫТОЕ ПОЛЕ

В обоих экспериментах подвижность животных со временем снижалась, а продолжительность стрессового поведения и груминга увеличивалась.

В первом эксперименте наиболее активными были мыши, содержащиеся в клетках попарно: они двигались на 35,8 (99% ДИ 2,9-89,0) с больше мышей, содержащихся поодиночке, и на 33 (99% ДИ 6-141) с больше содержащихся вшестером. Также у содержащихся вшестером мышей мы отмечаем тенденцию проводить за грумингом больше времени, чем сдержавшиеся попарно. Мыши, содержащиеся поодиночке, имели тенденцию к более продолжительному стрессовому поведению, чем содержащиеся попарно.

Во втором эксперименте мы не обнаружили различий в подвижности между животными разных экспериментальных групп, хотя наиболее подвижными оказались мыши, содержащиеся поодиночке, а наименее подвижными – содержащиеся вшестером.

Что касается стрессового поведения и груминга, то результаты второго эксперимента частично согласуются с первым: 1) мыши,

содержавшиеся вшестером, имели тенденцию замирать дольше, чем содержащиеся поодиночке; 2) мыши, содержащиеся вшестером, на 17 (99% ДИ 4,8-101,1) с больше проводили за грумингом, чем содержащиеся поодиночке.

При анализе объединённого массива данных (для групп животных, содержащихся по 1, по 2 и по 6 в клетке) можем отметить тенденции: 1) мыши, содержащиеся вшестером, двигались (на уровне тенденции) меньше остальных, а содержащиеся поодиночке – больше остальных; 2) мыши, содержащиеся вшестером, проявляли (на уровне тенденции) больше стрессового поведения, чем содержащиеся попарно. Содержавшиеся вшестером мыши проводили значимо больше остальных времени за грумингом. Мыши, содержащиеся попарно, вели себя спокойнее остальных и были умеренно подвижными.

### **НОРНЫЙ ТЕСТ**

Результаты обоих экспериментов не согласуются между собой: так, в первом случае мыши, содержащиеся поодиночке, меньше остальных двигались по полю, а во втором – больше остальных. Но мы можем отметить, что мыши, содержащиеся поодиночке и вшестером, во втором эксперименте больше исследовали поле, чем содержащиеся в таких же условиях мыши из первого эксперимента. А мыши, содержащиеся попарно, в обоих случаях показали примерно одинаковый уровень активности.

### **ПОДВЕШИВАНИЕ ЗА ХВОСТ**

Мы не обнаружили различий в поведении животных ни при анализе отдельных экспериментов, ни при анализе объединённого массива.

### **ПРИПОДНЯТЫЙ КРЕСТООБРАЗНЫЙ ЛАБИРИНТ**

Мыши в целом предпочитали закрытые рукава открытым, хотя на продолжительность пребывания в тех или иных рукавах влияли условия содержания. Мыши, содержащиеся поодиночке, показали тенденцию больше находиться в закрытых рукавах, чем в открытых, а для остальных групп такой разницы не обнаружено.

Результаты ПКЛ и НТ во втором эксперименте согласуются между собой: 1) мыши, содержащиеся поодиночке, больше остальных повторно заглядывали в лунки, что мы интерпретируем как более выраженную тревогу – и это согласуется с результатами ПКЛ; 2) НТ

показатель «Непосещённые лунки» (исследовательская активность) согласуется с количеством заходов в рукава в ПКЛ для мышей, содержащихся поодиночке, попарно и втроём: меньше непосещённых лунок – больше заходов в рукава.

При этом результаты ОП и ПКЛ между собой не согласуются. Общее для ПКЛ и НТ – установки приподняты на 80 см и не имеют стен.

### **ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ ТЕЛА**

Все мыши за время эксперимента стали весить в среднем на 7,23 (99% ДИ 5,82-6,83) г больше. Набор массы не зависел от условий содержания, хотя мыши, рассажённые в клетки по 3 и по 6 в первые дни потеряли вес, но быстро догнали остальных. Мы связываем это с социальным стрессом.

### **СОСТОЯНИЕ КОЖИ**

Некоторые мыши, содержащиеся поодиночке, за месяц в экспериментальных клетках приобрели новые повреждения, что может говорить о чрезмерном груминге, сопровождающем хронический стресс. Лишь одна мышь из содержащихся вшестером имела значительные повреждения кожи. Кожа мышей, содержащихся попарно, выглядела наименее повреждённой. Мыши, содержащиеся втроём, и через месяц эксперимента имели самые тяжёлые (визуально) повреждения. Это несколько противоречит общепринятым рекомендациям содержать мышей в однополых малых группах и нуждается в дальнейших исследованиях роли социального стресса и процессов установления иерархии доминирования у лабораторных мышей.

Таким образом, условия содержания влияют на подвижность и стресс-ассоциированное поведение (в т.ч. клеточное) у лабораторных мышей.

### **Библиографические ссылки**

1. THE UFAW HANDBOOK ON The Care and Management of Laboratory and Other Research Animals / eds. J. Kirkwood, R.C. Hubrecht. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2010.
2. Fone K.C.F. Behavioural and neurochemical effects of post-weaning social isolation in rodents-Relevance to developmental neuropsychiatric disorders // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2008. Vol. 32, № 6. P. 1087-1102.
3. Bayne K. The impact of environmental enrichment on the outcome variability and scientific validity of laboratory animal studies. // *Rev. Sci. Tech.* 2014. Vol. 33, № 1. P. 273-80.



4. Touma C., Sachser N., Möstl E., Palme R. Effects of sex and time of day on metabolism and excretion of corticosterone in urine and feces of mice // *Gen. Comp. Endocrinol.* 2003. Vol. 130, № 3. P. 267-278.
5. Ланг Т. Как описывать статистику в медицине. Москва: Практическая медицина, 2011.
6. Nakagawa S. A farewell to Bonferroni: the problems of low statistical power and publication bias // *Behav. Ecol.* 2004. Vol. 15, № 6. P. 1044-1045.

# КУЛЬТУРАЛЬНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МИЦЕЛИЯ КСИЛОТРОФНЫХ БАЗИДИОМИЦЕТОВ РОДОВ FOMITOPSIS И TRAMETES НА РАЗЛИЧНЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

П. С. Амелишко, Г. Е. Лазаренко

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
AMELISHKOpolina@yandex.by; gabi.laz@mail.ru;  
науч. рук. – С. Г. Сидорова, доц.; О. А. Шевелева, ст. преп.

Исследования в области микологии последних лет доказывают, что изоляты ксилотрофных базидиомицетов способны развиваться на различных питательных средах, основу которых составляют сельскохозяйственные отходы, что делает их удобными, а благодаря различным свойствам, и ценными объектами для культивирования. В условиях лаборатории экспериментальной микологии кафедры ботаники биологического факультета были выделены природные изоляты макромицетов *Trametes hirsuta* и *Fomitopsis pinicola* и исследованы культурально-морфологические особенности развития мицелия на различных питательных средах. Целью данной работы является исследование влияния дополнительного источника азота в различных питательных средах и оценка его влияния на культурально-морфологические показатели. На основе полученных данных было сделано заключение о наилучших условиях культивирования для каждого исследованного изолята.

**Ключевые слова:** ксилотрофные базидиомицеты; радиальная скорость роста; модифицированные питательные среды.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе были использованы природные изоляты ксилотрофных базидиальных грибов, свежесобранных и находящихся в коллекции чистых культур кафедры ботаники: *Trametes hirsuta* (Wulfen) Lloyd, относящиеся к ксилотрофам белой гнили штаммы: Tr. hir. – 1 и Tr. hir. – 2, а также изоляты *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst., представителя ксилотрофов бурой гнили штаммы: F.pin. – 1 и F.pin. – 2.

Ранние наши исследования биологической активности изолятов группы белой и бурой гнили древесины выявили широкий антагонистический потенциал в отношении фитопатогенной микро- и микрофлоры [1,2]. Появилась необходимость оптимизации состава питательной среды для культивирования базидиомицетов и получения высокопродуктивной биомассы.

Наиболее распространёнными средами для культивирования ксилотрофных базидиомицетов являются картофельно-глюкозная или картофельно-сахарозная среда (КГА) и овсяный агар (ОА). Менее

пригодными являются минеральные среды. В условиях развитого сельского хозяйства Беларуси данные среды доступны как отходы сельскохозяйственной деятельности.

Также многие исследования доказывают, что для наиболее успешного культивирования среды должны содержать как источник углеводов – картофельный или овсяный крахмал, глюкоза, сахароза и др., так и, предпочтительно органический, азотный компонент – пептон, дрожжевой, мясной экстракты и др. Рекомендуется использовать соотношение углеводной составляющей к азотной 18:1 – 20:1 [3].

Таким образом, на основе анализа литературных данных, для исследования были выбраны КГА и ОА, а также модифицированные КГА+П и ОА+П с добавлением пептона в качестве источника азота. Минеральная Среда Чапека была использована как отрицательный контроль [3]. Развитие мицелия оценивали по показателям радиальной скорости роста, плотности и качеству мицелия в пяти повторностях, используя общепринятые и модифицированные методики [3,4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании радиальной скорости роста были получены данные, представленные в виде средней, далее (табл. 1).

Таблица 1

Средняя скорость роста изолятов ксилотрофных базидиомицетов на различных питательных средах

Питательная среда / День	Среда Чапека	КГА	КГА+П	ОА	ОА+П
Tr. hir. – 1	0,21	<b>0,42</b>	0,39	0,33	0,37
Tr. hir. – 2	0,17	0,44	<b>0,47</b>	0,35	0,43
F. pin. – 1	0,14	<b>0,29</b>	0,24	0,17	0,15
F. pin. – 2	0,08	<b>0,37</b>	0,11	0,15	0,17

Среди изолятов *Tr. hirsuta* данные оказались неоднозначны: наибольшая скорость роста для Tr. hir. – 1 наблюдалась на КГА = **0,42** мм/ч, на втором месте модифицированная среда КГА+П = **0,39** мм/ч. Для Tr. hir. – 2 максимальные ростовые показатели наблюдались на среде КГА+П = **0,47** мм/ч. На втором месте среда КГА = **0,44** мм/ч.

Среди изолятов *F. pinicola* наибольшая скорость роста была выявлена на КГА. F. pin. – 1 = **0,29** мм/ч; F. pin. – 2 = **0,37** мм/ч. Для F. pin. – 1 на втором месте оказалась среда КГА+П = **0,24** мм/ч. Однако для F. pin. – 2 на втором месте ОА+П = **0,17** мм/ч.

Таким образом КГА является средой, на которой радиальная скорость роста является наиболее высокой. Что подтверждает данные, представленные в других исследованиях [3]. Добавление пептона как дополнительного источника азота в КГА положительно проявил себя только в случае изолята *Tr. hir.* – 2, но с небольшим отличием от не модифицированного КГА, разница составляла **0,03** мм/ч. Овсяный агар выявил себя наименее предпочтительной средой для роста, сравнительно лучше себя проявила ОА+П, среднее увеличение скорости роста составляло **0,12** мм/ч.

Также была зафиксирована относительно небольшая, по сравнению с другими, но значительная скорость роста на контрольной Среде Чапека. Максимальное значение скорости роста было выявлено для изолята *Tr. hir.* – 1 = **0,21** мм/ч. Для *Tr. hir.* – 2 была зафиксирована скорость роста равная **0,17** мм/ч. Изоляты *F. pin.* – 1 и *F. pin.* – 2 не показали значительной скорости роста. Данный факт является примечательным и может свидетельствовать о более эффективной работе ферментативного аппарата ксилотрофов белой гнили, разрушающего и лигнин, и целлюлозу в природных условиях, по сравнению с бурой, разрушающего только целлюлозу [3].

На основе данных о средней скорости роста и оценке плотности мицелия в пределах 1-5 баллов (от рыхлого до самого плотного) был рассчитан показатель плотности и качества мицелия (Pr) (табл. 2).

Таблица 2

**Плотность и качество мицелия изолятов ксилотрофных базидиомицетов на различных питательных средах**

Питательная среда День	Среда Чапека	КГА	КГА+П	ОА	ОА+П
<i>Tr. hir.</i> – 1	0,19	1,48	1,75	0,31	0,98
<i>Tr. hir.</i> – 2	0,15	1,17	1,63	0,31	0,76
<i>F. pin.</i> – 1	0,29	0,94	1,04	0,36	0,16
<i>F. pin.</i> – 2	0,15	1,01	0,40	0,28	0,31

Примечание:

0,01-0,6 – тонкий, рыхлый мицелий, гифы переплетены слабо

0,7-1,2 – более плотный мицелий, гифы переплетены сильнее

1,3-1,8 – плотный мицелий, гифы сильно переплетены

Наиболее высокие показатели плотности и качества мицелия были зафиксированы на среде КГА+П, на втором месте КГА, вопреки результатам средней скорости роста для некоторых изолятов. Для изолята *Tr. hir.* – 2 предпочтительней оказалась именно КГА+П по всем исследуемым параметрам. Что касается изолятов *F. pinicola*, *F. pin.* – 1

также улучшил свои показатели качества мицелия на среде КГА+П, F. pin – 2 предпочёл КГА наилучшей средой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных, полученных в ходе выполнения текущей работы, а именно увеличения плотности и качества мицелия исследуемых изолятов ксилотрофных базидиомицетов в присутствии пептона, как дополнительного источника азота в соотношении 18:1 – 20:1 (углеводной составляющей к азотной), в питательных средах может свидетельствовать о стимулировании накопления биомассы и, в свою очередь, накоплении ценных вторичных метаболитов. Данный факт указывает на важности правильного подбора питательных сред, как для поддержания коллекции, так и для дальнейших исследований по оптимизации условий культивирования и исследований, направленных на изучение биологической активности изолятов. Изоляты, использованные в данной работе - Tr. hir. – 1, Tr. hir. – 2, F. pin. – 1, F. pin. – 2, будут включены в коллекцию чистых культур кафедры ботаники для дальнейшего исследования. Результаты текущей работы могут быть применены в промышленности, сельском хозяйстве и биоремедиации.

### Библиографические ссылки

1. Амелишко, П.С., Шевелёва, О.А., Муковозчик, А.В. Оценка антифунгальной активности изолятов некоторых ксилотрофных макромицетов / П.С. Амелишко, О.А. Шевелёва, А.В. Муковозчик // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты: материалы IV междунар. науч.-практ. конференции, приуроченной к 100-летию кафедры ботаники, Республика Беларусь, Минск, 31 мая 2021 г. / БГУ, Биологический фак., Каф. ботаники; [редкол.: В. Н. Тихомиров (гл. ред.) и др.]. – Минск: БГУ, 2021 – С. 35-38.
2. Ильина, Г. В. Ксилотрофные базидиомицеты в чистой культуре: монография / Г. В. Ильина, Д. Ю. Ильин. – Пенза: РИО ПГСХА, 2013. – 222 с.
3. Поликсенова В. Д., Храмцов А. К., Пискун С. Г. Методические указания к занятиям спецпрактикума по разделу «Микология. Методы экспериментального изучения микроскопических грибов». Мн.: БГУ, 2004. 36 с.

# ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАНОЗАЖИВЛЕНИЯ

**А. П. Антонович**

*Лицей Белорусского государственного университета, г. Минск;*

*antonovicandrej87@gmail.com;*

*науч. рук. – М. А. Капустин, науч. сотрудник*

Целью данной работы является изучение, обобщение и систематизация имеющихся в литературе современных и актуальных данных о принципах классификации ран, этапах их регенерации, а также физиолого-биохимических и молекулярных механизмах ранозаживления. Полученные результаты позволяют заключить, что раны классифицируются по характеру повреждения и виду травмирующего агента, по характеру раневого канала, по обсемененности микрофлорой, а также по проникновению в полости тела. Процесс ранозаживления можно подразделить на 3: воспаления, регенерации и эпителизации, либо 4 фазы: гемостаза, воспаления, пролиферации и ремоделирования. Типы заживления ран классифицируются в зависимости от ряда факторов, ключевыми из которых являются характер инфицированности раны, расстояние между краями раны и ее глубина.

**Ключевые слова:** ранозаживление, ремоделирование ран, ангиогенез, грануляционная ткань, эпителизация, контактное ингибирование

В результате проведенных исследований было показано, что раны классифицируют по характеру повреждения и виду травмирующего агента, по характеру раневого канала, по обсемененности микробиотой, по проникновению в полости тела [1, с. 8]. В зависимости от особенностей каждого из вышеперечисленных признаков выделяют резаные, колотые, рваные, укушенные, ушибленные, размозженные, рубленые и огнестрельные раны, а также комбинированные раны, сочетающие в себе признаки нескольких видов ран. По обсемененности микрофлорой раны классифицируются в зависимости от количества микроорганизмов на 1 грамм ткани. При количестве клеток микроорганизмов в ране до 100 включительно – рана считается асептической, от 100 до 10000 – контаминированной, свыше 10000 – инфицированной [1, с. 9].

Процесс регенерации ран различного генеза представляет собой многостадийную цепь пролиферативных и дифференцировочных стадий, находящихся в строгой согласованности в результате многофакторной регуляции. В специализированных литературных источниках стран СНГ традиционно выделяется 3 фазы течения процесса ранозаживления – воспаления, регенерации и эпителизации [1, с. 12], в то время как в иностранных литературных источниках принято выделять 4 фазы – гемостаза, воспаления, пролиферации и

ремоделирования [2, с. 5]. В ходе работы нами был проведен анализ особенностей каждой из стадий ранозаживления, по результатам которого можно заключить, что стадия эпителизации включает в себя процессы созревания грануляционной ткани и восстановления кожного покрова, в то время как процесс ангиогенеза относят к пролиферативной фазе, наряду с этапом формирования грануляционной ткани. В иностранных литературных источниках стадия пролиферации является более специализированной и включает процессы, относящиеся к созреванию грануляционной ткани, а процесс ангиогенеза отнесен к ремоделированию, наряду с созреванием грануляционной ткани и формированием кожного покрова [2, с. 7; 3, с. 283]. В результате проведенного анализа авторами был сделан вывод о целесообразности использования термина ремоделирование, как более широкого понятия, точнее отражающего результат происходящих преобразований на завершающем этапе ранозаживления.

При детальном анализе специфики репарационных процессов показано, что первой фазой ранозаживления является экссудативная или воспалительная фаза. Эта фаза начинается непосредственно после ранения и длится до 5 суток. Ключевыми медиаторами воспалительной фазы являются ряд биологически активных веществ: серотонин, гистамин, простагландины D<sub>2</sub>, E<sub>2</sub>, I<sub>2</sub> [5, с. 82]. Данная фаза подразделяется на 2 подфазы: подфазу 1, характеризующуюся нарушением обмена веществ, локальной ишемией и, как следствие, нарушением функции клеток и тканей и подфазу 2, ключевыми процессами которой являются образование транссудата и экссудата, сопряженное с очищением раневого канала макрофагами и нейтрофилами [4, с. 96]. Выход транссудата и экссудата сопряжен с выходом из сосудистого русла в рану нейтрофилов. Факторами, способствующими проникновению нейтрофилов в раневое ложе, является закисление раневой среды и увеличение концентрации низкомолекулярных соединений, образующихся при деструкции тканей [1, с. 16]. Нейтрофилы адгезируются на поверхности клеток эндотелия сосудов, проходящих по краю участка воспаления, секретируют протеолитические ферменты и осуществляют фагоцитоз продуктов расщепления некротизированных тканей [2, с. 9; 3, с. 286]. Кислая среда раневого ложа индуцирует трансформацию моноцитов в макрофаги. Последние готовят рану ко второй фазе ранозаживления: фагоцитируют гнойные массы, зачищают рану, попутно осуществляют секрецию лактат-анионов, что стимулирует пролиферацию соединительной ткани и продукцию коллагена [5, с. 83].

Продолжительность второй фазы ранозаживления, известной в литературе как пролиферативная или регенеративная, составляет около 2-х недель (5 – 20 сутки с момента ранения). Ключевыми процессами этапа являются: формирование временной примитивной ткани – грануляционной ткани, заполняющей рану и служащей ложем для последующей эпителизации; процесс формирования новых сосудов, известный как неоваскуляризация или ангиогенез.

На первом этапе формируется матрица из фибронектина, представляющего собой гликопротеид, состоящий из 2-х субъединиц, соединенных дисульфидной связью через остатки цистеина. Фибронектин функционирует как направляющая «дорожка», по которой происходит миграция фибробластов в зону раневого повреждения [4, с. 98]. Фибробласты заполняют раневое ложе и начинают формировать новый соединительнотканый матрикс в виде коллагена и гликозаминогликанов, важнейшим представителем которых является гиалуроновая кислота, являющаяся «цементом» соединительной ткани и представляющая собой полимер, структурными звеньями которого являются  $\beta$ -1,3-димеры D-глюкуроновой кислоты и N-ацетилглюкозамина [5, с. 82]. Фибробласты и выделяемые ими соединения формируют грануляционную ткань. Ключевое влияние на формирование и созревание грануляционной ткани оказывают тучные клетки, в цитоплазме которых вырабатываются гистамин, серотонин, а также гепарин, представляющий собой гетерополисахарид, структурными звеньями которого являются  $\alpha$ -1,4 димеры D-глюкоронат-2-сульфата и N-ацетилглюкозамин-6-сульфата [5, с. 82]. Основной функцией гепарина является растворение образовавшегося в ходе свертывания крови тромба путем активации антитромбина 3. При микроскопии гистологических препаратов в структуре грануляционной ткани обнаруживаются зерна, визуализирующиеся по типу матового стекла. Каждое такое зерно представляет собой сосудистое деревце с многочисленными капиллярными петлями [1, с. 16]. С течением времени происходит постепенное созревание грануляционной ткани до рубцовой, путем формирования поперечных химических связей между волокнами [1, с. 18]. После завершения формирования грануляционной ткани в ране начинается процесс неоваскуляризации. В ходе делений клеток эндотелия сосудов образуются трубчатые структуры, концы которых имеют вид почек. Отдельные сосудистые почки растут по направлению друг к другу и соединяются, образуя ветвящиеся капиллярные петли, впадающие в более крупные сосуды. Повышенная проницаемость вновь образованных капилляров обеспечивает высокую интенсивность течения метаболических процессов и ускорение регенерации [3, с. 288].



Эпителизация является завершающей фазой процесса ранозаживления и приводит к полному восстановлению кожного покрова. В фазу эпителизации происходит созревание грануляционной ткани до рубцовой. Данная фаза начинается с 21 суток течения раневого процесса и ее продолжительность широко варьирует, в зависимости от того, по какому типу происходит заживление [1, с. 21]. Начало фазы эпителизации характеризуется началом миграции кератиноцитов от периферии раны к центру, происходящей со скоростью 1-2 мм/сут. При встрече движущихся клеток эпителия с клетками противоположного края раны происходит контактное ингибирование клеточного деления. Главным фактором, оказывающим влияние на скорость движения и интенсивность деления клеток является степень их распластывания [6, с. 155]. При контакте клетки принимают форму, близкую к сферической, что приводит к угнетению синтеза регуляторных белков клеточного цикла, таких как циклины и циклин-зависимые киназы, что приводит к уменьшению интенсивности деления и движения клеток [6, с. 156]. Миграция кератиноцитов происходит не по отдельности, а в виде единого клеточного пласта, распространение которого обеспечивает сближение краев раны. Ключевую роль в миграции клеток играют Rho-зависимые ГТФ-азы, которые выполняют роль трансмиттеров, передающих сигналы от рецепторов клеток к актиновым филаментам цитоскелета. Наиболее значимыми для процесса ранозаживления являются факторы Rac1 и Cdc42, обладающие ГТФ-азной активностью. После связывания с ГТФ они индуцируют активацию специализированных белков – RAC1 и PI3K. RAC1 фосфорилирует специфические субстраты, которые запускают каскад биохимических реакций, приводящих к активации синтеза белков клеточного цикла, а также актиновых и миозиновых филаментов. PI3K принимает сигналы от мембранных рецепторов клеток и играет ключевую роль в процессе контактного ингибирования. После механического контакта клеток PI3K связывается с RAC1 и приводит к инактивации киназы, что ингибирует синтез белков клеточного цикла [7, с. 11]. Процесс миграции замещается серией клеточных делений, в ходе которых образуется многослойный клеточный пласт из кератиноцитов, заполняющих раневое ложе [6, с. 165]. Итогом неосложненного течения процесса ранозаживления является формирование рубца на месте раневого повреждения и возвращение к нормальной структуре ткани и функции органа.

#### **Библиографические ссылки**

1. Бордаков В. Н. Рана. Раневой процесс. Принципы лечения ран. Минск : Белорусский государственный медицинский университет, 2014.

2. Adam J.Mallot, David S. Zamierowski, Brian T. Andrews. Negative Pressure Wound Therapy in Maxillofacial Applications // Dentistry journal. 2016. V. 4, № 3, P. 1–13.
3. Robert F. Diegelmann, Melissa C. Evans. Wound healing: an overview of acute, fibrotic and delayed healing // Frontiers in Bioscience journal. 2004. V. 8, № 9, P. 283–289.
4. Peng-Hui Wang, Ben-Shian Huang, Huann-Cheng Horng, Chang-Ching Yeh, Yi-Jen Chen. Wound healing // Journal of the Chinese Medical Association. 2017. V. 81, № 2, P. 94–101. DOI: 10.1016/j.jcma.2017.11.002.
5. О. В. Галимов, С. Р. Туйсин, Т. З. Закиев, И. В. Закиева, А. Ф. Садыкова, И. В. Богданов, В. Н. Пономарев. Биохимические механизмы заживления ран // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15, № 3, С. 82–83.
6. Mirjam M.P.Zegers, Marie-Annick Forget, Jonathan Chernoff, Keith E.Mostov, Martin B.A.ter Beest, Steen H.Hansen. Pak1 and PIX regulate contact inhibition during epithelial wound healing // The EMBO journal. 2003. V. 22, № 16, P. 155–165. DOI: 10.1093/emboj/cdg398.
7. Gwendolyn Cazander, Gerrolt N. Jukema, Peter H. Nibbering. Complement Activation and Inhibition in Wound Healing // Clinical and Developmental Immunology journal. 2012. V. 2012, № 10, P. 1–14. DOI: 10.1155/2012/534291.

# АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ NaCl НА РОСТ И ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КЛЕТКАХ КОРНЯ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

А. В. Бурачкова

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*angelinaburachkova@gmail.com*;  
науч. рук. – П.В. Гриусевич, ст. преп.

В последние годы в литературе были описаны механизмы воздействия засоления на ион-транспортные системы плазматической мембраны растительных клеток. Охарактеризованы ответы растительных клеток на засоление у *Arabidopsis thaliana* L., *Thellungiella halophila* L., *Helianthus annuus* L. и др. Однако, литературные данные являются противоречивыми. Глубокое понимание механизмов солеустойчивости высших растений на уровне клетки позволит развить подходы повышения устойчивости растений к стрессовому воздействию и увеличить их продуктивность. Поэтому целью данной работы являлось установление особенностей влияния NaCl на рост и транспортные процессы в клетках корня *Arabidopsis thaliana* L.

**Ключевые слова:** NaCl; засоление; корень; арабидопсис; пэтч-кламп.

## ВВЕДЕНИЕ

Засоление почвы является глобальной проблемой, которая затрагивает около 20 % орошаемых земель и значительно снижает урожайность сельскохозяйственных культур [1]. Засоление ухудшает рост и развитие растений из-за водного стресса, цитотоксичности из-за чрезмерного поглощения ионов, таких как натрий ( $\text{Na}^+$ ) и хлорид ( $\text{Cl}^-$ ), а также дисбаланса питания [2]. В связи с чем изучение физиологических механизмов устойчивости к засолению, является одной из важнейших задач биологии растений. В последние годы в литературе были описаны механизмы воздействия засоления на ион-транспортные системы плазматической мембраны растительных клеток [3]. Глубокое понимание механизмов солеустойчивости высших растений на уровне клетки позволит развить подходы повышения устойчивости растений к стрессовому воздействию и увеличить их продуктивность. Целью работы являлось установление особенностей влияния NaCl на рост и транспортные процессы в клетках корня *Arabidopsis thaliana* L. Анализ проводился посредством проведения тестов на прорастание, также с использованием электрофизиологической техники пэтч-кламп в конфигурации «целая клетка».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались корни модельного растения *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. WT Wassilewskija – «WS-0»; нокаутные мутанты *gork1-1*, лишенные функционального белка GORK, кодирующего наружу-выпрямляющий K<sup>+</sup>-канал; *gork1-1* с возмещенным нативным GORK (W57.6.2.4); *gork1-1*, экспрессирующий GORK с заменой Цис-151 на Сер-151 (W56.7.4.8). Растения выращивались стерильно и вертикально в чашках Петри на полной среде Мурасиге и Скуга, pH 6,0, 1% сахара, 0,35% фитогеля в контролируемых условиях 22°C, 16 ч свет/ 8 ч темнота. Ростовые тесты проводились с использованием техники замены среды: на каждый вариант обработки высаживалось по 3 чашки Петри, в каждой по 10–15 семян, замена среды проводилась на 5 сут, регистрация прироста основного корня – на 10 сут (5 сут после введения NaCl). На 5 сут аккуратно, не задевая выросшие корни, удалялась 2/3 среды, добавлялась новая среда Мурасиге-Скуга, содержащая соответствующую концентрацию соли NaCl. Используемые концентрации хлорида натрия: 40 мМ, 100 мМ, 150 мМ, 200 мМ. Изображения анализировались в приложении ImageJ. Для регистрации токов небольших групп и отдельных ионных каналов использовался метод пэтч-клампа. Применялись корни растений, которые культивировались с использованием стандартных протоколов [4]. Использовался адаптированный протокол для выделения протопластов из клеток корня высших растений. Регистрация ионных токов производилась с использованием электрофизиологической техники пэтч-кламп в конфигурации «целая клетка».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании влияния NaCl на рост основного корня *A. thaliana* с использованием техники замены среды было показано (Рис.1), что концентрация 40 мМ NaCl практически не замедлила рост корней, кроме линии W57.6.2.4 (замедлил на 18 %). 100 мМ NaCl ингибировали рост на 12-29 %. Концентрации соли 150 мМ и 200 мМ в значительной степени ингибировали рост корней растений. Согласно полученным результатам линия *gork1-1*, лишенная наружу-выпрямляющего канала GORK, характеризуется большей устойчивостью к действию NaCl.

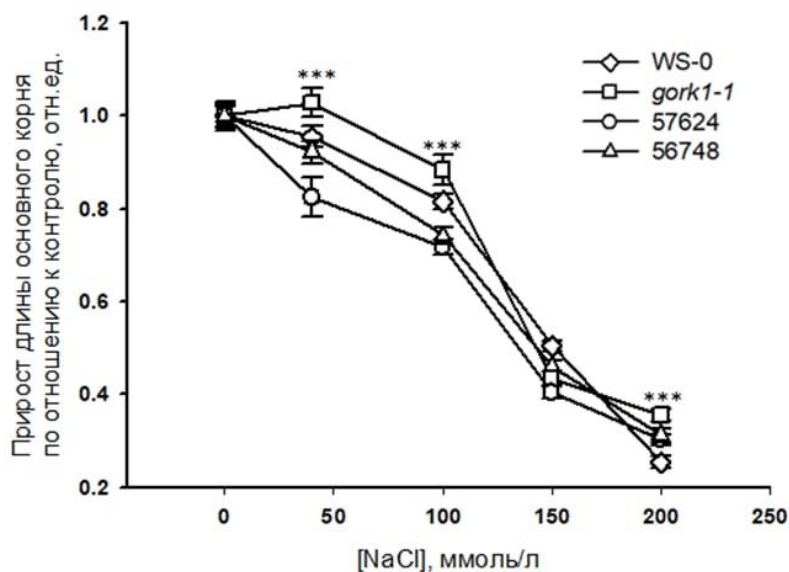


Рис. 1. Изменение длины основного корня различных генотипов *Arabidopsis thaliana* L., выращиваемых на среде Мурасиге и Скуга, содержащей 0-200 мМ NaCl, в течение 10 суток ( $\pm$ SE; n = 30). Для расчета достоверности различий между группами производился анализ ANOVA-теста, где \*\*\* $p < 0,001$ ; \*\* $p < 0,01$ ; \* $p < 0,05$

В контрольных условиях в полученных из клеток корней арабидопсиса протопластах были обнаружены наружу- и внутрь-направленные проводимости (Рис.2, А). Наружу-направленный ток включал время-зависимую и время-независимую компоненты. Время-независимая составляющая преобладала в деполяризованном состоянии мембраны. Были зарегистрированы низкие значения внутрь-направленного тока, который характеризовался отсутствием время-зависимой компоненты. При добавлении в наружный раствор 50 мМ и 100 мМ NaCl наблюдалось блокирование внутрь-направленных  $\text{Ca}^{2+}$ -токов, а также активация наружу-направленных  $\text{K}^+$ -токов. Продемонстрировано, что наружу-направленный калиевый ток увеличивается в 2 раза при добавлении 50 мМ NaCl и в 3 раза при воздействии 100 мМ NaCl (Рис.2, Б). Наружу-направленная проводимость обусловлена утечкой калия из клетки. Вероятно, утечка калия обусловлена функционированием наружу-выпрямляющего  $\text{K}^+$ -канала GORK и ряда НКК, активирующихся в присутствии стрессора.

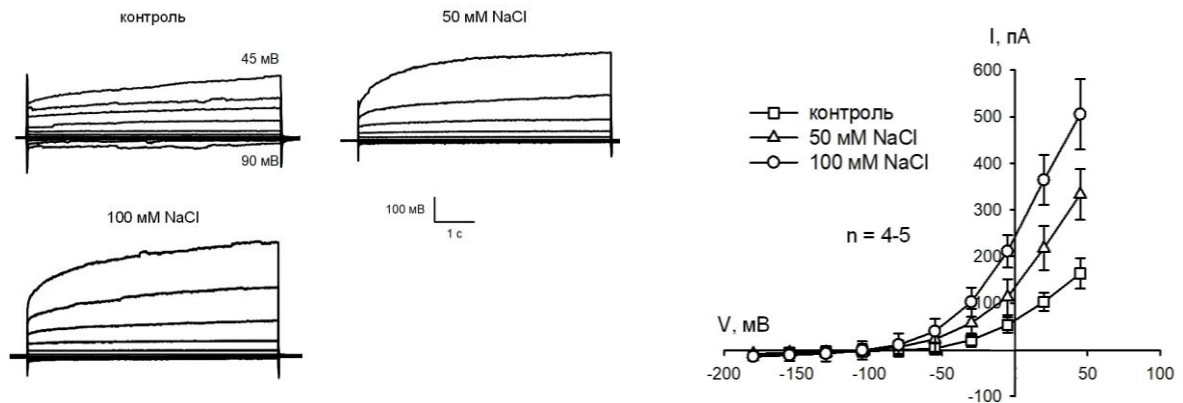


Рис. 2. А) Токвые кривые группы протопластов в плазматической мембране протопластов корневых клеток *Arabidopsis thaliana* Heynh. Б) ВАХ проводимости плазматической мембраны протопластов корневых клеток *Arabidopsis thaliana* Heynh после добавления 50 мМ и 100 мМ NaCl (n=4-5;  $\bar{X} \pm Sx$ )

Таким образом, нами было показано: 1) растения арабидопсиса, лишённые наружу-выпрямляющего канала GORK обладают большей устойчивостью к воздействию засоления по сравнению с диким типом; 2) Установлено, что при добавлении NaCl в наружный раствор происходит значительное увеличение наружу-направленной проводимости, обусловленной утечкой калия из клетки.

#### Библиографические ссылки

1. Economics of salt-induced land degradation and restoration / Qadir M. [et al.] // Natural Resources Forum. – 2014. – Vol. 38, № 4. – pp. 282 – 295.
2. Plant Salinity Stress: Many Unanswered Questions Remain / Isayenkov S. [et al.] // Front. Plant Sci. – 2019. – P. 3.
3. Shabala, S. Ion Channels and Plant Stress Responses / S. Shabala, – Berlin: Springer, – 2010. – pp. 87-110.
4. Demidchik, V. Sodium fluxes through nonselective cation channels in the plasma membrane of protoplasts from *Arabidopsis* roots / V. Demidchik, M. Tester // Plant physiology. – 2002. – Vol. 128, № 2. – P. 379–387.

# ВЛИЯНИЕ БКМ-7 НА БОЛЕЗНИ СОВРЕМЕННОСТИ

У. П. Галюк

*Лицей Белорусского государственного университета, г. Минск;*

*ustinagalyuk@gmail.com;*

*науч. рук. – А. С. Чубарова, канд. биол. наук, доц.*

БКМ-7 (бета-казоморфин-7) – короткий пептид, образующийся в результате протеолиза при переваривании коровьего молока из бета-казеина А<sub>1</sub> – представителя группы бета-казеинов, которые занимают одну из лидирующих позиций по частоте встречаемости в молоке. Недавние исследования показали, что БКМ-7 – опиоидный пептид, оказывающий негативное влияние на развитие многих болезней и патологий. Цель данного исследования – показать механизмы действия БКМ-7 на различные системы органов и формирования возможных патологических состояний, а также предложить рациональные пути снижения воздействия БКМ-7 на здоровье человека. Изучение свойств и частот встречаемости форм казеинов молока у современных пород коров поможет найти правильный подход к регулированию содержания бета-казеина А<sub>1</sub> в молоке, оптимизировать способы обработки молока для снижения содержания БКМ-7, обосновать отбор животных, лишенных А<sub>1</sub> аллелей.

**Ключевые слова:** экзорфины, БКМ-7, ВСМ-7, бета-казеин А<sub>1</sub>, бета-казеин А<sub>2</sub>, опиоидные пептиды, протеолиз.

Важным источником питания для большинства млекопитающих является молоко, имеющее первостепенное значение для человека, начиная с рождения, на всех этапах жизни, вплоть до смерти [1, с. 3].

Коровье молоко примерно на 87% состоит из воды и на 13% из «твердых фракций»: жира, белка, лактозы («молочного сахара») и минералов. В молоке выделяют 2 основные группы белков: казеины (С<sub>n</sub>) и сывороточные белки. Казеины составляют около 80% белка молока. Существует 4 вида казеина: альфа s<sub>1</sub>-, альфа s<sub>2</sub>-, бета-, каппа-. Бета-казеин составляет около 35% С<sub>n</sub> в коровьем молоке, и данный белок обладает высокой степенью полиморфизма по сравнению с другими типами казеинов [2, с. 740].

У молочного скота имеется около 13 генетических вариантов β-казеина. Среди них наиболее важные: это варианты А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> и В, которые также обнаруживаются в грудном молоке. Они возникают из-за миссенс-мутаций ДНК, произошедших тысячи лет назад, вызвавших аминокислотные замены. Варианты А<sub>1</sub> и А<sub>2</sub> наиболее распространены в мировой популяции крупного мелкого рогатого скота, и они отличаются 1 аминокислотой в 67 положении: в бета-казеине А<sub>1</sub> в 67 положении находится аминокислота гистидин, а в бета-казеине А<sub>2</sub> – пролин [2, с. 742]. Удивительно, но единичное различие в белковой структуре приводит

к качественным различиям воздействия продуктов протеолиза данных

белков на организм. Показано, что пептидная связь между пролином и соседней аминокислотой в 66 положении, а именно, с изолейцином, крайне затруднительно подвергается гидролизу протеолитическими ферментами ЖКТ, тогда как связь гистидина с изолейцином с легкостью разрушается пищеварительными ферментами. В результате этого из бета-казеина  $A_1$  при пищеварении может высвобождаться пептид, состоящий из 7 аминокислот и именуемый БКМ-7 (бета-казоморфин-7), тогда как, по имеющимся данным, этого не происходит (или происходит в незначительной степени) при переваривании бета-казеина  $A_2$ . Количество  $A_1$  и  $A_2$  вариантов бета-казеина в молоке зависит от вида и породы крупного рогатого скота [3, с. 3715]. Так, к примеру, у коз и верблюдов присутствует только  $A_2$  вариант. Учет вариантов казеина, которые характерны для конкретной породы крупного рогатого скота, важно как с технологической точки зрения (качество и количество надоев молока и сыра), так и для понимания возможных биологических активностей [3, с. 3720]. Целью данного исследования является изучение механизмов действия БКМ-7 на различные системы органов и формирования возможных патологических состояний, а также предложить рациональные пути снижения воздействия БКМ-7 на здоровье человека.

Показано, что БКМ-7, выделяющийся при расщеплении бета-казеина  $A_1$ , выступает патогенным фактором при ряде заболеваний, включая сердечнососудистые заболевания, диабет 1-го типа и аутизм, показана связь БКМ-7 с непереносимостью коровьего молока и рядом аутоиммунных заболеваний [4, с. 7290].

БКМ-7 – гептапептид, состоящий из последовательности Tyr-Pro-Phe-Val-Glu-Pro-Ile и обладающий морфиноподобным действием. Присутствие пролина во 2-м положении имеет решающее значение для биологической активности пептида, т.к. пролин обеспечивает определенную ориентацию боковых цепей тирозина и фенилаланина. Наличие других аминокислот в цепи модифицирует биологическую активность конкретного казоморфина [5, с. 12]. БКМ-7 является агонистом  $\mu$ -опиоидных рецепторов, которые отвечают за боль, жажду, эйфорию, угнетение дыхания и присутствуют в центральной нервной системе и желудочно-кишечном тракте человека. В центральной нервной системе эти рецепторы расположены в ряде структур: мозговом стволе и луковице, медиальном таламусе, спинном мозге, тройничном нерве, гипоталамусе и лимбической системе. Они также встречаются на периферии: на сенсорных нервных окончаниях, в сплетениях кишечника и мочевого пузыря, а также на клетках иммунной системы. Опиоидная



система, активируемая эндогенными опиоидами играет регулирующую и контролирующую роль в ряде процессов: ингибирование стимулов, вызывающих боль, работа эндокринной и вегетативной нервной систем, эмоции и когнитивные способности, обучение и модуляция памяти, работа желудочно-кишечного тракта [6, с. 862].

У здоровых взрослых пептиду БКМ-7 сложно проникнуть через стенки пищеварительного тракта и в кровотоки из-за крупных размеров молекулы. Однако, некоторые люди страдают от синдрома повышенной проницаемости ЖКТ; по этой причине БКМ-7 и другие пептиды легко проникают в кровоток. Связь между этим синдромом и симптомами аутизма была установлена профессором Робертом Кейдом и его коллегами из Флоридского университета. Ученые располагают косвенными доказательствами того, что у людей с язвенной болезнью желудка или неизлеченной целиакией БКМ-7 абсорбируется через стенки пищеварительного тракта. Вероятно, таким же образом БКМ-7 преодолевает стенку ЖКТ и у младенцев [7, с. 1727].

Эксперименты на крысах показали, что после перорального введения препаратов БКМ-7 крысам, пептид проникает в кровоток, с легкостью преодолевает гематоэнцефалический барьер и связывается с опиоидными рецепторами. Получены данные, что у таких крыс наблюдаются изменения в поведении, весьма схожие с симптомами аутизма и шизофрении. Также было показано, что БКМ-7 может вызывать апноэ у взрослых крыс и новорожденных кроликов, что аналогично с синдромом внезапной детской смерти [7, с. 1730].

Не все активности БКМ-7 объясняются его опиоидными свойствами. Остаток тирозина на конце цепи сообщает БКМ-7 сильные окислительные свойства. В экспериментах *in vitro* БКМ-7 выступает активным окислителем липопroteина низкой плотности. Окисление ЛПНП лежит в основе процесса формирования бляшек на стенках артерий, ведущего к развитию сердечно-сосудистых заболеваний [8, с. 3].

Подводя итог следует обозначить, что споры о пользе и вреде бета-казеинов  $A_1$  и  $A_2$  останутся в ближайшие годы актуальными. Сторонники «молока  $A_2$ » набирают вес и, вероятно, в конце концов, одержат победу. Доказательства патологической роли бета-казеина  $A_1$  и БКМ-7 продолжают умножаться. Однако, ввиду научной сложности описанной тематики, пройдет значительный промежуток времени, прежде чем накапливающиеся доказательства примет широкая общественность.

В ходе проведенного анализа данных и аналитической работы нами предлагается ряд мероприятий, которые позволят наиболее экономически выгодно решить данную проблему:

1. Сокращение использование глубокой обработки молока, приводящей к повышению биологической активности его компонентов (в частности высвобождение БКМ-7). Из этого следует, что необходимо переходить к потреблению молока от локальных производителей, прошедшего пастеризацию вместо стерилизации, несмотря на меньшие сроки годности.

2. Проведение работ по постепенную замену поголовья коров с «рискованными» аллелями  $A_1$  в генотипе на поголовье с преобладающими  $A_2$  аллелями, молоко которых не содержит бета-казеин  $A_1$ .

3. Снижение использования молочного сырья  $A_1$  в составе диетических и лечебно-профилактических продуктов за счет замены на козье, овечье и буйволиное молоко, либо за счет потребления коровьего молока от культивируемых локально азиатских и африканских пород крупного рогатого скота, либо путем потребления молока от генетически отобранных стад крупного рогатого скота европейского типа, прошедших сертификацию как свободные от мутации His67.

#### Библиографические ссылки

1. Muthu Thiruvengadam, Baskar Venkidasamy, Prabhu Thirupathi, Ill-Min Chung, Umadevi Subramanian.  $\beta$ -Casomorphin: A complete health perspective // Food Chemistry. 2021. V. 337, P. 1–42. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127765.
2. Brooke-Taylor S, Dwyer K, Woodford K, Kost N. Systematic Review of the Gastrointestinal Effects of  $A_1$  Compared with  $A_2$   $\beta$ -Casein // Adv Nutr. 2017. V. 8, № 5, P. 739–748. DOI: 10.3945/an.116.013953.
3. Andrea Summer, Federica Di Frangia, Paolo Ajmone Marsan, Ivano De Noni, Massimo Malacarne. Occurrence, biological properties and potential effects on human health of  $\beta$ -casomorphin 7: Current knowledge and concerns // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. V. 60, № 21, P. 3705–3723. DOI: 10.1080/10408398.2019.1707157.
4. Pal S.; Woodford K.; Kukuljanm S.; Ho S. Milk Intolerance, Beta-Casein and Lactose // Nutrients. 2015, V. 7, P. 7285–7297. DOI: 10.3390/nu7095339.
5. Clarke A.J., Trivedi M.S. Bovine Beta Casein Variants: Implications to Human Nutrition and Health // Food Security and Nutrition. 2014, V. 67, № 3, P. 11–17 DOI: 10.7763/IPCБЕЕ.
6. Sodhi M, Mukesh M, Kataria RS, Mishra BP, Joshii BK. Milk proteins and human health:  $A_1/A_2$  milk hypothesis // Indian J Endocrinol Metab. 2012, V. 16, № 5, P. 856–869. DOI: 10.4103/2230-8210.100685.
7. Ul Haq Mohammad, Kapila Rajeev, Umesh Suman. Impact of Milk Derived  $\beta$ -Casomorphins on Physiological Functions and Trends in Research: A Review // International Journal of Food Properties. 2014, V. 17. P. 1726–1741. DOI: 10.1080/10942912.2012.712077.
8. Kuellenberg de Gaudry, D., Lohner, S., Bischoff, K. *et al.*  $A_1$ - and  $A_2$  beta-casein on health-related outcomes: a scoping review of animal studies // European Journal of Nutrition. 2022, V. 61, P. 1–21. DOI: 10.1007/s00394-021-02551-x.

# ОБЩИЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ В КРОВИ И ПЕЧЕНИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОСТРОГО И ХРОНИЧЕСКОГО ВОСПАЛЕНИЯ КОЖИ У КРЫС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2,4-ДИНИТРОХЛОРБЕНЗОЛА

**А.О. Гасперович, Т.Ю. Козинко, А.А. Пирожкова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anuhkaaa@gmail.com, kozinkotereza@gmail.com,*

*anya.pirozhkova.99@mail.ru;*

*науч. рук. – М.С. Чумаченко, ст. преп.*

Аллергический контактный дерматит (АКД) – это одно из самых распространенных воспалительных заболеваний кожи, причиной возникновения которого, являются соединения, широко используемые в быту. Особенно остро стоит проблема профессионального АКД, который составляет 90% от всех профессиональных заболеваний, оказывая не только негативное влияние на здоровье и качество жизни, но и нанося ущерб обществу [1, 2]; это определяет актуальность и необходимость исследования патогенеза кожных заболеваний, а также разработку их способов лечения.

Цель исследования: – оценка потенциального противовоспалительного действия эмульсии, содержащей человеческий рекомбинантный лактоферрин на модели АКД;

– оценка влияния острого и хронического воспаления кожи на биохимические показатели в крови и печени крыс при моделировании воспаления с использованием 2,4-динитрохлорбензола.

Полученные данные свидетельствуют, что острый и хронический АКД влияет на активность печеночных трансфераз, лактатдегидрогеназы (ЛДГ), щелочной фосфатазы (ЩФ), общего белка вызывая повышение их концентрации в сыворотке крови и печени крыс. После периода самовосстановления концентрация биохимических показателей снижаются в некоторых случаях ниже контрольных, но в основном показатели остаются повышенными по отношению к контрольной группе. Также данные показывают выраженный защитный эффект лактоферрина при острой фазе АКД, что проявляется снижением уровня активности АЛТ, коэффициента де Ритиса в печени экспериментальных групп животных, а также снижением концентрации общего белка в печени, активности ЩФ и ЛДГ в печени и крови животных с индуцированным АКД. Нарушения метаболизма липидов связаны с модуляторами воспаления и нарушениями иммунологических показателей. По-видимому, АКД можно классифицировать как иммуно-метаболическое заболевание. Несмотря на интенсивные исследования, до сих пор нет однозначного объяснения этапов (острая, хроническая фаза) и механизмов развития АКД.

**Ключевые слова:** холестерин; триглицериды; общие липиды; ЛПВП; ЛПНП; лактоферрин; аллергический контактный дерматит; АЛТ; АСТ; ЩФ; ЛДГ.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведется поиск соединений обладающих противовоспалительным действием. Среди наиболее известных соединений обладающий антибактериальной, противовирусной, противовоспалительной и антиоксидантной активностью является лактоферрин [3]. Нами был выбран человеческий рекомбинантный лактоферрин полученный на кафедре биохимии из молока трансгенных коз. Лактоферрин (ЛФ) – негемовый железосвязывающий глобулярный гликопротеин, содержащийся преимущественно в молоке, сыворотке крови и многих экзокринных секретах, уникален благодаря своей исключительной полифункциональности и регуляторным свойствам [4].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнен на самцах крыс линии Wistar массой 280 – 300 г, находившихся на стандартном рационе вивария.

Действующим веществом являлся 2,4 - динитрохлорбензол. Носитель – смесь ацетон: оливковое масло (4:1). Моделирование воспалительного заболевания кожи проводилось путем нанесения действующего вещества, растворенного в носителе, на предварительно выбритый участок кожи, размером 3×3 см. Периодичность нанесения действующего вещества – каждые 2 суток. Сразу после нанесения действующего вещества крысы рассаживались в одиночные клетки, по прошествии 30 минут крысы вновь переносились в общую клетку. Продолжительность эксперимента для моделирования острой фазы – 7 суток, хронической фазы – 21 сутки. Животные были разделены на следующие экспериментальные группы: Серия 1 – интактные животные (n=6); Серия 2 – индуцированный острый АКД (n=10); Серия 3 – индуцированный хронический аллергический контактный дерматит (n=10); Серия 4 – индуцированный острый АКД + нанесение мази на основе ЛФ (n = 10); Серия 5 – индуцированный острый аллергический контактный дерматит с последующим периодом самовосстановления (n=10); Серия 6 – индуцированный хронический АКД с последующей стадией самовосстановления (n=10); Серия 7 – контроль с нанесением мази на основе ЛФ (n=6). В тканях крыс (сыворотка крови, гомогенат печени) определялись концентрации холестерина, триглицеридов,

ЛПВП, ЛПНП, АСТ, АЛТ, ЩФ, ЛДГ, общего белка с помощью спектрофотометрического метода анализа.

Результаты представлены как среднее  $\pm$  стандартная ошибка среднего. Критическое значение уровня значимости было принято равным 5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что аллергический контактный дерматит (АКД), вызванный 1-хлор-2,4-динитробензолом, проявляется значительными изменениями кожного покрова: – гиперемия, отек, серозно-гнойные корки, повышение местной температуры, зуд; проявлялось беспокойство животных и взъерошенность шерсти [5].

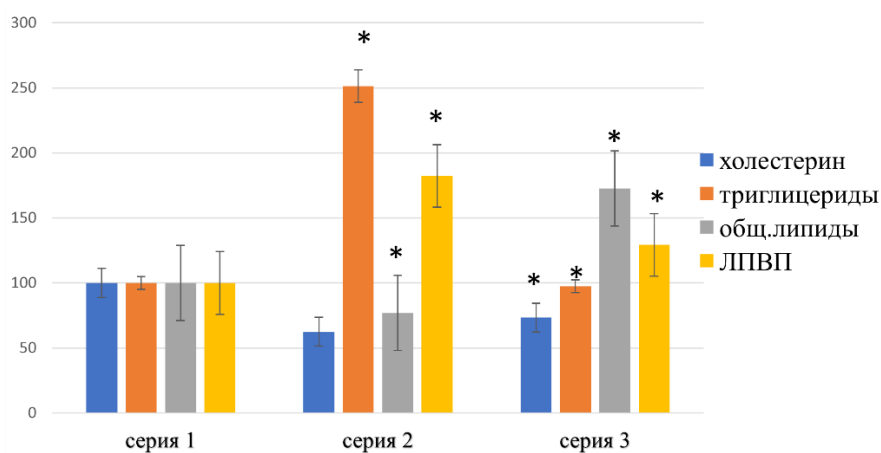


Рис. 1. Изменение показателей липидного обмена в сыворотке крови крыс в разных сериях эксперимента.

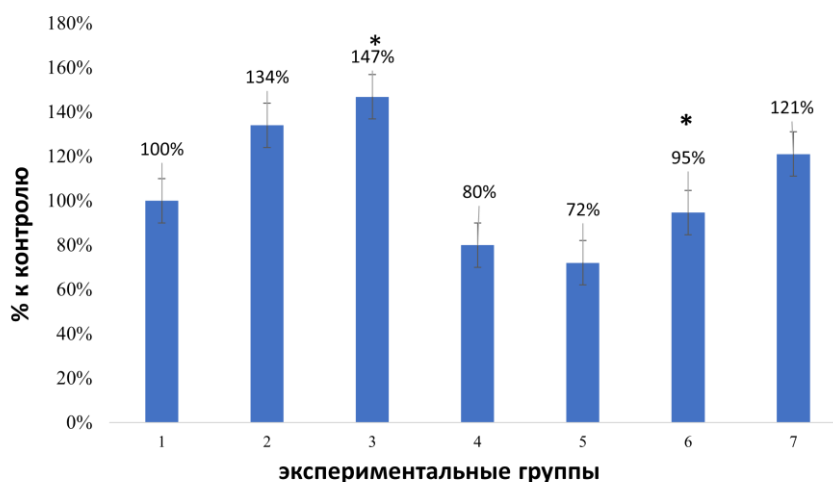
Серия 1 – контроль; серия 2 – индуцированный острый АКД; серия 3 – индуцированный хронический аллергический контактный дерматит; \* – достоверные различия ( $p < 0,05$ ) по отношению к контрольной группе крыс (серия 1)

При индуцированном остром аллергическом контактном дерматите в крови крыс снижается концентрация холестерина на 37,5%, общих липидов на 23% и ЛПВП на 50%, но повышается содержание триглицеридов в 2 раза относительно контрольной группы ( $p < 0,05$ ), уровень ЛПНП не изменяется – что свидетельствует о развитии дислипидемии. При моделировании хронической фазы АКД в крови крыс повышается только уровень общих липидов на 78%, не изменяется

уровень триглицеридов и снижается уровень холестерина на 25% соответственно контрольной группы, что свидетельствует о менее значимых нарушениях метаболизма липидов, чем в острой фазе АКД. При острой фазе АКД в сыворотке крови повышаются соотношения триглицериды/общий холестерол, ЛПВП/общий холестерол, ЛПВП/ЛПНП, что подтверждает нарушения липидного обмена (дислипидемия), характеризующегося в первую очередь повышенным содержанием в крови триглицеридов, являющиеся важнейшими факторами риска атеросклероза. При хронической фазе АКД в гомогенате печени крыс понижается содержание всех показателей липидного обмена, что свидетельствует о влиянии воспалительного процесса кожи на клетки печени, нарушая их работу, тем самым повышается риск развития метаболического синдрома, повреждения проницаемости кожи и развития онкообразований в печени.

При острой фазе воспаления наблюдается повышение активности трансфераз в сыворотки крови и в печени крыс. Показано, что активность ЛДГ повышалась в крови и печени в группе с индуцированным АКД и АКД в стадии самовосстановления, что может говорить о тканевой деструкции. В группе крыс АКД + ЛФ было выявлено достоверное снижение активности ЛДГ на 62% в крови и на 102% в печени относительно группы с АКД о. фазе, что может говорить о терапевтическом эффекте ЛФ. 4. В группах с индуцированным АКД в острой фазе и АКД + самовосстановление было выявлено достоверное повышение активности ЩФ в крови и печени крыс относительно контрольной группы. В группе с АКД + ЛФ, наоборот, было выявлено достоверное снижение активности ЩФ в крови и печени крыс на 25,45% и 29,9% соответственно по отношению к группе с индуцированным АКД. Активность АЛТ в печени экспериментальной группы с применением мази на основе ЛФ (серия 7) вызвало повышение активности АЛТ на 39,62%. В группе крыс с АКД + ЛФ было выявлено снижение активности фермента на 12,33% по отношению к группе крыс с индуцированным АКД. В печени экспериментальных групп животных с АКД + ЛФ было выявлено достоверное снижение активности АСТ на 64,05% по отношению к группе крыс с АКД в острой фазе. При анализе содержания общего белка в печени, было выявлено, что введение ЛФ достоверно не влияет на содержание общего белка в печени крыс по отношению к контрольной группе животных. В то же время при анализе

экспериментальных данных было выявлено достоверное снижение концентрации общего белка в группе крыс с АКД + мази на основе ЛФ на 53,52% по отношению к группе животных с индуцированным АКД.



*Рис. 2.* Изменение содержание общего белка в печени крыс в разных сериях эксперимента

Серия 1 – контроль; серия 2 – индуцированный острый АКД; серия 3 – индуцированный хронический АКД; серия 4 – индуцированный острый АКД + нанесение мази на основе ЛФ; серия 5 – индуцированный острый АКД с последующим периодом самовосстановления; серия 6 – индуцированный хронический АКД с последующей стадией самовосстановления; серия 7 – контроль с нанесением мази на основе ЛФ. \* – достоверные различия ( $p < 0,05$ ) по отношению к контрольной группе крыс (серия 1).

Таким образом обнаруженные данные предполагают возможным применение мази на основе ЛФ, для лечения острых и хронических заболеваний кожи. Тем не менее необходимо проведение дальнейших исследований, связанных с нарушением метаболизма при АКД.

#### Библиографические ссылки

1. Allergic contact dermatitis / P. Saint-Mezard [et al.] // Eur J Dermatol. – 2004. – Vol. 14. – P. 284-295.
2. Thyssen, J. The epidemiology of contact allergy in the general population prevalence and main findings / J. Thyssen [et al] // Contact Dermatitis. – 2007. – Vol. 57, № 5. – P.287 – 299.
3. A structural framework for understanding the multifunctional character of lactoferrin / N. Baker [et al] // J. Biochimie. – 2009. – Vol. 91. – P. 3-10.
4. Lactoferrin in the myeloproliferative disorders: a search for granulopoietic regulator defects / D. Brown [et.al] // Br. J. of Haematology. – 1985. – Vol. 59. – P. 617-626.
5. Molecular and cellular mechanisms of allergic disease / D.H. Broide // J Allergy Clin Immunol. – 2001. Vol. 108. – P. 65-71.

# ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СЕМЕЙСТВА ГЕНОВ RUNX У ПОЗВОНОЧНЫХ

**Е. М. Громова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
el.m.gromova@gmail.com;  
науч. рук. – Т. В. Романовская, канд. биол. наук, доц.*

Гены RUNX у человека и других позвоночных выступают в качестве важных регуляторов в процессах клеточного развития и обладают парадоксальными эффектами при развитии рака: они могут функционировать и как гены-супрессоры опухолей, и как доминантные онкогены в зависимости от условий. Соответственно, понимание их роли в различных молекулярных процессах в будущем может иметь принципиальное значение при диагностике и лечении разного рода заболеваний. Целью данной работы являлось раскрытие эволюционных отношений между членами семейства RUNX, а также определение функционально важных позиций в Runt-домене, отличающих членов семейства друг от друга. Было показано, что раннее предположение о наибольшей консервативности RUNX3 среди всех членов семейства, по-видимому, является ошибочным. Также были найдены вероятно функционально важные позиции в Runt-домене у человека, которые могут влиять на связывание со специфическими белками-партнёрами для отдельных членов семейства RUNX.

**Ключевые слова:** семейство генов RUNX; онологи; позвоночные; филогенетика; биоинформатика.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Семейство генов RUNX у позвоночных включает 3 гена: RUNX1, RUNX2 и RUNX3. Они кодируют транскрипционные факторы, которые участвуют в регуляции развития различных систем органов. Нарушения в генах RUNX могут приводить к онкологическим заболеваниям [1].

Определяющим компонентом транскрипционных факторов RUNX является присутствие высококонсервативного домена Runt, который отвечает за взаимодействие с ДНК, другими белками, гетеродимеризацию и ядерную локализацию [1].

Известно, что общий предок позвоночных прошёл два раунда полногеномной дупликации. Паралогичные гены, образовавшиеся в результате этого события, называются онологами, к коим и относятся гены семейства RUNX. Идентификация онологов является непростой задачей из-за дальнейших специфических перестроек геномов. Что интересно, обнаруживается существенная связь между онологами и различными болезнями, в том числе раком [2].



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для филогенетического анализа была создана выборка видов позвоночных, репрезентирующая разные классы этого подтипа: *Homo sapiens*, *Mus musculus*, *Gallus gallus*, *Chelonia midas*, *Xenopus tropicalis*, *Danio rerio*. В качестве внешней группы был выбран представитель класса Морские ежи *Strongylocentrotus purpuratus*. Выбирались самые длинные продукты сплайсинга в базе данных NCBI RefSeq.

Полученные последовательности выравнивались алгоритмом MUSCLE из пакета MEGAX и редактировались с помощью программы Gblocks с минимальной жесткостью селекции позиций. Эволюционные модели замен определялись соответствующим инструментом в MEGAX. Филогенетические деревья в MEGAX строились методом максимального правдоподобия. Деревья с заданной топологией выполнялись пакетом программ BEAST2.0.

Для анализа позиций в домене Runt, характерных для отдельных членов семейства RUNX, проводился поиск патогенных и вероятно патогенных однонуклеотидных миссенс-мутаций в базе данных ClinVar. Мутации в уникальных для членов семейства позициях, которые встречаются в популяции и не приводят к патологическим состояниям, обнаруживались с помощью базы данных dbSNP. Для визуализации полученных данных использовалась программа SnapGene Viewer.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построенные в программе MEGAX филогенетические деревья для членов семейства RUNX подтвердили, что после дивергенции три гена семейства далее изменялись независимо друг от друга. Для определения скорости накопления изменений отдельными генами и белками семейства RUNX были построены деревья с заданной топологией (рис. 1). На данных деревьях длина ветвей показывает, сколько мутаций произошло за время эволюции между линиями, то есть чем длиннее ветвь, тем больше произошло и закрепилось изменений. Здесь обнаруживается интересный момент. Долгое время считалось, что RUNX3 из всех трех членов семейства отличается наибольшей консервативностью, что было выведено из относительного размера генов, экзон-интронной структуры и характера экспрессии [3]. Однако, из построенных деревьев видно, что такое предположение скорее является ошибочным, поскольку нуклеотидная и аминокислотная последовательности RUNX3 накопили либо большее, либо сравнимое количество изменений, что и остальные члены семейства.

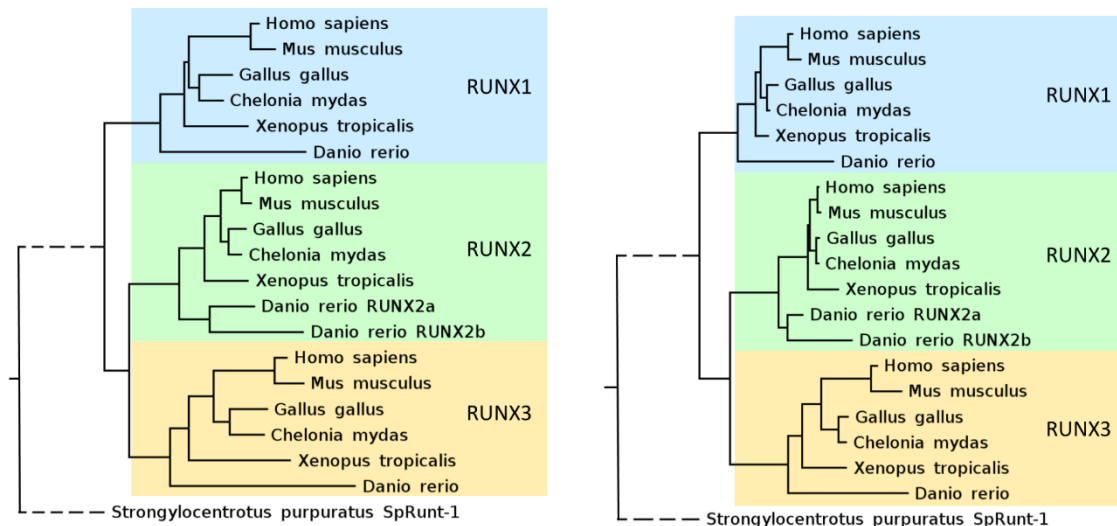


Рис. 1. Филогенетические деревья с заданной топологией для нуклеотидных (слева, эволюционная модель замен НКУ+G+I) и аминокислотных (справа, эволюционная модель замен JTT+G) последовательностей членов семейства RUNX (пунктиром обозначены ветви, не отражающие действительную длину)

Хотя домен Runt и является высококонсервативным среди всех членов семейства RUNX, в нём всё равно наблюдаются позиции, которые отличают один ген семейства от другого. Был проведен поиск потенциально функционально важных замен исходя из допущения, что если конкретная аминокислота в соответствующей позиции значима и определяет индивидуальные характеристики каждого члена семейства, то миссенс мутации по данной позиции будут приводить либо к летальному исходу на ранних стадиях развития, либо к патогенным состояниям.

На рисунке 2 представлены уникальные аминокислотные сайты в домене Runt для RUNX1 и RUNX2. Как видно, ни на одну из этих позиций не приходится мутаций, связанных с патогенными или вероятно патогенными состояниями. Что касается изменений, которые встречаются в популяции и не ассоциированы с патологиями, то такие найдены у RUNX1 для Thr104 и Thr148 и у RUNX2 для Ala111 и Glu147. Следовательно, остальные позиции (отмечены на рисунке черным) могут быть связаны со специфическими функциями отдельных членов семейства RUNX.

Для RUNX3 уникальные позиции наблюдаются для Ala77 и Thr175, причем замены, не ассоциированные с патогенными состояниями, обнаруживаются для Ala77, но не для Thr175. Интересно, что для белка RUNX3 вообще не описано патогенных и вероятно патогенных миссенс мутаций, что может свидетельствовать о том, что изменения в функционально значимых сайтах молекулы однозначно приводят к летальному исходу на эмбриональной стадии развития.

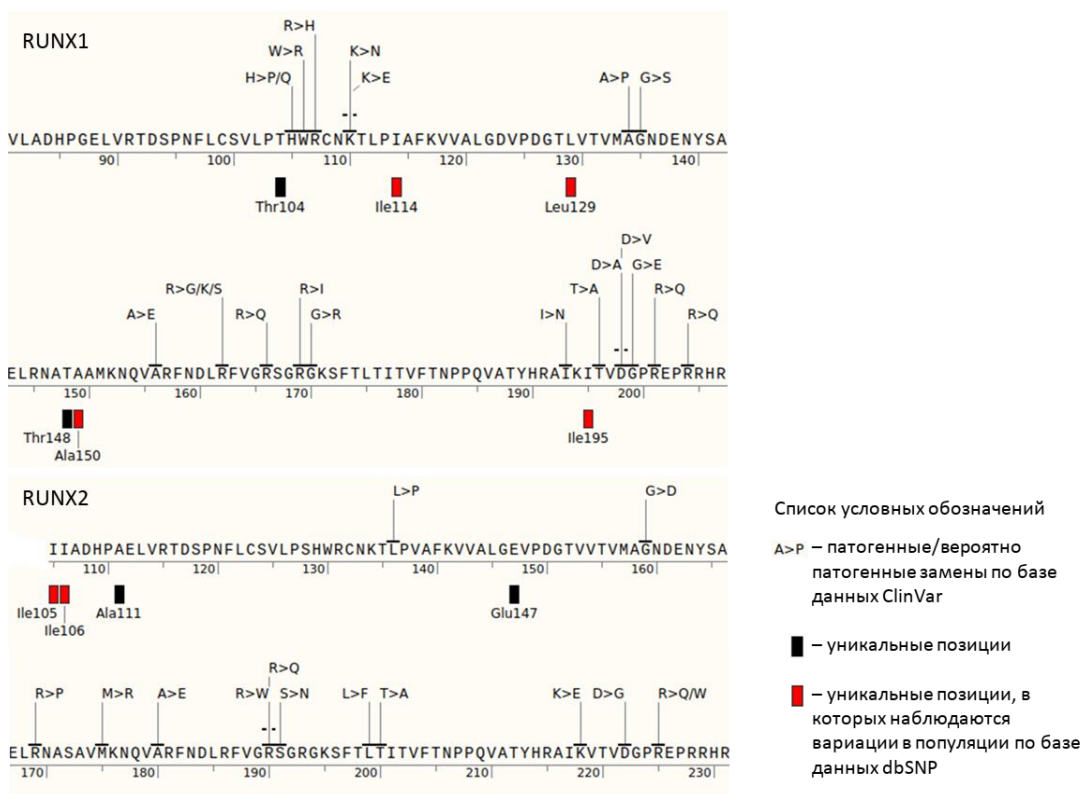


Рис. 2. Уникальные аминокислотные позиции в Runt-доме для RUNX1 и RUNX2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После двух раундов полногеномной дупликации гены RUNX далее изменялись независимо друг от друга. RUNX3 не является самым консервативным членом семейства, как это предполагалось ранее.

Найдены вероятно функционально важные позиции в Runt-доме, отличающие белки семейства у человека друг от друга: для RUNX1 – Ile114, Leu129, Ala150 и Ile195; для RUNX2 – Ile105 и Ile106; для RUNX3 – Thr175. Данные сайты могут влиять на связывание со специфическими белками-партнёрами для отдельных членов семейства RUNX, что требует дальнейшего экспериментального подтверждения.

### Библиографические ссылки

1. RUNX transcription factors: orchestrators of development / R. Mevel [et al.] // Development. – 2019. – Vol. 146, № 17. – 19 p.
2. Singh, P.P. OHNOLOGS v2: a comprehensive resource for the genes retained from whole genome duplication in vertebrates / P.P. Singh, H. Isambert // Nucleic Acids Research. – 2020. – Vol. 48, № D1, 08. – P. D724- D730.
3. Phylogenesis and regulated expression of the RUNT domain transcription factors RUNX1 and RUNX3 / D. Levanon [et al.] // Blood Cells, Molecules, and Diseases. – 2003. – Vol. 30, № 2. – P. 161-163.

# ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В КОРНЯХ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ ПРИ АБИОТИЧЕСКОМ СТРЕССЕ

**В. Д. Громыко, А. Е. Ярошеня**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*v.mackievic@gmail.com;*

*науч. рук. – В.С. Мацкевич, ст. преп.*

Засоление и повышенные уровни тяжелых металлов являются основными лимитирующими факторами для сельского хозяйства. Известно, что в ответ на данные воздействия в растениях развиваются симптомы окислительного стресса, тем не менее, механизм индукции синтеза АФК в корнях высших растений до конца не ясен. При помощи АФК-чувствительного флуоресцентного зонда H<sub>2</sub>DCFDA была протестирована реакция ризодермальных клеток арабидопсиса на NaCl и NiCl<sub>2</sub>, а также показано вовлечение системы Ca<sup>2+</sup>-сигнализации в запуск окислительного стресса при данных воздействиях.

**Ключевые слова:** АФК; NaCl; никель; Ca<sup>2+</sup>-сигнализация; корень; арабидопсис.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Активные формы кислорода (АФК) представляют собой важную систему, участвующую в нормальных физиологических процессах, а также в ответе растений на стрессовые воздействия [1, 2]. Повышенные уровни АФК в клетке могут приводить к повреждениям структурных элементов, перекисному окислению липидов, индукции разрывов ДНК, нарушению синтеза и гидролиза белков. Таким образом, вследствие дисбаланса АФК растений теряют способность существовать в стрессовых условиях.

Среди абиотических факторов среды наиболее опасным для жизни растений является засоление почв. Приблизительно 25% всех почв земли засолено [3]. Высокое содержание NaCl угнетает растения (и даже приводит к их гибели), снижает продуктивность сельскохозяйственных видов. Тяжелые металлы являются одной из основных причин снижения качества и количества урожая, а также повреждения дикой флоры на техногенно-загрязненных территориях [4]. Среди опасных металлов-загрязнителей принципиальное значение имеет никель, так как он широко используется в промышленности, в частности, при производстве нержавеющей стали, сплавов, электроники и аккумуляторных батарей [5]. Флора, растущая вблизи добывающих шахт и перерабатывающих заводов, претерпевает негативное воздействие никеля, проявляющееся в торможении ростовых процессов, хлорозе листьев, некрозе корней, симптомах окислительного стресса. Тем не менее, механизм токсичности никеля до конца не ясен. Целью настоящей работы было

установить эффект NaCl и NiCl<sub>2</sub> на генерацию АФК в корнях высших растений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опыты проводились с использованием проростков *Arabidopsis thaliana* L. Heunh. Семена арабидопсиса стерилизовались 20% раствором гипохлорита натрия (15 мин), промывались стерильной водой и высаживались на питательную среду следующего состава: 100% среда Мурашиги и Скуга, 1% сахароза, 0,35% Phytigel (pH 6,0). После выдерживания 2 сут при 4°C, растения культивировались в ростовом кабинете при 22°C, 16 ч света и 8 ч темноты. Анализ накопления АФК производился в клетках корня 7-дневных проростков с помощью красителя H<sub>2</sub>DCFDA. После стрессовой обработки растения *A. thaliana* инкубировались в 50 мкМ H<sub>2</sub>DCFDA в течении 10 мин, далее 5 мин отмывались в буфере (мМ): 0,1 KCl, 0,1 CaCl<sub>2</sub>, 1 Tris/ 2 Mes (pH 6,0). Флуоресценцию детектировали при помощи микроскопа Nikon Eclipse TS-100 с использованием FITC фильтра. Полученные изображения анализировали в программе ImageJ. Статистический анализ данных проводили при помощи ANOVA теста.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе анализировался уровень накопления АФК при обработке растений различными концентрациями NaCl и NiCl<sub>2</sub>. Было показано, что воздействие 40-200 мМ NaCl индуцировало синтез АФК в клетках корня арабидопсиса, при этом накопление флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA коррелировало с возрастанием концентрации соли. При низких концентрациях NiCl<sub>2</sub> (10-300 мкМ) уровень АФК в клетках корня был схож с контролем. С возрастанием концентрации металла наблюдалось увеличение накопления АФК. Наибольший эффект имела обработка 3 мМ NiCl<sub>2</sub>, вызывающая увеличение флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA в зрелой зоне на 90%, а в кончиках корня – на 50%.

Далее был проведен анализ кинетики данной реакции (рис. 1). При тестировании 3 мМ NiCl<sub>2</sub> наиболее высокий уровень генерации АФК в корнях *A. thaliana* был замечен при 75 мин. В зрелых клетках эпидермиса корней свечение H<sub>2</sub>DCFDA увеличивалось на 90% по сравнению с обработкой буфером. При симуляции засоления, максимальное свечение H<sub>2</sub>DCFDA в зоне всасывания вызывала обработка 200 мМ NaCl на протяжении 60 мин, после чего интенсивность флуоресценции снижалась. В кончиках корней

достоверное увеличение интенсивности флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA было отмечено на 45 мин, после чего флуоресценция вышла на плато.

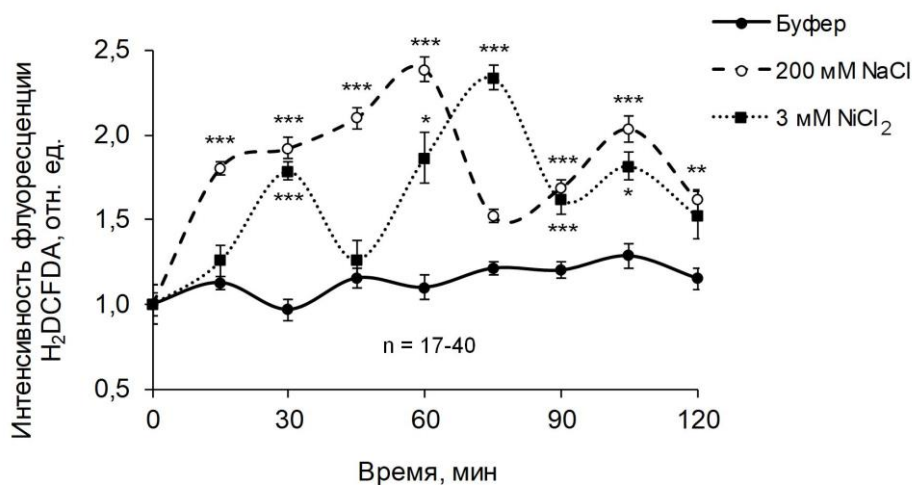


Рис. 1. Изменение флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA в зоне всасывания корней арабидопсиса при обработке проростков NaCl и NiCl<sub>2</sub> ( $X \pm Sx$ ; n=17-40). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю: \* – p<0,05, \*\* – p<0,01, \*\*\* – p<0,001

Для установления роли Ca<sup>2+</sup>-сигналикации в индукцию синтеза АФК при засолении и тяжелометаллическом стрессе использовался блокатор Ca<sup>2+</sup>-проницаемых катионных каналов Gd<sup>3+</sup> (рис. 2). Было показано, что в зрелой зоне интенсивность флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA увеличивалась в 1,5 и 2,3 раза при обработке 100 и 200 мМ NaCl, соответственно. Добавление 0,1 мМ GdCl<sub>3</sub> снижало NaCl-индуцированное накопление АФК в зрелой зоне, однако не оказывало протекторного эффекта в кончике корня. При этом никель-индуцированная флуоресценция H<sub>2</sub>DCFDA снижалась на фоне 0,1 мМ GdCl<sub>3</sub> как в зрелой зоне, так и в кончиках корня. Следует также отметить, что снижение синтеза АФК при никелевом стрессе наблюдалось при добавлении гистидина.

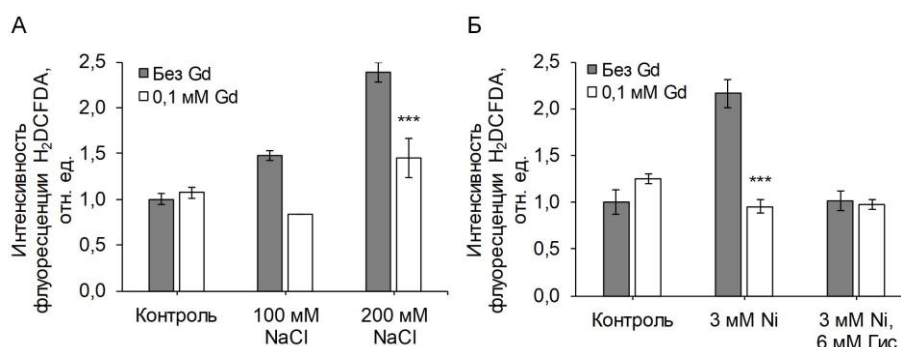


Рис. 2. Эффект добавления Gd<sup>3+</sup> на накопление АФК в клетках корней арабидопсиса в ответ на засоление и никелевый стресс ( $X \pm Sx$ ; n=10-20). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к обработке растворами без Gd<sup>3+</sup>: \*\*\* – p<0,001

Таким образом, нами было показано: 1) Обработка проростков арабидопсиса растворами NaCl, концентрацией свыше 100 мМ, вызывает увеличение флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA, что свидетельствует о накоплении АФК; 2) Максимальная интенсивность флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA при солевом стрессе регистрировалась на 60 мин инкубации растений в 200 мМ NaCl; 3) При низких концентрациях никеля (10-300 мкМ) уровень АФК в клетках корня *A. thaliana* был на уровне контроля, с возрастанием уровня NiCl<sub>2</sub> до миллимолярных концентраций наблюдалось увеличение накопления АФК; 4) Наибольший эффект имела 75-минутная обработка 3 мМ NiCl<sub>2</sub>, вызывающая увеличение флуоресценции H<sub>2</sub>DCFDA в зрелой зоне на 90%; 5) Добавление блокатора Ca<sup>2+</sup>-проницаемых катионных каналов (GdCl<sub>3</sub>) снижает NaCl- и NiCl<sub>2</sub>-индуцированное накопления АФК, что говорит о вовлечении системы Ca<sup>2+</sup>-сигнализации в запуск окислительного стресса при действии абиотических стресс-факторов.

Работа была выполнена в рамках темы НИР «Исследование функционального взаимодействия сигнально-регуляторных и антиоксидантных систем при стрессе с целью повышения общей стрессоустойчивости высших растений и создания новых биотехнологий» (№ государственной регистрации 20211222), подпрограммы «Молекулярные и клеточные биотехнологии-2» государственной программы научных исследований «Биотехнологии-2» на 2021–2025 годы.

#### Библиографические ссылки

1. Васильевна, П.Е. Активные формы кислорода в физиологии и патологии клетки / П.Е. Васильевна, Н.В. Егорович, Л.О. Сергеевна // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 13-22.
2. Колупаев, Ю.Е. Активные формы кислорода и стрессовый сигналинг у растений / Ю.Е. Колупаев, Ю.В. Карпец // Украинский биохимический журнал. – 2014. – Т. 86. – С. 1-18.
3. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review / P. Parihar [et al.] // Environ Sci Pollut Res. – 2015. – Vol. 22, № 6. – P. 4056-4075.
4. Aftab, T. Plant micronutrients: deficiency and toxicity management / T. Aftab, K.R. Naeem // Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – P. 104-108.
5. Серегин, И.В., Кожевникова, А.Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения / И.В. Серегин, А.Д. Кожевникова // Физиология растений. – 2006. – Т. 53. – С. 285-308.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВООПУХОЛЕВОГО ПОТЕНЦИАЛА СОЕДИНЕНИЙ ФЕНАЗИНОВОГО РЯДА БАКТЕРИЙ *PSEUDOMONAS CHLORORAPHIS* SUBSP. *AURANTIACA*

А. А. Жизневская

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*anastasia.zhyzneuskaya@gmail.com*;

науч. рук. – Е. Г. Веремеенко, канд. биол. наук, доц.

Онкологические заболевания являются серьезной проблемой для современной медицины. Высокая смертность пациентов обусловлена быстрым прогрессированием опухолей, низкой эффективностью препаратов наряду с их токсичностью в отношении нормальных клеток организма, а также высокой частотой рецидивов. Поэтому разработка высокоэффективных противоопухолевых препаратов по-прежнему остается актуальной. Большой интерес в этом отношении вызывают ароматические гетероциклические соединения. Одним из представителей этой группы являются соединения феназинового ряда. Целью данного исследования являлся анализ цитотоксических свойств феназинов в отношении малигнизированных клеточных линий. Определены цитотоксические концентрации феназинов, выделенных из штамма *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В-162/15 в отношении линий клеток HeLa и М-21. С целью предварительного определения типа клеточной гибели получены цитологические препараты клеток HeLa до и после обработки соединениями феназинов.

**Ключевые слова:** феназины; цитотоксическая активность; HeLa; М-21; *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*.

## ВВЕДЕНИЕ

Феназины представляют собой большую группу азотсодержащих гетероциклических веществ [1]. Они являются вторичными метаболитами бактерий, обеспечивающими последним конкурентное преимущество в занимаемой экологической нише [2]. Синтез феназинов характерен для бактерий родов *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Nocardia* и др. Показано также наличие особых типов феназинов (метанофеназинов) у архей рода *Methanosarcina* [3]. Создание продуцентов феназиновых соединений обычно проводят на основе бактерий родов *Streptomyces* и *Pseudomonas*, которые обладают высоким природным уровнем синтеза этих метаболитов, а также разнообразием природных производных данных соединений [1, 4].

Феназины характеризуются широким спектром активностей за счет разнообразия заместителей, связанных с ароматическим ядром. Вследствие этого они проявляют не только антимикробное действие, но также имеют нейропротекторные и антиоксидантные свойства.



Производные феназинов активно используются в медицинской практике как противорвотные средства и нейролептики, а также в ветеринарии в качестве глистогонных препаратов [5].

Несмотря на то, что механизмы действия феназинов довольно разнообразны, основным из них является генерация активных форм кислорода. Так, феназины легко могут вызвать окислительный стресс и гибель клеток, что является одним из механизмов конкурентного действия их продуцентов. Влияние активных форм кислорода наиболее выражено в отношении метаболически активных и интенсивно делящихся клеток, что характерно для большинства клеток опухолей. Кроме того, были идентифицированы производные феназина, которые блокируют активность топоизомераз I и II в эукариотических клетках. Поскольку раковые клетки интенсивно делятся, им необходимы высокие уровни активности обеих топоизомераз, поэтому такие клетки будут более восприимчивы к действию феназинов [3]. В связи с этим феназиновые антибиотики являются перспективными для исследования их противоопухолевого потенциала.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В работе были использованы клетки линии HeLa (перевиваемая линия карциномы шейки матки) и M-21 (перевиваемая линия меланомы человека), культура клеток бактерий штамма *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В-162/15. Культивирование бактерий и клеток опухолей проводилось согласно стандартным протоколам. Выделение и очистку феназиновых соединений проводили по методике твердофазной экстракции, предложенной в [1]. Оценку цитотоксического эффекта феназинов осуществляли с использованием МТТ-теста. Цитологические препараты получали путем окрашивания клеток раствором акридинового оранжевого.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Концентрации феназинов, взятые для исследования, находились в диапазоне от 10 мг/л до 500 мг/л с шагом 10 мг/л. Инкубацию культур клеточных линий HeLa и M-21 с препаратами феназинов проводили в течение 24 ч, 48 ч и 72 ч. Для растворения феназинов выбран 70% спирт. В серии предварительных экспериментов было установлено, что используемые объемы 70% спирта (менее 40 мкл/200 мкл среды) не являлись токсичными для исследуемых культур клеток. Таким образом,

зарегистрированная гибель опухолевых клеток является следствием действия только феназиновых комплексов.

Установлено, что в культуре клеток HeLa концентрации феназинов ниже 50 мг/л не оказались эффективными. При концентрации феназинов в 300 мг/л гибель клеток составляла 90%, 400 мг/л – 95%, 500 мг/л – 98% при инкубации в течение 72 ч. При инкубации в течение 24 ч гибель клеток не превышала 70% при максимальной концентрации.

Для культуры клеток линии M-21 концентрации феназинов ниже 60 мг/л не проявили цитотоксического эффекта. Однако уже при концентрации в 200 мг/л зарегистрирована 99% гибель клеток за время инкубации в течение 72 ч.

Микроскопический анализ подтверждает массовую гибель культуры после обработки феназинами (рис. 1 Б).

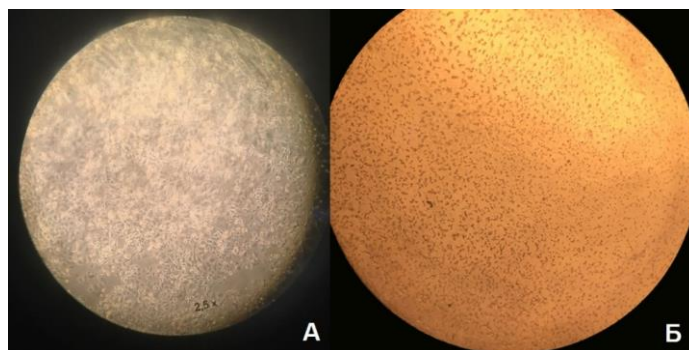


Рис. 1. Микроскопические фотографии клеток HeLa в контроле (А) и после обработки феназинами в концентрации 500 мкг/мл (Б).

Инвертированный микроскоп Axiostar plus (ZEISS, Германия). Объектив A-Plan 10x/0.25 Ph 1 Var (ZEISS, Германия)

Также были получены цитологические препараты культур клеток HeLa без обработки и после обработки препаратами феназиновых комплексов (рис. 2).

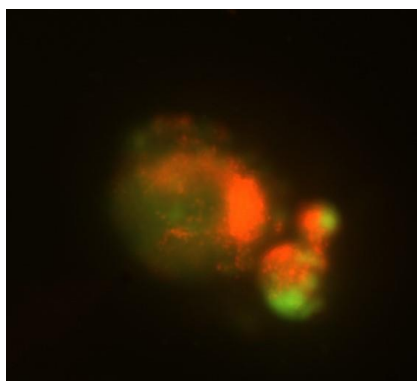


Рис. 2. Клетка линии HeLa после обработки феназинами в концентрации 50 мкг/мл. Микроскоп Nikon eclipse 50i, объектив Plan Fluor 20x/0.50 DIC M/N2 WD 2.1

На фотографии видно образование апоптотических телец. Таким образом, преимущественный тип клеточной гибели после обработки феназинами – апоптоз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были получены высокоочищенные препараты феназинов из культур бактерий *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca*. На основании проведенного анализа можно утверждать, что феназиновые комплексы, выделенные из штамма *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В162/15, проявляют выраженную цитотоксическую активность в отношении малигнизированных клеточных линий HeLa и М-21. Цитотоксические концентрации препаратов составили 500 мкг/мл для культуры клеток HeLa и 200 мкг/мл – для культуры клеток М-21. Наблюдается закономерное увеличение ингибирующего воздействия феназинов с увеличением времени инкубации. Также было установлено, что преимущественным типом гибели при действии феназинов в культуре клеток HeLa является апоптоз.

### Библиографические ссылки

1. Phenazines and cancer / A. Cimmino [et al.] // Nat. Prod. Rep. – 2012. – Vol. 29, № 4. – P. 487.
2. Mavrodi, D.V. Diversity and evolution of the phenazine biosynthesis pathway / D.V. Mavrodi [et al.] // Appl. Envir. Microbiology. – 2010. – V. 76, № 3. – P. 866–879.
3. Pierson, L. S. Metabolism and function of phenazines in bacteria: impacts on the behavior of bacteria in the environment and biotechnological processes / L.S. Pierson, E.A. Pierson // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2010. – Vol. 86, № 6. – P. 1659–1670.
4. Laursen, J.B. Phenazine natural products: biosynthesis, synthetic analogues, and biological activity / J.B. Laursen, J. Nielsen // Chem. Rev. – 2004. –V. 104. – P. 1663–1685.
5. Веремеенко, Е. Г. Анализ биологической активности феназинового комплекса бактерий *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *Aurantiaca* в отношении нормальных и малигнизированных клеточных линий / Е.Г. Веремеенко, Е.В. Леончик, Н.П. Максимова // Журн. БГУ Биология. – 2017. – № 3. – С.14-20.

# ФЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛИМОРФИЗМА ЖИЛКОВАНИЯ КРЫЛА И РИСУНКА ВЕРХА БЕЛОРУССКИХ ПОПУЛЯЦИЙ *LEPTINOTARSA DECEMLINEATA* SAY (COLEOPTERA, CRYSOMELIDAE)

Д. Б. Зинурова

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*danazinurova@inbox.ru*;

науч. рук. – О. Л. Нестерова, канд. биол. наук, доц.

Проведен анализ изменчивости рисунка переднеспинки и надкрылий, а также жилкования перепончатого крыла *Leptinotarsa decemlineata* Say, 1824 из трех популяций, собранных в Витебской области.

**Ключевые слова:** *Leptinotarsa decemlineata*, полиморфизм, изменчивость, рисунок надкрылий, рисунок переднеспинки, жилкование, Витебская область, фены, фенокомплексы, фенетическая структура популяции.

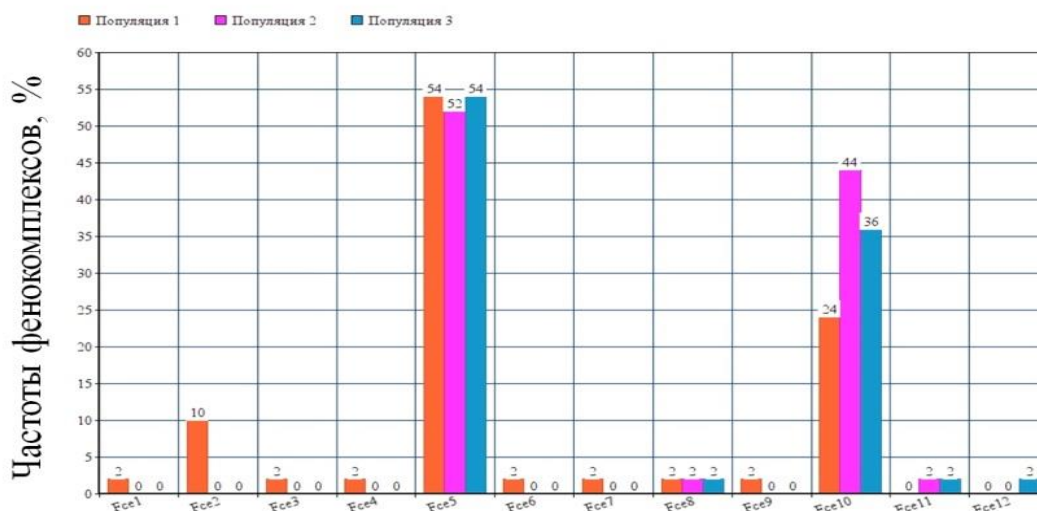
Колорадский картофельный жук *Leptinotarsa decemlineata* Say, 1824, питаясь различными пасленовыми сельскохозяйственными культурами, в том числе картофелем, признан одним из самых опасных вредителей, способных существенно снизить урожай. Сегодня разработано множество подходов и методик для борьбы с ним, однако этот вид экологически пластичный и легко адаптируется к изменениям условий среды обитания, при этом сохраняя высокую жизнеспособность как имаго, так и личинок [1].

Фактический материал по данному виду собирался в трех биотопах Витебской области Лепельского района в окрестностях д. Бор. Сбор проводился вручную, из каждой популяции отобрано по 50 особей. Для фенетического анализа в популяциях использовали фены рисунка переднеспинки, рисунка надкрылий и жилкования крыла (рис. 1) [2].



Рис. 1. Рисунок верха *L. decemlineata* Say:  
1-6 – полосы рисунка надкрылий; А-Г – пятна рисунка переднеспинки

Проанализировав изменчивость рисунка надкрылий, было выделено 5 фенов и 12 фенокомплексов (рис. 2).



### Фенокомплексы

Рис. 2. Частоты фенокомплексов по признаку рисунка надкрылий

В результате анализа фенокомплексов рисунка надкрылий (Fce) оказалось, что доминирующие фенокомплексы Fce5 и Fce10 встречаются с практически одинаковой частотой в каждой из трёх популяций. Частота второго доминирующего фенокомплекса Fce10 во второй популяции близка к таковому Fce5, в третьей популяции она составляет треть от всех фенокомплексов в ней, а в первой популяции – только четверть. Субдоминирующие морфы имеются только в первой популяции, это Fce2 с частотой 10 %, во всех остальных популяциях подавляющее число особей имеют доминирующие морфы. Первая популяция обладает семью уникальными (отсутствуют у других) фенокомплексами Fce1, Fce2, Fce3, Fce4, Fce6, Fce7, Fce9, шесть из которых не встречаются в других популяциях, причем один из этих фенокомплексов является субдоминирующим, это Fce2, остальные являются редкими и обнаружены у единичных экземпляров.

По признаку рисунка переднеспинки выделено 7 фенов и 31 фенокомплекс (рис. 3). При анализе рисунка переднеспинки было замечено, что фенокомплекс FCr9 доминирует во всех трёх популяциях, FCr15 в первой и третьей популяциях, FCr17 – во второй и третьей популяциях, FCr8 в первой, FCr12 во второй, в третьей это субдоминант, а в первой вообще отсутствует. В первой популяции пять субдоминирующих фенокомплексов: FCr3, FCr4, FCr7, FCr17, FCr19, из них два субдоминирующих либо доминирующих встречаются в остальных популяциях FCr17 и FCr19, а три из них являются уникальными для этой популяции, это FCr3, FCr4, FCr7.

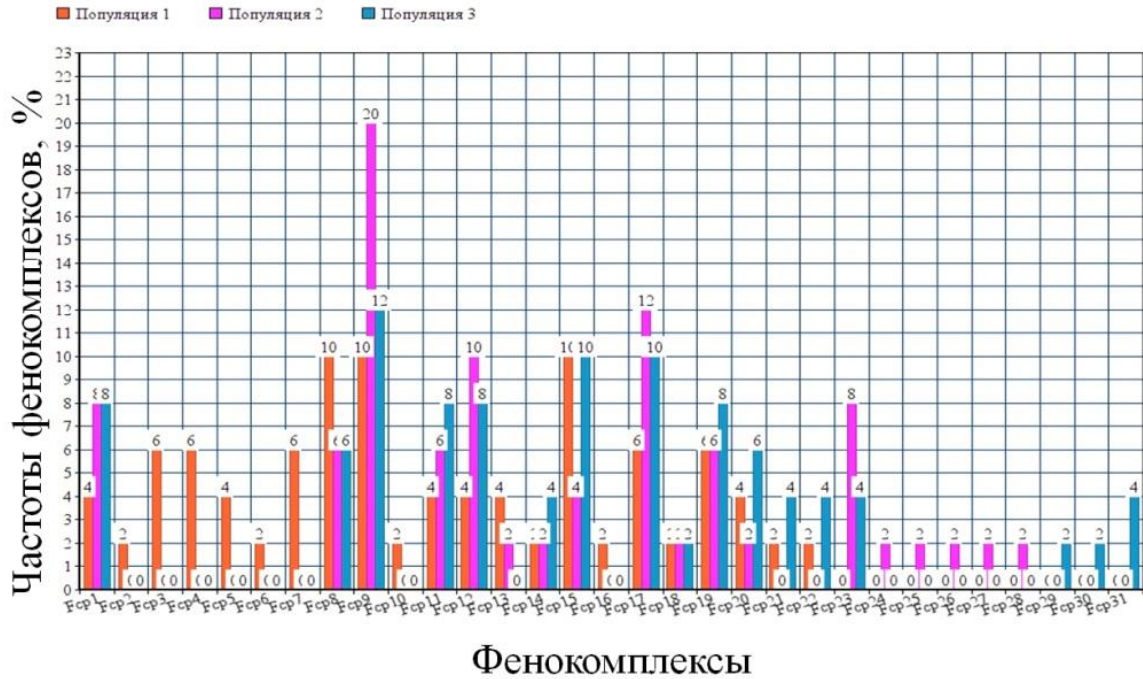


Рис. 3. Частоты фенокомплексов по признаку рисунка переднеспинки

Во второй популяции пять субдоминирующих фенокомплексов: FCr8, FCr11, FCr15, FCr19, FCr23, из них четыре встречаются в остальных популяциях и являются доминирующими либо субдоминирующими, один не встречается в первой, а в третьей встречается, но с невысокой частотой, это FCr23. Уникальные для первой популяции восемь фенокомплексов: FCr2, FCr3, FCr4, FCr5, FCr6, FCr7, FCr10, FCr16, три из которых субдоминирующие для неё (FCr3, FCr4, FCr7), во второй популяции уникальные FCr24, FCr25, FCr26, FCr27, FCr28, в третьей FCr29, FCr30, FCr31.

По признаку рисунка жилкования крыла выделено 4 фена и 7 фенокомплексов (рис. 4).

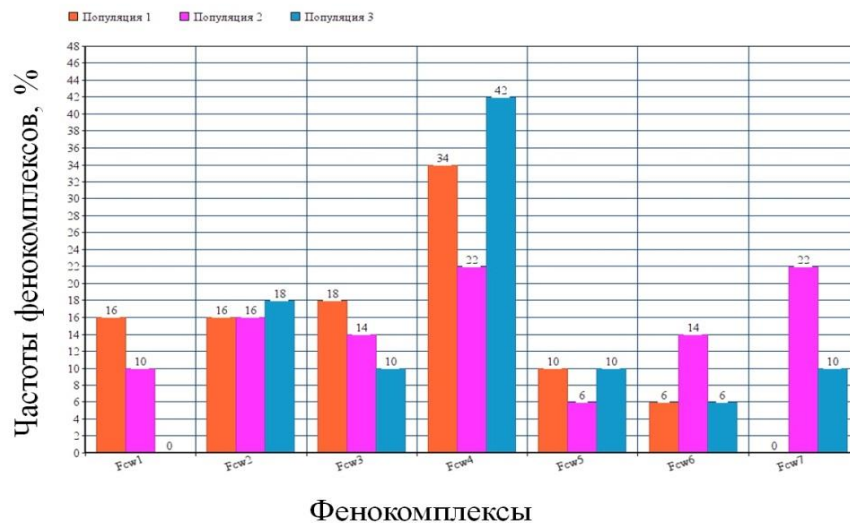


Рис. 4. Частоты фенокомплексов по признаку жилкования крыла

В процессе анализа феноккомплексов рисунка жилкования крыла пришли к выводу, что доминирующие феноккомплексы FCw4, FCw3, FCw2 встречаются с близкой частотой во всех популяциях. Феноккомплекс FCw1 является доминирующим в первой популяции, в то время как во второй он субдоминирующий, а в третьей не встречается вообще, FCw5 является субдоминирующим для первой и третьей популяции, а во второй является редким, FCw7 доминирующий во второй и третьей популяциях, а в первой он отсутствует. Уникальные феноккомплексы отсутствуют.

Были рассчитаны также частота встречаемости асимметричных особей и значения показателей внутрипопуляционного разнообразия (табл. 1).

Таблица 1

**Показатели внутрипопуляционного разнообразия *L. decemlineata***

Показатели	Популяция 1			Популяция 2			Популяция 3		
	ндкр	псп	кр	ндкр	псп	кр	ндкр	псп	кр
$\mu$	1	1	1	0,98	0,98	1	0,96	1	1
$h$	0,55	0,49	0,12	0,24	0,31	0,24	0,29	0,29	0,12
<b>асимметрия, %</b>	2	2	14	0	2	22	4	2	10

Примечание:  $\mu$ -среднее число морф,  $h$ -доля редких морф.

Вариабельность рисунка верха *L. decemlineata* довольно высока. Спектр изменчивости рисунка переднеспинки шире остальных признаков, изменчивость рисунка переднеспинки и надкрылий демонстрирует присутствие, как общих доминантных морф, так и наличие довольно большой доли уникальных феноккомплексов. Крайне низкая доля асимметричных форм говорит о стабильности исследованных популяций.

Изменчивость жилкования крыла узкая, доминантные морфы общие во всех трех популяциях, но отсутствуют уникальные морфы в популяциях. Признак жилкования крыльев является единственным, в котором явно присутствует значимая асимметрия.

Также было проведено попарное сравнение исследуемых популяций (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты попарного сравнения выборок**

Сравниваемые выборки популяций	Показатель сходства, $r$		
	Рисунок надкрылья	Рисунок переднеспинки	Жилкование крыльев
Популяция 1 и 2	0,27	0,42	0,85
Популяция 1 и 3	0,25	0,3	0,71
Популяция 2 и 3	0,8	0,45	0,85

Результаты попарного сравнения выборок показали, что наиболее похожи популяции 2 и 3 по всем параметрам, остальные пары сравнения демонстрируют меньшую схожесть. Кроме того, жилкование крыла наиболее стабильно у данного вида и по этому признаку все популяции наиболее сходны.

#### **Библиографические ссылки**

1. Фасулати С.Р. Полиморфизм и популяционная структура колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* Say в европейской части СССР / С.Р.Фасулати // Экология . – 1985.- №6 – С.50-56.
2. Негроров С.О. Иллюстрированный определитель семейств жуков / С.О. Негроров. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. – 12-13 с.



# ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ЭЛИСИТОРОВ НА АКТИВНОСТЬ ГЕНА ФЕНИЛАЛАНИН-АММИАК-ЛИАЗЫ У *SOLANUM LYCOPERSICUM* L

А. В. Зуева

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*alík.zev@gmail.com*;

науч. рук. – О.В. Лагодич, ст. преп.

Было установлено, что обработка семян томатов экзогенными элиситорами (Янтарин и Эпином), увеличивает активность гена фенилаланин-аммиак-лиаза, тем самым индуцируя неспецифическую устойчивость растений к стрессорам.

**Ключевые слова:** экзогенные элиситоры, фенилаланин-аммиак-лиаза, томат.

На сегодняшний день, устойчивость растений, в частности, сельскохозяйственных культур, к биотическим и абиотическим стрессовым воздействиям, является одним из основных критериев при выборе конкретного сорта из множества аналогичных в целях выращивания и получения урожая. Одно из перспективных направлений молекулярной биологии, позволяющее значительно повысить эффективность сельского хозяйства состоит в изучении различных форм системной устойчивости растений, и механизмов ее индукции. Фенилаланин-аммиак-лиаза – ключевой фермент фенилпропаноидного биосинтеза, который участвует в синтезе соединений, играющих важнейшую роль в индуцировании неспецифической устойчивости растений к стрессорам. Фермент обратимо катализирует реакцию дезаминирования L-фенилаланина с образованием транс-коричной кислоты и аммиака. С этой реакции начинается синтез широкого спектра вторичных метаболитов: фенолов, фенилпропаноидов, мономеров лигнина, салициловой кислоты и других соединений, необходимых для развития растений и защиты их от неблагоприятных факторов [1,2,3].

В связи с этим изучение влияния экзогенных элиситоров на активность гена фенилаланин-аммиак-лиазы у *Solanum lycopersicum* L. является актуальным.

В работе использовали: Эпин (эпибрассинолид 0,25 г/л) – регулятор роста и развития растений и регулятором роста растений на основе янтарной кислоты Янтарин.

Объектом исследования служили томаты сорта «Доходный» белорусской селекции. Семена перед посевом подвергались поверхностной стерилизации в слабом растворе перманганата калия (10 мин) и 70%-ном растворе этилового спирта в течение 5 минут и

промывались стерильной дистиллированной водой 3 раза и далее помещались в раствор Эпина и Янтарина на 30 минут.

Семена проращивали в культуре *in vitro* на безгормональной среде Мурасиге-Скуга, содержащей стандартный набор солей [4]. Растения культивировали в климатической камере при 16-ти часовом освещении и температуре 18°C(ночь) – 24°C(день). На стадии четырех настоящих листьев (четыре-пять недель после прорастания), на первый настоящий лист наносили суспензию спор фитопатогенного гриба *Botrytis cinerea* Pers, которые получали путем смыва с чашки с трехнедельным спороносящим мицелием.

На седьмые сутки после заражения отбирали фрагменты листьев томата, помещали в эппендорфы и быстро замораживали в жидком азоте, хранили при – 70°C. Выделение РНК из отобранных образцов проводилось посредством хлороформ-фенольного метода [5]. С полученной РНК проводилась реакция обратной транскрипции с использованием рандомных гексамеров.

Для амплификации фрагмента гена фенилаланин-аммиак-лиазы использовали праймеры, последовательности которых представлены в таблице 1. При этом, сконструированы они были таким образом, что прямой праймер в незрелой РНК разделен интроном. Такая структура праймеров для ПЦР позволяет исключить ошибки сплайсинга. В качестве референсного гена использовали EF1 $\alpha$ , кодирующего субъединицу фактора элонгации и трансляции (табл.).

**Олигонуклеотиды**

Ген	Последовательность 5'- 3'	Размер
Pal5 F	CTTATCAGGTTCTTGAATGCTGG	23
Pal5 R	GGGGTAATGTTGCTGTTGATC	21
Ожидаемый продукт амплификации гена Pal5 182 п.н.		
Ef1- $\alpha$ F	TTGAGGCTCTTGACCAGATTAATG	24
Ef1- $\alpha$ R	GTTTCAACACGACCGACAGG	20
Ожидаемый продукт амплификации гена Ef1- $\alpha$ 121 п.н.		

С использованием данных праймеров была проведена серия экспериментов по постановке ПЦР, в ходе которой нами были подобраны оптимальные условия для амплификации и наиболее подходящие концентрации реагентов.

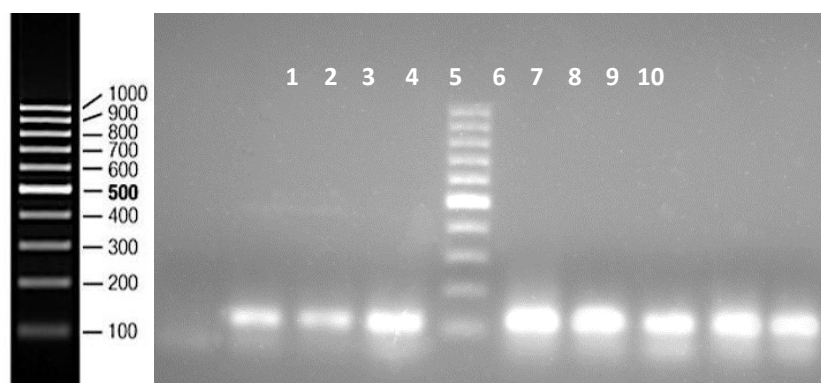


Рис. 1. Электрофореграмма продуктов амплификации гена EF1 $\alpha$

- 1 – отрицательный контроль
- 2 - контрольное растение, зараженное *B. cinerea*;
- 3 - контрольное растение;
- 4,6– эксперим. растение, обработанное Янтарином и зараженные *B. cinerea*;
- 5 – маркер молекулярного веса GeneRuler 100 bp DNA Ladder (Thermo Scientific);
- 7 – эксперим. растение, обработанное Янтарином;
- 8-9 – эксперим. растения, обработанные Эпином и зараженные *B. cinerea*;
- 10 – эксперим. растение, обработанное Эпином;

На первом этапе исследования провели полимеразную цепную реакцию для получения продукта амплификации гомеостатического гена EF-1 $\alpha$ , который экспрессируется в растениях постоянно. В результате серии экспериментов нам удалось получить продукт ожидаемой длины во всех образцах растительного материала, что позволяет использовать его в качестве референсного ген.

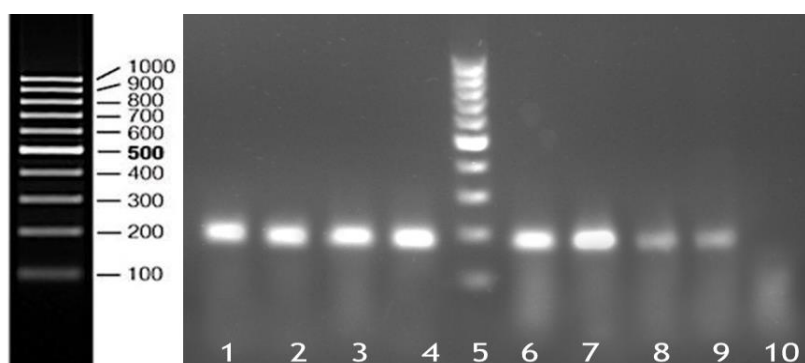


Рис. 2. Электрофореграмма продуктов амплификации гена Pal5

- 1 – эксперим. растение, обработанное Эпином;
- 2-3 – эксперим. растения, обработанные Эпином и зараженные *V.cinerea*;
- 4 – эксперим. растение, обработанное Янтаринном;
- 5 – маркер молекулярного веса GeneRuler 100 bp DNA Ladder (Thermo Scientific);
- 6-7 – эксперим. растения, обработанные Янтаринном и зараженные *V.cinerea*;
- 8 - контрольное растение;
- 9 – контрольное растение, зараженное *V.cinerea*;
- 10 - отрицательный контроль

В результате проведения ПЦР с помощью электрофоретического анализа показано, что во всех образцах листьев томата присутствуют фрагменты гена Pal5, экспрессирующегося при системной устойчивости. Основываясь на подходах «полуколичественных методов анализа» можно заключить, что экспрессия Pal5-гена в экспериментальных образцах выше, чем в контрольных.

Таким образом полученные результаты подтверждают влияние таких элиситоров как Янтарин и Эпин на экспрессию гена Pal5, и, как следствие на активацию неспецифической системной устойчивости растений томата.

#### Библиографические ссылки

1. Васюкова Н.И., Придворова С.М., Герасимова Н.Г. Участие фенилаланинаммиаклиазы и салициловой кислоты в индуцировании устойчивости томатов, инвазированных галловой нематодой *M. Incognita* // Доклады академии наук– 2007.– 416, №6. – С.826–829.
2. Герасимова И.Г., Придворова С.М., Озерецковская О.Л. Участие фенилаланинаммиак-лиазы в индуцированной устойчивости и восприимчивости картофеля // Прикл. биохим. и микробиол. – 2005.– 41, №1. – С.117–120.
3. Gayoso et al.: The Ve-mediated resistance response of the tomato to *Verticillium dahliae* involves H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, peroxidase and lignins and drives PAL gene expression. BMC Plant Biology 2010 10:232.
4. Murashige, T., Skoog, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco cultures // Physiologia Plantarum, 1962, – Vol.15, – № 3: 473–497.
5. Присяжненко О.К., Николайчик Е.А., Евтушенко А.Н. Экспрессия гена харпина HRPN *Erwinia caratovora* subsp. *atroseptica* в растениях табака индуцирует гены устойчивости// Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51. № 5. Р. 85.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТОГЕННЫХ И АНТИОКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ АСПАЛАТУСА ЛИНЕЙНОГО (*ASPALATHUS LINEARIS*) НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИНТЕНСИВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

**А. Ю. Игнацкая**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*ihnatskaya.anastasiya@gmail.com;*

*науч. рук. – О. И. Губич, канд. биол. наук, доц.*

В работе изучено влияние отвара аспалатуса линейного (*Aspalathus linearis*), на показатели углеводного обмена и уровень ТБК-активных продуктов у лабораторных мышей, подвергнутых интенсивной физической нагрузке. Установлен выраженный антиоксидантный эффект отвара аспалатуса, оказываемый благодаря содержанию в его составе биофлавоноидов, аскорбиновой кислоты и ненасыщенных жирных кислот. Продемонстрирован адаптогенный эффект отвара аспалатуса линейного, сопоставимый с действием кофеин-содержащего энергетического напитка «Drive Me Apple Blast», использованного нами в качестве препарата сравнения.

**Ключевые слова:** аспалатус линейный; адаптоген; антиоксидант; энергетический напиток; физическая нагрузка.

## ВВЕДЕНИЕ

Аспалатус линейный (*Aspalathus linearis*) – растение семейства бобовых (*Fabacea*), в составе которого обнаружены фенольные соединения (уникальные дигидрохальконы аспалатин и нотофагин, флавоны, флавонолы), аскорбиновая кислота и ненасыщенные жирные кислоты, которые проявляют антиоксидантный эффект. Благодаря аспалатину отвары данного растения благоприятно влияют на работу сердечно-сосудистой системы, нормализуют артериальное давление. Кроме того, аспалатин снижает инсулинорезистентность у пациентов с сахарным диабетом и поддерживает нормальный уровень глюкозы в крови [1,3,6].

Целью данной работы явилось исследование влияния отвара аспалатуса линейного (*Aspalathus linearis*) на показатели углеводного обмена в условиях повышенной физической нагрузки, а также проведение анализа его антиоксидантной и адаптогенной активности в указанной модели.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на беспородных белых мышах самцах массой 50-70 г, находящихся на стандартной диете вивария БГУ. Все

эксперименты были проведены в соответствии с этическими нормами обращения с лабораторными животными. В работе использовали листья аспалатуса линейного, отвар которых (50 мг листьев/200 мл воды) вводили животным в максимально эффективной экспериментально подобранной дозе 2 мл/кг однократно перорально перед началом экспериментальной нагрузки, представлявшей собой 10-минутное плавание в воде комнатной температуры (24,5 °С) [2, 3]. В качестве препарата сравнения использовали энергетический напиток «Drive Me Apple Blast», который вводили лабораторным мышам однократно перорально в экспериментально подобранной максимально эффективной дозе 2 мл/кг за 15 минут до начала эксперимента [4]. Количественное определение пирувата проводили методом Умбрайта, содержание глюкозы глюкозооксидазным методом, содержание ТБК-активных продуктов в гомогенате печени – спектрофотометрически, как описано в [5]. Для статистических расчетов использовали лицензионный пакет программ Stadia 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первый этап нашей работы был посвящён оценке влияния избыточной физической нагрузки на анализируемые показатели интактных мышей. Нагрузка приводила к наступлению состояния утомления, выразившегося в неспособности мышей совершать дальнейшие активные плавательные действия, что сопровождалось снижением содержания пирувата (на 13,2% к контролю), почти полным исчерпанием глюкозы в крови (-73,9% к контролю) и увеличением содержания ТБК-активных продуктов (+79% к контролю) (табл.1).

Таблица 1

**Влияние интенсивной физической нагрузки на параметры углеводного обмена в крови и уровень ТБК - активных продуктов в печени лабораторных мышей**

Серия эксперимента	Содержание ПВК, мг/мл	Концентрация глюкозы, ммоль/л	Содержание ТБК-активных продуктов в гомогенате печени, мкмоль/г
Интактные мыши	0,53 ± 0,02 (100 %)	50,52 ± 0,37 (100 %)	0,42 ± 0,07 (100 %)
Мыши, подвергнутые физической нагрузке	0,46 ± 0,01 (86,8 %)*	13,21 ± 0,03 (26,1 %)*	0,75 ± 0,12 (179 %)*

Примечание. \* – Результаты достоверны при  $p \leq 0,05$  (n=5 для каждой серии).

Однократное пероральное введение интактным мышам отвара аспалатуса линейного приводило к снижению концентрации глюкозы и содержания пирувата (-33,2% к контролю) за счет повышения двигательной активности животных. Достоверное снижение содержания ТБК-активных продуктов (-14,2% к контролю) в данной серии эксперимента свидетельствует о проявлении антиоксидантных свойств аспалатуса линейного (данные не приводятся).

Анализ влияния анализируемого отвара энергетика на исследуемые показатели перед интенсивной физической нагрузкой показал менее выраженное снижение концентрации глюкозы (на 11,3% к соответствующему контролю) и накопления пирувата (на 43,4%) в крови, а также уменьшение содержания ТБК-активных продуктов в печени мышей (-104,3% к контролю) по сравнению с животными, не получившими отвар аспалатуса линейного (табл. 2). Примечательно, что действие изучаемого отвара оказалось сопоставимым с таковым, характерным для кофеин-содержащего, обогащенного аскорбиновой кислотой препарата сравнения.

Таблица 2

**Влияние энергетического напитка «Drive Me Apple Blast» и отвара аспалатуса линейного на показатели углеводного обмена и уровень ТБК-активных продуктов у мышей, подвергнутых интенсивной физической нагрузке**

Серия эксперимента	Содержание ПВК, мг/мл	Концентрация глюкозы, ммоль/л	Содержание ТБК-активных продуктов в гомогенате печени, мкмоль/г
Интактные мыши	0,529 ± 0,02 (100%)	50,521 ± 0,37 (100%)	0,415 ± 0,07 (100%)
Мыши, подвергнутые физической нагрузке	0,457 ± 0,01 (86,8%)*	13,213 ± 0,03 (26,1%)*	0,75 ± 0,115 (179%)*
Энергетик + физическая нагрузка	0,429 ± 0,01 (81,1%)* <sup>a</sup>	33,088 ± 0,15 (65,5%)* <sup>a</sup>	0,368 ± 0,08 (89,2%)* <sup>a</sup>
Отвар аспалатуса + физическая нагрузка	0,227±0,05 (43,4%)* <sup>a</sup>	34,032±0,175 (67,4%)* <sup>a</sup>	0,31±0,06 (74,7%)* <sup>a</sup>

*Примечание.* \*, \*<sup>a</sup> – Результаты достоверны при  $p \leq 0,05$  (n=5 для каждой серии): достоверность влияния физической нагрузки и энергетика «Drive Me Apple Blast» рассчитана по отношению к значениям анализируемых маркеров интактных мышей (\*), а эффектов исследуемого препарата при физической нагрузке – к показателям интактных животных, подвергнутых 15-ти минутному плаванию (\*<sup>a</sup>).

Таким образом, аспалатус линейный обладает как антиоксидантным, так и адаптогенным эффектом и в условиях физической нагрузки обеспечивает адаптацию путем более экономного расходования энергетических субстратов.

#### Библиографические ссылки

1. Булаев, В.М., Ших, Е.В., Сычев, Д.А. Современная фитотерапия / В.М. Булаев, Е.В. Ших, Д.А. Сычев. – М.: Медпресс-информ, 2011. – 148 с.
2. Губич О.И. Биоэнергетика: практикум. – Минск: БГУ, 2016. – 87с.
3. Губич О.И., Игнацкая А.Ю., Станкевич И.В. Изучение адаптогенных и антиоксидантных свойств гиностеммы пятилистной (*Gynostemma pentaphyllum*) и аспалатуса линейного (*Aspalathus linearis*) на экспериментальной модели интенсивной физической нагрузки // Сборник материалов Международной научной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения профессора В. К. Кухты «Современные проблемы медицинской биохимии». – Минск, 25 января 2022 года. – с. 73-77.
4. Зайнуллин, Р.А. Кофе, кофеин и генетика человека / Р.А. Зайнуллин, Р.В. Кунакова, Е.Ю. Егорова // Технологии. – 2015. – №6. – С. 50–54.
5. Кишкун, А.А. Руководство по лабораторным методам диагностики / А.А. Кишкун. – М.: Медицинская книга, 2007. – 774 с.
6. Joubert, E. Rooibos (*Aspalathus linearis*) beyond the farm gate: From herbal tea to potential phytopharmaceutical / E. Joubert, D. de Beer // South African J. Botany. – 2011. – Vol. 77. – P. 869 – 886.



# ВЛИЯНИЕ UV-C НА СТАБИЛЬНОСТЬ ДНК В КЛЕТКАХ ПРОТОНЕМЫ МХА *PHYSCOMITRELLA PATENS*

Д. А. Колзун

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*daryakolzyn@gmail.com*;  
науч. рук. – С.Н. Звонарёв, младший науч. сотрудник

В настоящий момент влияние UV-C на рост и развитие растений мало изучено. UV-C поглощается озоновым слоем в стратосфере, за счет чего количество данного вида излучения, достигающего поверхности Земли чрезвычайно низкое. Тем не менее, в последние десятилетия в результате деятельности человека в атмосферу выбрасываются опасные химические вещества, которые способствуют разрушению озонового слоя. Следовательно, в будущем количество ультрафиолетового излучения может увеличиться в результате разрушения стратосферного озона из-за загрязнения атмосферы. Фактически, сокращение озонового слоя приводит к экологическим проблемам в природных экосистемах и сельскохозяйственном производстве. Таким образом, тенденция к увеличению потока ультрафиолетового излучения на Землю делает необходимым изучение влияния UV-C на растения [1].

Цель данной работы является изучить закономерности повреждения нуклеиновых кислот в клетках мха *Physcomitrella patens* под действием UV-C.

**Ключевые слова:** UV-C, *Physcomitrella patens*, активные формы кислорода, дигидроэтидиум, кометный анализ, однонитевые разрывы ДНК, двунитевые разрывы ДНК.

## ВВЕДЕНИЕ

Ультрафиолетовое излучение является компонентом солнечного спектра, который естественным образом достигает поверхности Земли. В зависимости от длины волны выделяют три диапазона: UV-A (315-390 нм), UV-B (280-315 нм) и UV-C (100-280 нм). Среди них UV-C - это излучение с меньшей длиной волны и наиболее высокой связанной энергией [2]. Известно, что UV-C может инициировать окислительные процессы и генетические мутации в растениях, что, в свою очередь, оказывает сильное негативное воздействие на морфологию растений, цветение, опыление, транспирацию и фотосинтез. Зачастую оно приводит к образованию димеров пиримидина и фотопродуктов, которые обладают способностью блокировать репликацию и транскрипцию ДНК. Эти повреждения устраняются в основном путем эксцизионной репарации, однако незавершенные процессы восстановления генома могут привести к образованию одноцепочечных разрывов ДНК. Двухцепочечные разрывы ДНК также накапливаются в

результате описанных процессов, что сопровождается повреждением хромосом [3].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы установить особенности воздействия UV-C на рост и развитие мха *Physcomitrella patens* были проведены ростовые тесты. Однодневную культуру протонемы мха обрабатывали UV-C в течение 1, 3, 10, 30 и 60 минут. Далее инкубировали чашки Петри на протяжении двух недель в стандартных ростовых условиях.

Для анализа характера изменений уровня АФК двухнедельную культуру протонемы мха обрабатывали UV в течение 3, 10, 30 и 60 минут. Далее генерацию АФК исследовали с использованием флуоресцентного зонда дигидроэтидиума. Дигидроэтидиум при взаимодействии с АФК окисляется до 2-гидроксиэтидиума, который флуоресцирует в зеленой области спектра. Флуоресценцию регистрировали с использованием эпифлуоресцентного микроскопа. Для количественной оценки интенсивности флуоресценции измеряли уровень флуоресценции в области одной клетки протонемы.

Для исследования влияния UV-C на стабильность ДНК был проведен кометный анализ. Однодневную суспензионную культуру обрабатывали UV в течение 10, 30 и 60 минут. Для анализа повреждений ДНК использовался кометный анализ в нейтральных условиях для определения двуцепочечных разрывов и щелочных условиях, для определения однонитевых разрывов.

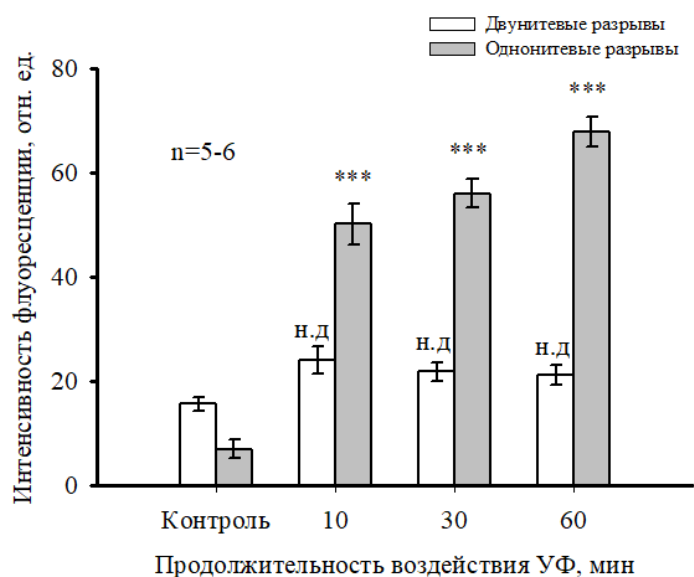
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании влияния UV-C на рост колоний *P. patens* было показано, что обработка UV в течение 1 и 3 минут приводит к незначительным сокращениям роста колоний, в то время как воздействие UV в течение 10 минут ингибирует рост практически в 2,5 раза. Обработка в течение 30 минут приводила к значительным уменьшениям площади колоний, а именно в 9,5 раз. После обработки в течение 60 минут наблюдалось полное отсутствие роста.

Тесты с флуоресцентным зондом ДГЭ показали, что после 10-минутного воздействия UV, в протонемных клетках было зафиксировано статистически значимое увеличение интенсивности флуоресценции в 2 раза, что указывает на генерацию АФК. Было обнаружено увеличение интенсивности флуоресценции после обработки в течение 60 минут в 3 раза. Воздействие UV в течение 3 минут привело

к незначительному увеличению флуоресценции по сравнению с контролем.

В результате кометного анализа были получены следующие данные. Уровень однонитевых разрывов увеличился более чем в 7 раз после воздействия UV в течение 10 минут. Было обнаружено увеличение количества однонитевых разрывов после обработки в течение 30 минут в 8 раз. Воздействие в течение 60 минут приводило к значительному увеличению количества однонитевых разрывов, практически в 10 раз. Уровень двунитевых разрывов, по сравнению с контролем, практически не изменялся (рис.).



Средние значения повреждения ДНК двойными и одноцепочечными разрывами, вызванные обработкой UV в течение 10, 30 и 60 минут ( $\pm$  SE;  $n = 5-6$ ). Для расчета достоверности различий между группами производился анализ ANOVA-теста, где \*\*\* $p < 0,001$ ; \*\* $p < 0,01$ ; \* $p < 0,05$ , н.д.  $> 0,05$

Таким образом, нами было показано: 1) Воздействие UV-C в течение 10 минут приводит к замедлению роста мха *Physcomitrella patens* в 2,5 раза по сравнению с контролем, в течение 30 минут – в 9,5 раз. 60-минутная обработка летальна для данного вида; 2) 10-минутное воздействие UV-C вызывает генерацию АФК в клетках протонемы мха *P. patens*, обработка в течение 60 минут приводит к увеличению количества АФК на 35% по сравнению с контролем; 3) Количество однонитевых разрывов ДНК в клетках протонемы *Physcomitrella patens* после воздействия UV-C в течение 10 минут увеличивается в 7 раз, в течение 30 минут – в 8 раз, в течение 60 минут – в 10 раз по сравнению с контролем. Двунитевые разрывы при этом не образуются.

### Библиографические ссылки

1. UV-C irradiation effects on young tomato plants: Preliminary results / Castronuovo D. Pak. [et al.] // J. Bot. – 2014. – Vol.46. – P. 945–949.
2. Surface characterization of untreated and hydro-thermally pre-treated Turkey oak woods after UV-C irradiation / Todaro L. [et al.] // Surface and Interface Analysis – 2014. – Vol. 47. – P. 206–215.
3. Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest / Urban L. [et al.] // Plant Physiology and Biochemistry – 2016. – Vol. 105. – P. 1–11.

# СОСТОЯНИЕ МАКРОФИТОВ В ОЗЕРАХ НАРОЧЬ И МЯСТРО НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ЭКОСИСТЕМЫ НАРОЧАНСКИХ ОЗЕР

Д. В. Крюк

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*KrukDV@bsu.by;*

*Науч. рук. – А. А. Жукова, канд. биол. наук, доц.*

Аннотация. Макрофиты – элемент водной экосистемы, участвующий в формировании её свойств. Видовое богатство макрофитного звена в Нарочанских озёрах подробно изучается с середины прошлого века и с тех пор оно не изменилось, однако в озере Нарочь изменились преобладающие виды макрофитов. Наиболее распространёнными в озере Нарочь являются водоросли, относящиеся к родам *Chara*, *Potamogeton*, *Elodea*. В озере Мястро больше всего распространена *Elodea canadensis*. Так же многочисленны харовые водоросли. В озере Баторино наблюдаются достаточно обширные пояса растений с плавающими листьями. Наиболее многочисленными погружёнными макрофитами являются рдесты. Во всех трёх озёрах увеличилась глубина распространения макрофитов из-за увеличения показателя прозрачности в озёрах, что связано со снижением уровня трофности Нарочанских озёр.

**Ключевые слова:** Нарочь, Мястро, Баторино, макрофиты.

## ВВЕДЕНИЕ

Знание структуры макрофитного пояса водоёмов совершенно необходимо для точного описания состояния экосистемы. Являясь первичными продуцентами, они вносят значительный вклад в первичную продукцию водоёма. Биомасса макрофитов включается в энергетические потоки и служит кормовой базой для гидробионтов-фитофагов. Многие водные растения выступают в роли накопителей азота и фосфора. Кроме того, макрофиты являются субстратом для прикрепления и развития перифитона, моллюсков и их заросли служат убежищем для активно перемещающихся позвоночных и беспозвоночных животных. Области произрастания погруженных макрофитов обеспечивают разделение подводного придонного пространства на зоны с разным видовым составом и экологическими особенностями. Однако, не все макрофиты одинаково активно разлагаются, поедаются и заселяются. С повышением разнообразия состава макрофитов и площадей зарослей возрастает также и разнообразие фауны водоёма [1].

Наши исследования макрофитного сообщества проводились на трёх крупнейших Нарочанских озёрах Нарочь, Мястро и Баторино. Нарочанские озёра расположены на территории Национального парка «Нарочанский» в северо-западной части Республики Беларусь.

Впервые подробные исследования макрофитов в Нарочанских озёрах были проведены в 1959 г. Г.Ф. Захаренковой [2]. Далее в 1968–1978 гг. регулярный мониторинг макрофитного звена осуществлялся сотрудниками НИЛ озераведения БГУ [3]. Последняя полная подводная съёмка проведена коллективом НИЛ гидроэкологии БГУ в 2016–2017 гг.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

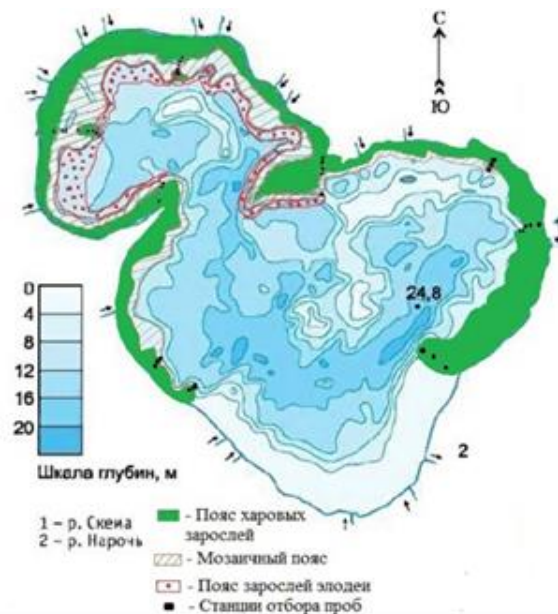
В 2016-2017 гг. отбор проб проводился дайверами вручную с использованием квадратной рамки площадью 0,25 м<sup>2</sup>. Рамка укладывалась на дно, после чего из нее изымались все макрофиты до «оголения» грунта. Затем в отдельный мешок бралась проба грунта. При этом в GPS-навигатор заносились координаты станций отбора проб.

Параллельно с отбором проб осуществлялась видеосъёмка. Дайверы с видеокамерой продвигались в придонном слое по заранее намеченному маршруту. Дайверы были оснащены приборами, отображающими время, текущую глубину и температуру воды. Приборы вели непрерывную запись этих показателей. Периодически дисплей прибора помещали в объектив видеокамеры для более удобного отслеживания положения дайверов по видеозаписи, а также для определения глубины той или иной станции отбора проб. Впоследствии эта информация передавалась на специальное ПО «Suunto DM5», снимающее данные с прибора и представляющую их в виде графика. Анализ данных графиков позволил уточнить глубину, на которой находилась станция.

Далее при помощи данных GPS, временным показателям и материалам видеосъёмки на батиметрическую карту озера были нанесены преобладающие растительные ассоциации.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

После анализа полученных данных, мы нанесли обследованные точки на карту с обозначением преобладающей растительной ассоциации. Далее мы экстраполировали результаты чтобы получить карту зарастания озера Нарочь. Полученную карту можно увидеть на рисунке.



#### Пояса макрофитов, нанесённые на батиметрическую карту озера Нарочь

Для структуры макрофитного сообщества озера Нарочь характерна относительно малая площадь зарастания береговой линии надводной растительностью. Растения с плавающими листьями образуют лишь малые скопления, в отличие от других озёр Нарочанской группы. Погружённая растительность на мелководье образует харовый пояс. Мелководная зона в озере Нарочь очень обширная, поэтому харовый пояс достаточно широкий. На больших глубинах растительность образует мозаичный пояс с участками зарастания элодеей. Наиболее распространёнными являются макрофиты родов *Chara*, *Potamogeton*, *Elodea*. Также в озере Нарочь отмечено увеличение глубины произрастания макрофитов. Так по литературным данным в 80-х годах прошлого века граница распространения погружённых макрофитов находилась на глубине 7,5 м [2], в то время как во время съёмки, проводившейся в 2016 г. Макрофиты обнаруживались на глубине 7,5 м.

В озере Мястро треть береговой линии покрыта надводной растительностью. Доминирует камыш, часто в ассоциациях с тростником. Растения с плавающими листьями образуют достаточно крупные участки в местах с сильно заиленным грунтом. Погружённая растительность образует участки зарослей хары на северном берегу и участки зарослей элодеи на южном. Больше всего распространена *Elodea canadensis*. Так же многочисленны харовые водоросли.

В озере Баторино наблюдаются достаточно обширные пояса растений с плавающими листьями. Наиболее многочисленными погружёнными макрофитами являются рдесты.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Несмотря на то, что озёра Нарочь, Мястро и Баторино расположены рядом друг с другом и образуют единую систему озёр, сообщества макрофитов в них сильно различаются. Такое различие объясняется разным трофическим статусом озёр. Озеро Нарочь мезотрофное с признаками олиготрофии, Мястро – мезотрофное, Баторино – гиперэвтрофное. Доминирующие группы макрофитов обнаруженные в озёрах соответствуют трофическому статусу в каждом из них. Глубина распространения макрофитов в озере Нарочь выросла, что, вероятно, связано с ростом показателя прозрачности.

### **Библиографические ссылки**

1. Жукова А.А., Жукова Т.В., Макаревич О.А., Остапеня А.П. Роль полупогруженных макрофитов в функционировании Нарочанских озёр // Экология биосистем: проблемы изучения, индикации и прогнозирования: Мат. II Междунар. науч.-практ. конф., – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2009. – С. 295-299.
2. Бюллетень экологического состояния озёр Нарочь, Мястро, Баторино (2015 год) / Т.В. Жукова и др.; под ред. Т.М. Михеевой. – Минск, БГУ. – 2016. – 113 с.
3. Экологическая система Нарочанских озёр / Под ред. Г.Г.Винберга. – Минск, Изд-во Университетское, 1985 с.



# ДИАГНОСТИКА ИЗМЕНЕННЫХ ФОРМ МИКОБАКТЕРИЙ ТУБЕРКУЛЕЗА МЕТОДОМ ПОЛИМЕРАЗНОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

М. В. Кучвальский, Е. И. Якобсон

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
kuchvalskimv@gmail.com, bio.yakobsonEI@bsu.by;  
науч. рук. – А.П. Лысенко, д-р вет. наук, проф.*

Туберкулез до сих пор является опаснейшим заболеванием для человечества. Четверть населения Земли инфицированы микобактериями туберкулеза без явных признаков заболевания. Агентом латентной туберкулезной инфекции являются измененные формы микобактерий. Их диагностика остается актуальной задачей. Для выполнения данной работы смоделирована трансформация микобактерий туберкулеза из типичных в измененные формы. Впервые сравнена чувствительность полимеразной цепной реакции для упомянутых форм микобактерий. Показано, что сорбционные методы выделения ДНК работают менее эффективно с измененными формами микобактерий туберкулеза, чем с типичными. Также при работе с измененными формами выявлены обрывы синтеза цепи ДНК и менее интенсивная ультрафиолетовая люминисценция ампликонов в агарозном геле с бромистым этидием. Для однозначной детекции этих форм микобактерий необходимо использовать метод полимеразной цепной реакции в режиме реального времени с праймерами к относительно (до 200 пар нуклеотидов) коротким локусам, специфичным для рода *Mycobacterium*.

**Ключевые слова:** микобактерии туберкулеза, измененные формы микобактерий; дефектная клеточная стенка; полимеразная цепная реакция.

## ВВЕДЕНИЕ

Микобактерии туберкулеза (МБТ) при воздействии стрессовых факторов окружающей среды образуют непатогенные формы с дефектной клеточной стенкой [1, 2]. Они «избегают» иммунного ответа хозяина, персистируют внутри организма и могут ревертировать в патогенные микобактерии (типичные формы), вызывая активную форму туберкулеза у человека или крупного рогатого скота [3, 4]. Измененные формы трудно обнаружить традиционными методами диагностики микобактерий [5]. Маркером латентной туберкулезной инфекции служат измененные формы микобактерий, выделяемые из биологических образцов на специальных питательных средах [6].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали штаммы *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv и *Mycobacterium bovis* 8 из коллекции РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С.Н. Вышелесского». 1 мг бактериальной массы каждого штамма суспендировали в пробирках типа «Эппендорф» по 1 мл с опытным раствором агента, вызывающего трансформацию МБТ, и поместили в термостат при 37 °С. Через 2 суток суспензии посеяли на специальную питательную среду МусСел DW. В результате микобактерии трансформировались в измененные формы.

Для выделения ДНК использовали наборы: Instagene™ (Bio-Rad, США), ДНК-ВК (Институт биоорганической химии НАН Беларуси), РИБО-преп (AmpliSens®, РФ) и РИБО-сорб (AmpliSens®, РФ). Концентрацию выделенной ДНК определяли на Implen Nanophotometer P-Class. ПЦР проводили с праймерами к локусам, специфичным для рода *Mycobacterium* (условия проведения реакции приведены в таблице 1).

Таблица 1

Условия проведения полимеразной цепной реакции

Температура и время этапа (в минутах)	Локусы		
	ген 16S рРНК (1020 п.н.)		IS6110 (71 п.н.), gyrB (137 п.н.)
Первичная денатурация	94 °С 5:00	-	95 °С 10:00
Денатурация	94 °С 0:30	94 °С 0:30	94 °С 0:30
Отжиг	55 °С 0:30	68 °С 0:30	-
Элонгация	68 °С 0:30	72 °С 0:30	54 °С 1:30
Финальная элонгация	-	72 °С 10:00	98 °С 10:00
Циклы	1–10	11–40	40
Праймеры: прямой, обратный	TGCACACAGGCCACAAGGGA GAGAGTTTGATCCCTGGCTCAG		IS6110: GGCGTACTCGACCTGAAAGA CTGAACCGGATCGATGTGTA gyrB: AAGGACCGCAAGCTACTGAA GTGTTGCCCAACTTGGTCTT

Электрофорез проводили в 1,7% агарозном геле с использованием буфера составом (приведен 50-кратный концентрат): 2 М трис-

гидроксиметиламинометан, 1,56 М СН<sub>3</sub>СООН, 0,05 М этилендиаминтетрауксусная кислота, вода, рН 8,4.

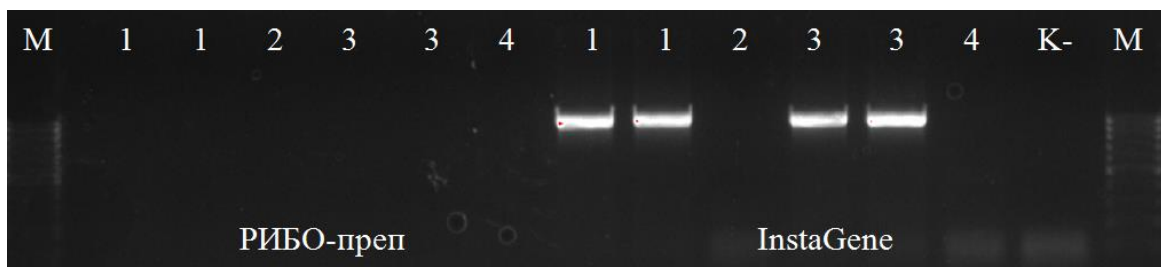
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сорбционная экстракция оказалась менее эффективной для выделения ДНК измененных форм МБТ (таблица 2, рисунок).

Таблица 2

### Измерение концентрации выделенной ДНК на Implen Nanophotometer P-Class

Исследуемый штамм, набор для выделения	Концентрация ДНК, нг/мл	A260/A280	A260/A230
<i>M. tuberculosis</i> бациллярный, РИБО-сорб	81,5	1,495	0,399
<i>M. tuberculosis</i> CWD, РИБО-сорб	9,0	1,800	0,514
<i>M. bovis</i> бациллярный, РИБО-сорб	36,0	1,200	0,145
<i>M. bovis</i> CWD, РИБО-сорб	10,5	1,050	1,105
<i>M. tuberculosis</i> бациллярный, InstaGene	78,0	0,609	0,131
<i>M. tuberculosis</i> CWD, InstaGene	67,0	1,252	0,453
<i>M. bovis</i> бациллярный, InstaGene	71,0	0,664	0,141
<i>M. bovis</i> CWD, InstaGene	77,5	1,325	0,464



Результаты электрофореза ампликонов ПЦР с праймерами к локусу 16S РНК  
 Номера проб: 1 – *M. tuberculosis* бациллярный, 2 – *M. tuberculosis* CWD, 3 –  
*M. bovis* бациллярный, 4 – *M. bovis* CWD, К- – отрицательный контроль. В  
 крайние лунки добавлен маркер молекулярного веса М100 (Праймтех). ДНК для  
 амплификации выделяли наборами:

РИБО-сорб (левая половина геля), InstaGene (правая половина геля)

ПЦР-диагностика с использованием праймеров к коротким локусам позволила обнаружить измененные формы МБТ (таблица 3).

Вместе с тем, ПЦР-диагностика микобактерий может быть затруднена в результате их трансформирования. В частности, результаты ПЦР с использованием праймеров к длинным участкам ДНК неоднозначны и требуют дальнейших исследований. Вероятно, что есть связь между трансформацией и структурой матрицы ДНК. Наши

исследования показывают, что наиболее вероятен обрыв синтеза цепи ДНК.

Таблица 3

**Пороги циклов амплификации в ПЦР в режиме реального времени**

Проба	Локусы	
	<i>IS6110</i>	<i>gyrB</i>
<i>M. tuberculosis</i> бациллярный	31	30,54
<i>M. tuberculosis</i> CWD	32,29	32,99
<i>M. bovis</i> бациллярный	18,46	18,89
<i>M. bovis</i> CWD	30	30,02
отрицательный контроль	не обнаружено	не обнаружено

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

- 1) при выделении ДНК измененных форм микобактерий методы сорбционной экстракции показывают низкую эффективность;
- 2) при ПЦР-диагностике измененных форм микобактерий туберкулеза наилучший выход продукта происходит при использовании праймеров к коротким целевым участкам ДНК (*IS6110*, *gyrB*).

**Библиографические ссылки**

1. Микобактерии туберкулеза при термическом воздействии образуют защитные формы, проходящие через ультрафильтры и восстанавливающие жизнеспособность в виде CWD форм / *А.П. Лысенко* [и др.] // Эпизоотология, иммунобиология, фармакология, санитария. 2019. Т. 1. № 1. С. 33–45.
2. Микобактерии туберкулеза после летального воздействия дезинфектантов могут восстанавливать жизнеспособность в виде микобактерий с дефектной клеточной стенкой / *А.Э. Высоцкий* [и др.] // Эпизоотология, иммунобиология, фармакология, санитария. 2019. № 2. С. 26–35.
3. Возможная роль туберкулезной инфекции в возникновении опухолей / *А.П. Лысенко* [и др.] // Экология и животный мир. 2020. № 1. С. 53–69.
4. Трансплацентарная передача туберкулезной инфекции у коров, зараженных *Mycobacterium bovis* / *А.П. Лысенко* [и др.] // Эпизоотология, иммунобиология, фармакология, санитария. 2021. № 2. С. 18–25.
5. Феномен изменчивости микобактерий туберкулеза и его использование для обнаружения туберкулезной инфекции / *А.П. Лысенко* [и др.] // Туберкулез – глобальная катастрофа человечества: материалы I Международной заочной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24 марта 2014 г. / РостГМУ; редкол.: Т.Н. Ильин (отв. ред.) [и др.]. Ростов-на-Дону, 2014. С. 176–198.
6. *Кучвальский, М.В.* Микобактерии туберкулеза образуют некислотоустойчивые формы на упрощенных питательных средах при стимуляции роста // 78-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета: материалы конф., Минск, 10–21 мая 2021 г.: в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2021. Ч. 1. С. 258–262.

# ВЛИЯНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА СОСТОЯНИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА СТУДЕНТОВ

**А. А. Оковицкая**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*angelina.okovitskaya@mail.ru;*

*науч. рук. – К. М. Люзина, канд. биол. наук, доц.*

Ценность цветового и периферического поля зрения заключается в обнаружении опасности в различных участках пространства, не находящихся прямо перед человеком. Однако человек регулярно «нагружает» свой зрительный анализатор, используя экраны разных устройств во время работы и отдыха. В публикации приводятся результаты исследования состояния полей зрения на белый и монохроматические цвета у студентов, с экранным временем более и менее 4 часов в сутки, а также результаты цветоощущения. Проанализированы характерные особенности различий в ширине поля зрения между правым и левым глазом. По итогам проведенной периметрии в нашей выборке не было выявлено влияния экранного времени на границы полей зрения. По результатам исследования цветоощущения по полихроматическим таблицам Рабкина, нарушения были выявлены у 7 добровольцев из 11.

**Ключевые слова:** периметрия, поле зрения, цветовое зрение, таблицы Рабкина.

Отличительной особенностью зрительного анализатора человека является способность различать множество цветов и их оттенков благодаря наличию фоторецепторов. Существует два вида зрительного восприятия – центральное и периферическое.

Цель работы – оценка возможности потери периферического зрения и цветового восприятия у студентов, экранное время которых составляло более 4 часов в сутки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании участвовало 11 студентов женского пола в возрасте от 19 до 22 лет. Из них 5 участников с остротой зрения OD/OS=1,0; у 6 студентов миопия. Студенты с миопией проходили исследование в очках/линзах при условии 100% коррекции. Добровольцы были разделены на группы – экранное время более 4 часов в сутки (опытная), менее 4 часов в сутки (контрольная). При проведении периметрии для определения полей зрения использовали настольный периметр Форстера. Для выявления и проявления аномалий в способности различать цвета использовали полихроматические таблицы Рабкина.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенной периметрии было установлено, что в нашей выборке экранное время не влияло на границы полей зрения, поскольку сужение на белый цвет на фоне черного периметра было отмечено для правого и левого глаза как в контрольной, так и в исследуемой группе (таблицы 1, 2, результаты в градусах).

Таблица 1

### Результат периметрии с экранным временем более 4 часов в сутки

Отклонения от нормы OD								
цвет	Верхнее	Верхнее диагональное латеральное	Латеральное	Нижнее диагональное латеральное	Нижнее	Нижнее диагональное медиадальное	Медиадальное	Верхнее диагональное медиадальное
ч/белый	3±6	1±10	-8±7	4±12	-4±7	2±7	9±7	-5±5
красный	9±8	26±7	28±5	15±18	9±14	9±16	4±13	18±8
синий	5±8	16±10	9±7	10±14	3±8	13±9	6±8	14±7
зеленый	25±12	30±10	42±11	40±18	33±16	18±16	26±13	20±9
желтый	20±12	19±13	-1±8	-5±17	-9±16	1±13	19±11	13±13
Отклонения от нормы OS								
цвет	Верхнее	Верхнее диагональное медиадальное	Медиадальное	Нижнее диагональное медиадальное	Нижнее	Нижнее диагональное латеральное	Латеральное	Верхнее диагональное латеральное
ч/белый	1±8	-4±6	8±5	4±6	-4±8	6±4	-10±3	8±11
красный	5±13	24±14	4±8	13±12	7±13	15±17	18±14	11±8
синий	1±7	17±8	5±14	14±7	3±11	15±12	1±7	14±8
зеленый	11±9	23±17	14±12	28±8	19±14	41±16	33±13	22±12
желтый	16±14	24±10	12±11	6±12	-5±12	1±7	-9±17	-2±13

Таблица 2

### Результат периметрии с экранным временем менее 4 часов в сутки

Отклонения от нормы OD								
цвет	Верхнее	Верхнее диагональное латеральное	Латеральное	Нижнее диагональное латеральное	Нижнее	Нижнее диагональное медиадальное	Медиадальное	Верхнее диагональное медиадальное
ч/белый	-3±6	-5±5	-10±10	9±7	-8±3	5±5	5±5	0±3
красный	5±15	13±3	22±8	15±3	5±3	0±10	3±8	15±9
синий	-2±15	10±5	8±8	9±9	14±9	13±3	-2±6	13±12
зеленый	15±5	32±10	36±12	38±4	24±12	28±12	20±9	24±13
желтый	13±10	15±10	-2±8	-10±9	-5±15	0±5	16±5	12±10
Отклонения от нормы OS								
цвет	Верхнее	Верхнее диагональное медиадальное	Медиадальное	Нижнее диагональное медиадальное	Нижнее	Нижнее диагональное латеральное	Латеральное	Верхнее диагональное латеральное
ч/белый	-3±8	-4±6	2±3	7±6	-7±3	7±6	-13±6	7±6
красный	3±15	17±5	5±10	3±15	4±15	11±21	22±3	10±10
синий	-2±10	16±5	7±8	8±6	8±6	21±8	2±3	12±6
зеленый	11±10	19±3	18±8	31±4	18±10	37±15	30±10	22±6
желтый	15±10	12±12	14±4	-6±15	-10±22	-15±26	-7±18	-8±6

Изучение действия монохроматических раздражителей показало, что границы полей зрения для зелёного и красного цвета увеличены как в контрольной, так и в исследуемой группе. Проведение периметрии по синему цвету в контрольной группе показало, что наблюдается незначительное сужение тестируемой величины. Среднее отклонение от

нормы составило -2 градуса. Аналогичные изменения были выявлены при использовании желтой метки – сужение полей зрения выявлены как в контрольной, так и в исследуемой группе. Среднее отклонение от нормы составило -7 градусов. Сужение для монохроматических маркеров позволяет предположить, что различные элементы световоспринимающего аппарата сетчатки обладают неодинаковой устойчивостью к воздействию излучения дисплеев [1, с.100].

Что касается различий между правым и левым глазом, то в контрольной группе наблюдается асимметрия по черно-белому, зеленому и желтому цвету в верхнем диагональном латеральном направлении. При определении синего объекта левым глазом в медиальном и нижнем диагональном медиальном направлении поле зрения больше, при определении красного цвета по всем направлениям поле зрения принципиально не отличается для левого и правого глаза [2].

Среди испытуемых было отмечено ошибочное восприятие оппонентных и неоппонентных цветов (рис. 1). В частности, наибольшее количество ошибок в определении оппонентных цветов относится к красно-зеленому раздражителю, как видно на графике, ошибки встречались у 8 студентов из 11 для правого глаза; среди неоппонентных цветов можно отметить желто-зеленый раздражитель, ошибки в восприятии которого встречались у 10 человек из 11, но уже для левого глаза.

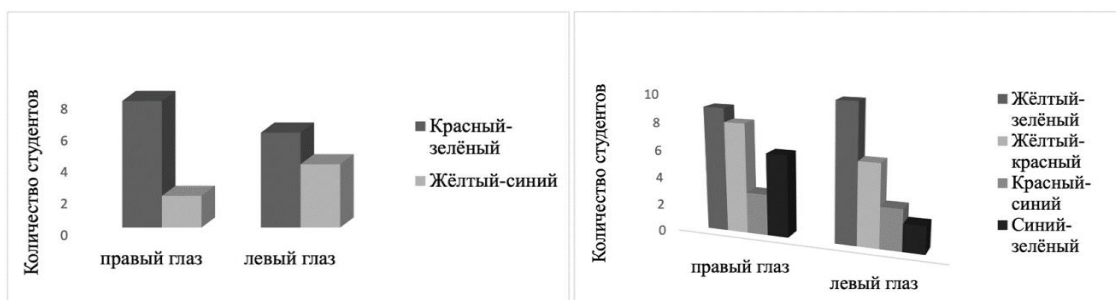


Рис. 1. Ошибочное восприятие оппонентных (слева) и неоппонентных цветов (справа)

Полученные данные можно объяснить следующим образом: ошибочное восприятие красного-зеленого и желтого-синего связано с оппонентными процессами цветоразличения. Механизм цветовосприятия таков, что каждая пара способна вызвать только одно из двух возможных ощущений, то есть желтый антагонистичен синему, а красный – зеленому.

Как упоминалось выше, исследование цветоразличительной функции зрительного анализатора проводили с помощью полихроматических таблиц для исследования цветоощущения Рабкина. Нарушения цветоощущения приобретенного характера были выявлены у 7 добровольцев из 11 (рис. 2). Ошибки встречались от 1 до 3 случаев из 15

картинок по всей выборке. В большинстве случаев это были ошибки при просмотре таблиц с желтым фоном и зеленым элементом внутри, а также с зеленым фоном и красным элементом внутри. Стоит отметить, что аналогичные нарушения цветоощущения преимущественно встречались на периметрии по оппонентным и неоппонентным цветам. Лишь 4 студента можно отнести к нормальным трихроматам, так как правильно определили все геометрические фигуры и цифры. Среди испытуемых тританопов не обнаружено. Следует подчеркнуть, что у троих студентов из группы нормальных трихроматов экранное время составляло менее 4 часов в сутки.

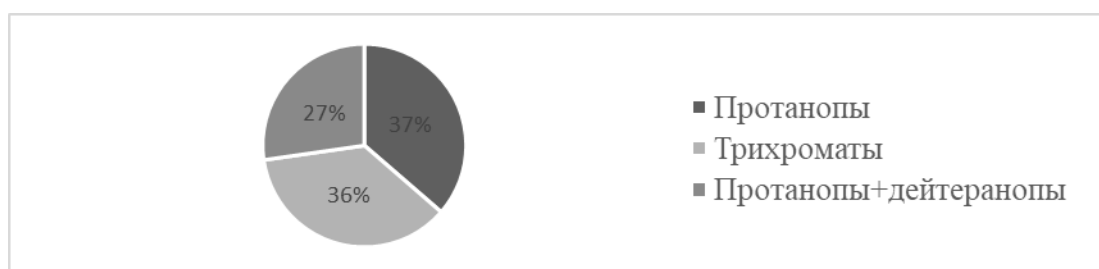


Рис. 2. Количество студентов (%) с признаками протанопии, дейтеранопии + протанопии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам периметрии в нашей выборке не наблюдалось влияния экранного времени на границы полей зрения. Отмечено сужение на белый цвет на фоне черного периметра для правого и левого глаза как в контрольной, так и в исследуемой группе. Также встречалась асимметрия по всем цветам для левого и правого глаза. Среди испытуемых было отмечено ошибочное восприятие оппонентных и неоппонентных цветов. В частности, наибольшее количество ошибок в определении оппонентного цвета относится к красно-зеленому раздражителю; среди неоппонентных цветов можно отметить желто-зеленый раздражитель. Были выявлены аномалии в способности различать цвета: лишь 4 студента можно отнести к нормальным трихроматам, у остальных испытуемых наблюдаются признаки протанопии и дейтеранопии.

### Библиографические ссылки

1. Дмитриева А. А., Дмитриев Е. В., Сгибнев Ю. Ю., Логачева Е. О., Авдеев Р. В. Оценка периферического зрения у активных пользователей компьютера // Медицинский вестник Башкортостана. 2015. Т. 10, № 2. С. 97-100.
2. Романова А. Н., Наумова А. А., Наумова Т. А. Определение поля зрения в зависимости от пола и возраста // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. 2016. № 6 (24). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3259>.



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ В КЛЕТКАХ БАКТЕРИЙ *ESCHERICHIA COLI* ФЬЮЖН-БЕЛКОВ SUMO-DADB И SUMO-DADBHis, ВКЛЮЧАЮЩИХ ГЛАВНЫЕ АНТИГЕННЫЕ ДОМЕНЫ ГЛИКОПРОТЕИНА E2 ВИРУСА ДИАРЕИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА 2-ГО ТИПА

О. В. Пластинина

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*oksana02plastinina@gmail.com*;

науч. рук. – Н. В. Сауткина, ст. преп.

Заболевание, вызываемое вирусом диареи крупного рогатого скота (BVDV), приносит значительные экономические убытки во многих странах. Гликопротеин E2 липидной оболочки вируса, а именно его первые два антигенных домена А и В могут выступать в качестве субъединицы для создания рекомбинантной вакцины. Однако экспрессия генов, кодирующих полноразмерный вариант белка E2 и усеченный, содержащий первые два домена, в бактериальных клетках *E. coli* сопровождается образованием нерастворимых телец включения.

Целью данной работы являлась индукция экспрессии гибридных генов SUMO-DADB и SUMO-DADBHis, состоящих из генов, кодирующих главные антигенные домены А и В гликопротеина E2 BVDV 2-ого типа, объединенных с геном белка малого убиквитин-подобного модификатора дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. В результате индукции экспрессии гибридных генов SUMO-DADB, SUMO-DADBHis в клетках штамма *E. coli* BL21 (DE3) при температурах культивирования 37 °С и 20 °С выявили целевые белки, также синтезирующиеся в нерастворимой форме.

**Ключевые слова:** BVDV; гликопротеин E2; домены А и В; рекомбинантные белки; фьюжен-белки; SUMO.

Группа вирусов BVDV (Bovine Viral Diarrhoea Virus), принадлежащая к роду *Pestivirus* семейства *Flaviviridae*, является одной из преобладающих причин заболеваемости крупного рогатого скота, ведущей к значительным экономическим убыткам ряда стран, включающих и Республику Беларусь.

Инактивированные и модифицированные живые вакцины, используемые в настоящее время для защиты крупного рогатого скота от инфекции BVDV, имеют недостатки, связанные со сложностью получения достаточных объемов и возможностью развития внутриутробной инфекции и иммуносупрессии. В связи с этим, существует необходимость разработки эффективных и безопасных препаратов нового поколения и, например, использование субъединичных вакцин, безопасных с точки зрения горизонтальной и вертикальной передачи.

Вирион вируса BVDV представляет собой нуклеокапсид, в котором заключен одноцепочечный РНК-геном. Основным гликопротеином

липидной оболочки является белок E2, который можно рассматривать как основу для создания субъединичной вакцины, т.к. именно на гликопротеин E2 направлено действие нейтрализующих антител зараженных животных.

В связи с тем, что за связывание вируса с мембраной клетки и проникновение в неё, согласно литературным источникам [1], отвечают первые два домена А и В гликопротеина E2, в качестве субъединичной вакцины можно рассматривать усеченный вариант белка E2, содержащий только эти домены.

Ранее мы уже клонировали в клетках *E. coli* гены *DADB* и *DADBHis*, кодирующие домены А и В гликопротеина E2, в составе вектора pET-24b(+) (Novagen), а также экспрессировали их в клетках штамма *E. coli* BL21-Gold(DE3), и в результате установили, что белки, названные соответственно *DADB* и *DADBHis*, экспрессируются в нерастворимой форме [2].

Одним из возможных вариантов получения в клетках бактерий *E. coli* растворимых и правильно свернутых белков является использование технологии слияния генов и получения фьюжн-белков, в которых фьюжн-партнёром может выступать, например, белок малый убиквитин-подобный модификатор (small ubiquitin-related modifier, SUMO) дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, стабилизирующий и повышающий растворимость фьюжн-белков [3].

Целью данной работы являлось определение растворимости гибридных белков SUMO-*DADB* и SUMO-*DADBHis*, состоящих из главных антигенных доменов А и В гликопротеина E2 BVDV 2-ого типа, объединенных с белком малым убиквитин-подобным модификатором.

Изначально гибридные гены *SUMO-DADB* и *SUMO-DADBHis* клонировали в клетках штамма бактерий *E. coli* XL1-Blue [4].

На следующем этапе работы клетки штамма *E. coli* BL21 (DE3) трансформировали плазмидами pSUMO-*DADB* и pSUMO-*DADBHis*. Индукцию экспрессии генов в клетках клонов проводили в течение 4 ч при 37 °С с добавлением ИПТГ (изопропил- $\beta$ -D-тиогактопиранозид) в конечной концентрации 0,5 ммоль/л. В качестве отрицательных контролей использовали культуры каждого клона, к которым не добавляли индуктор. Также в качестве отрицательного контроля использовали индуцированный ИПТГ штамм *E. coli* BL21(DE3), содержащий плазмиду pET-24b(+) без вставки. В результате выявили наличие целевых белков SUMO-*DADB* и SUMO-*DADBHis* массой 33,8 кДа и 34,6 кД соответственно (данные не представлены).

Далее определяли в растворимой или нерастворимой клеточной фракции синтезируются целевые белки. Для этого проводили индукцию

экспрессии генов при температурах 37 °С и 20 °С в течение 4 ч с добавлением ИПТГ в конечной концентрации 0,5 ммоль/л. Затем клетки бактерий осаждали центрифугированием и разрушали с использованием реагента B-PER Bacterial Protein Extraction Reagent (Thermo Fisher Scientific Inc.) согласно инструкции производителя. Рисунки 1 и 2 отображают результаты электрофоретического анализа белков клеточных лизатов штаммов *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis и *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADB соответственно.

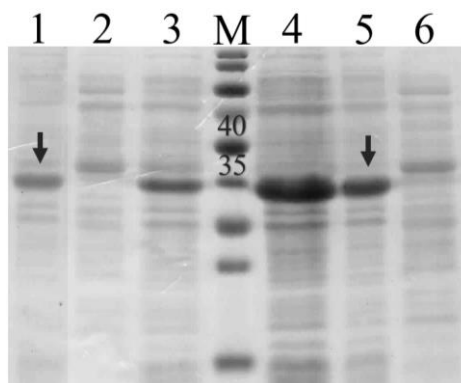


Рис. 1. Электрофоретический анализ белков клеточных лизатов штамма *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis

1 – осадок клеточного лизата (37 °С), 2 – надосадок клеточного лизата (37 °С), 3 – трансформант *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis (индукция при 37 °С), 4 – трансформант *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis (индукция при 20 °С), 5 – осадок клеточного лизата (20 °С), 6 – надосадок клеточного лизата (20 °С), М – маркер молекулярного веса Protein marker VI (10-245) Prestained (PanReac Applichem). Стрелками указаны целевые белки, находящиеся в осадке, цифры на маркере молекулярного веса обозначают массу в кДа

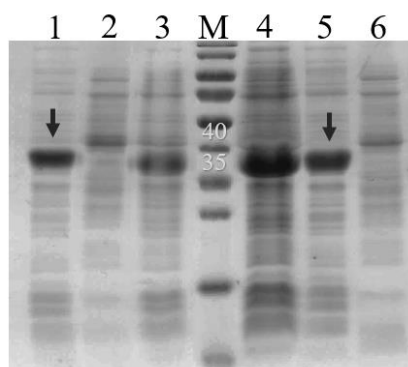


Рис. 2. Электрофоретический анализ белков клеточных лизатов штамма *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADB.

1 – осадок клеточного лизата (37 °С), 2 – надосадок клеточного лизата (37 °С), 3 – трансформант *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis (индукция при 37 °С), 4 – трансформант *E. coli* BL21 (DE3) pSUMO-DADBHis (индукция при 20 °С), 5 – осадок клеточного лизата (20 °С), 6 – надосадок клеточного лизата (20 °С), М – маркер молекулярного веса PageRuler Prestained Protein Ladder (10-180) (Thermo

Fisher Scientific Inc.). Стрелками указаны целевые белки, находящиеся в осадке, цифры на маркере молекулярного веса обозначают массу в кДа

Как видно на рисунках, фьюжн-белки SUMO-DADB и SUMO-DADBHis присутствуют в осадках клеточных лизатов продуцентов как при температуре индукции экспрессии генов 37 °С (дорожки 1 на рисунках 1 и 2), так и при 20 °С (дорожки 5 на рисунках 1 и 2). Таким образом, в результате индукции экспрессии генов *SUMO-DADB* и *SUMO-DADBHis*, в клетках штамма *E. coli* BL21 (DE3) при температурах культивирования 37 °С и 20 °С выявили целевые белки, которые синтезируются в нерастворимой форме. Следовательно, слияние с белком малым убиквитин-подобным модификатором дрожжей не привело к повышению растворимости целевых белков.

#### Библиографические ссылки

1. Crystal structure of glycoprotein E2 from bovine viral diarrhea virus / Y. Li [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013. Vol. 110, № 17. P. 6805–6810.
2. Пластинина, О.В. Клонирование и экспрессия главных антигенных доменов гликопротеина E2 вируса диареи крупного рогатого скота в клетках *E. coli* / О.В. Пластинина // 78-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 10-21 мая 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2021. С. 288-291.
3. SUMO fusion technology for difficult-to-express proteins / T. R. Butt [et al.] // Protein Expr. Purif. 2005. Vol. 43, No 1. P. 1-9.
4. Пластинина, О.В. Создание гибридных конструкций для получения главных антигенных доменов гликопротеина E2 вируса диареи крупного рогатого скота 2-го типа в составе фьюжн-белков в штаммах *Escherichia coli* / О.В. Пластинина, Н.В. Сауткина, В.А. Прокулевич // Биотехнология: достижения и перспективы развития: сборник материалов V международной научно-практической конференции, Пинск, 25-26 ноября 2021 г. / Министерство образования Республики Беларусь [и др.]; редкол.: В.И. Дунай [и др.]. Пинск: ПолесГУ, 2021. С. 99-102.

# ИЗУЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЙ *NICOTIANA TABACUM* В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА

**К. В. Приступа**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*kristina.pristupa@mail.ru;*

*науч. рук. – Т. А. Кукулянская, канд. биол. наук, доц.*

В настоящее время одной из задач, стоящих перед учеными, является получение растений, которые характеризуются повышенной устойчивостью к нарушению водного режима. В таких условиях в растениях усиливается интенсивность свободно радикальных окислительных процессов, повышается содержание активных форм кислорода (АФК). В ответ на усиление генерации АФК, как правило, наблюдается активация компонентов антиоксидантной защиты [1].

Развитие абиотического стресса сопровождается образованием избыточного количества этилена в растениях. Накопление данного фитогормона приводит к изменению их параметров роста и развития. Одним из способов снижения этилена является создание трансгенных растений, которые несут в своем геноме бактериальный *acdS*-ген, который кодирует 1-аминоциклопропан-1-карбоксилатдезаминазу (АЦК-дезаминазу). Данный фермент катализирует разрушение предшественника этилена [2].

Целью исследования являлось изучение влияния нарушения водного режима почвы на состояние антиоксидантной системы нетрансгенных и трансгенных растениях *Nicotiana tabacum*, несущих *acdS*-ген бактерий *Pseudomonas putida* В-37.

**Ключевые слова:** АЦК-дезаминаза; антиоксидантная система; «стрессовый» этилен; ген *acdS*; *Pseudomonas putida* В-37.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступали нетрансгенные и трансгенные растения *Nicotiana tabacum*, которые несли в своем геноме ген *acdS* бактерий *Pseudomonas putida* В-37. Растения были выращены в нормальных условиях (контрольная серия) и при нарушении водного режима почвы в течение 3 суток, 6 суток и 9 суток (опытные серии). Каждая серия включила себя по 10 нетрансгенных растений, а также 10 трансгенных растений.

Растительный материал массой 0,5 г гомогенизировали в 0,1 М калий-фосфатном буфере (рН = 7,8), объем довели до 10 мл. Полученные гомогенаты подвергали ультразвуковому воздействию (частота 11 кГц, время экспозиции 3×15 с), центрифугировали 15 мин при 10 000 об/мин. Определение содержания белка, низкомолекулярных и высокомолекулярных антиоксидантов в экстрактах проводили согласно методическому пособию по спецпрактикуму [3]. Статистическая

обработка результатов осуществлялась с помощью программы STATISTICA 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе нашей работы была определена активность АЦК-дезаминазы (табл. 1).

Таблица 1

### Активность АЦК-дезаминазы в трансгенных растениях

Серия	Активность АЦК-дезаминазы, нмоль/(мг белка×мин)
Нормальные условия	0,072 ± 0,003
Нарушение водного режима (3 суток)	0,286 ± 0,017*
Нарушение водного режима (6 суток)	0,545 ± 0,023*
Нарушение водного режима (9 суток)	0,851 ± 0,032*

Прим.: \* – различия между контрольной и опытными сериями достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

Как видно из представленных данных, воздействие на растения абиотического стресса повышало активность АЦК-дезаминазы в 4 раза на 3 сутки, в 7,8 раз на 6 сутки и в 12,3 раз на 9 сутки эксперимента соответственно. Такое изменение активности фермента, вероятно, свидетельствует об индукции экспрессии гена, кодирующего АЦК-дезаминазу, под влиянием абиотических факторов окружающей среды.

На следующем этапе нашей работы было определено содержание аскорбиновой кислоты (АК) и фенольных соединений (ФС) в нетрансгенных и трансгенных растениях в пересчете на г растительного материала (табл. 2).

Таблица 2

### Содержание аскорбиновой кислоты и фенольных соединений в нетрансгенных и трансгенных растениях

Серия	Нетрансгенные растения		Трансгенные растения	
	Содержание АК, мг/г раст. мат.	Содержание ФС, мкг танина/г раст. мат.	Содержание АК, мг/г раст. мат.	Содержание ФС, мкг танина/г раст. мат.
Нормальные условия	0,73 ± 0,02	59 ± 0,3	0,78 ± 0,02	69 ± 0,3

Серия	Нетрансгенные растения		Трансгенные растения	
	Содержание АК, мг/г раст. мат.	Содержание ФС, мкг танина/г раст. мат.	Содержание АК, мг/г раст. мат.	Содержание ФС, мкг танина/г раст. мат.
Нарушение водного режима (3 суток)	0,99 ± 0,02*	82 ± 0,4*	1,07 ± 0,02*	106 ± 0,7*
Нарушение водного режима (6 суток)	1,58 ± 0,03*	120 ± 0,6*	1,74 ± 0,04*	141 ± 0,8*
Нарушение водного режима (9 суток)	2,49 ± 0,05*	156 ± 0,9*	2,88 ± 0,08*	185 ± 1,0*

Прим.: АК – аскорбиновая кислота, ФС – фенольные соединения; \* – различия между контрольными и опытными сериями достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

Согласно данным таблицы 2, в нетрансгенных растениях содержание АК увеличилось в 1,4 раз, 2,2 раз и 3,4 раз соответственно на 3, 6 и 9 сутки эксперимента по сравнению с серией растений, выращенных в нормальных условиях, а в трансгенных растениях – в 1,4 раз, 2,2 раз и 3,7 раз соответственно. Показано, что исходное содержание фенольных соединений в трансгенных растениях было выше на 15-25% по сравнению с нетрансгенными формами. Для нетрансгенных растений содержание фенольных соединений увеличилось в 1,4 раз, 2 раза и 2,6 раз соответственно на 3, 6 и 9 сутки эксперимента по сравнению с серией растений, выращенных в нормальных условиях, а для трансгенных форм растений – в 1,5 раза, 1,9 раз и 2,5 раза соответственно.

На заключительном этапе нашей работы была определена активность аскорбатоксидазы (АО) и полифенолоксидазы (ПФО) во всех сериях растений (табл. 3).

Таблица 3

**Активность аскорбатоксидазы и полифенолоксидазы в нетрансгенных и трансгенных растениях**

Серия	Нетрансгенные растения		Трансгенные растения	
	Активность АО, мкмоль/(мин×мг белка)	Активность ПФО, Е/(мин×мг белка)	Активность АО, мкмоль/(мин×мг белка)	Активность ПФО, Е/(мин×мг белка)
Нормальные условия	0,04 ± 0,002	0,85 ± 0,02	0,04 ± 0,002	0,85 ± 0,02

Серия	Нетрансгенные растения		Трансгенные растения	
	Активность АО, мкмоль/(мин×мг г белка)	Активность ПФО, Е/(мин×мг белка)	Активность АО, мкмоль/(мин×мг г белка)	Активность ПФО, Е/(мин×мг белка)
Нарушение водного режима (3 суток)	0,09 ± 0,006*	1,25 ± 0,04*	0,06 ± 0,003*	1,00 ± 0,02*
Нарушение водного режима (6 суток)	0,17 ± 0,007*	2,04 ± 0,05*	0,10 ± 0,003*	1,54 ± 0,03*
Нарушение водного режима (9 суток)	0,16 ± 0,005*	1,96 ± 0,04*	0,09 ± 0,001*	1,43 ± 0,03*

Прим.: АО – аскорбатоксидаза; ПФО – полифенолоксидаза; \* – различия между контрольной и опытными сериями достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

Как видно из представленных данных, в нетрансгенных растениях активность АО возросла в 2,3 раз, 4,3 раз и 4 раза соответственно на 3, 6 и 9 сутки эксперимента по сравнению с серией растений, выращенных в нормальных условиях, а в трансгенных растениях – в 1,5 раза, 2,5 раза и 2,3 раз соответственно. Для нетрансгенных растений активность ПФО увеличилась в 1,5 раза, 2,4 раз и 2,3 раз соответственно на 3, 6 и 9 сутки эксперимента по сравнению с серией растений, выращенных в нормальных условиях, для трансгенных растений – в 1,2 раз, 1,8 раз и 1,7 раз соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют об индукции экспрессии гена *acdS* в трансгенных растениях при нарушении водного режима почвы. Вероятно, трансгенные растения отличаются более низкой интенсивностью процессов свободного окисления, в них в меньшем количестве образуются АФК и другие свободнорадикальные структуры. Поэтому в трансгенных растениях в меньшей степени происходит активация АО и ПФО. Этому, в свою очередь, может способствовать более высокое содержание ФС и АК.

## Библиографические ссылки

1. *Mates J.M.* Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology // *Toxicology*. 2000. Vol. 153. P. 83-104. DOI: 10.1016/s0300-483x(00)00306-1.



2. *Gontia-Mishra I.* Recent developments in use of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase for conferring tolerance to biotic and abiotic stress // *Biotechnology Letters*. 2014. Vol. 36. P. 889–898. DOI: 10.1007/s10529-014-1458-9.
3. *Семак И.В.* Методическое пособие по спец. практикуму для студентов биологического факультета. Минск: БГУ, 2012.

# ХАРАКТЕРИСТИКА МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БАКТЕРИОФАГА *ERWINIA AMYLOVORA* PZ321

П. О. Прохорчик

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*polina.prohortchik@gmail.com;*

науч. рук. – Н.В. Бесараб, ассист.

Аннотация: В ходе данной работы была проведена характеристика биологических и молекулярно-генетических свойств нового бактериофага *E. amylovora*. Для бактериофага проведено исследование способности к литической активности в отношении бактерий вида *Erwinia amylovora*, *Pantoea agglomerans*, *Pseudomonas putida*, *Serratia marcescens*, *Pectobacterium carotovorum* и *Escherichia coli* B. Была выделена ДНК бактериофага, проведен ПЦР и ПДРФ-анализ геномной ДНК изолятов бактериофагов. Были получены микрофотографии фаговых частиц при помощи электронного микроскопа.

**Ключевые слова:** *Erwinia amylovora*; бактериальный ожог; фитопатогены; бактериофаги.

## ВВЕДЕНИЕ

Бактериальный ожог, вызываемый бактерией *Erwinia amylovora*, стал самой настоящей проблемой для владельцев груш, яблонь и других растений семейства Rosaceae. Опасная болезнь может уничтожить весь сад, поэтому бороться с ней нужно на начальном этапе. Первые случаи бактериального ожога были зафиксированы еще в XVIII веке [1]. За 150 лет болезнь распространилась по всему миру, и теперь ни один сад не защищен от нее. Бактерии-возбудители распространяются от больных деревьев к здоровым, особенно при умеренных температурах и высокой влажности. Причем поражаются как старые, так и молодые деревья [3].

На территории Беларуси бактериальный ожог плодовых культур был впервые зарегистрирован в 2007 году [2]. Для уменьшения распространения бактерии используют разные методы борьбы. В качестве биологического способа контроля бактериального ожога служат специфичные бактериофаги. На сегодняшний день получено достаточное количество изолятов бактериофагов способных заражать бактерии *E. amylovora*.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе работы был осуществлен поиск бактериофагов, способных лизировать клетки *E. amylovora*. Материалом для выделения бактериофага послужила почва под грушей. Исследуемый материал, в

количестве нескольких ложек, помещали в 60 мл пептонно-дрожжевой бульон с 2 мл ночной культуры бактерией *E. amylovora* 1/79Sm и инкубировали с аэрацией 18-24 ч при 28 °С. После лизиса культуры, оставшиеся бактериальные клетки удаляли. Далее обирали 2 мл образца и добавляли 50 мкл хлороформа, после центрифугировали 10 минут 13000 об/мин. После определяли титр бактериофага при помощи серийных разведений и последующего высева по методу Грация.

Спектр литического действия бактериофага оценивали по наличию зон лизиса на газоне чувствительной культуры бактерий при нанесении капли фаголизата. Положительные результаты проверяли при титровании бактериофагов методом Грация.

Для постановки ПЦР использовались праймеры, специфичные последовательностям геномов бактериофагов кафедры молекулярной биологии Loshitsa2 и Micant.

Рестрикционный анализ проводили с помощью рестриктаз EcoRI, HindIII, BamHI. Реакционные смеси помещались на водяную баню и инкубировались 1 час при соответствующей температуре. Полученные результаты визуализировались при помощи электрофореза в агарозном геле.

Для первичного исследования методом электронной микроскопии фаговые частицы были сконцентрированы высокоскоростным центрифугированием и окрашены 2% раствор уранилацетата. Фаговые частицы наблюдали в просвечивающий электронный микроскоп Hitachi H-800 в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы, на территории Минской обл. Столбцовском р-на из образцов почвы под грушами выделен бактериофаг, активный в отношении бактерий вида *E. amylovora* 1/79Sm.

Выделенный бактериофаг на газоне индикаторной культуры формировал круглые, прозрачные негативные колонии различного размера (2–5 мм в диаметре) с мутным, нечетким краем. Многократные пассажи как крупных, так и мелких негативных колоний бактериофага приводили к одинаковому результату – формированию разнородных по размеру колоний. Результаты анализа представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Негативные колонии бак-териофага PZ321

Для дальнейших исследований был получен фаголизат PZ321 с титром  $1,909 \times 10^9$  БОЕ/мл.

Был исследован спектр литического действия, результаты представлены в таблице.

**Спектр литического действия бактериофага**

Бактерия	Штамм	Фаг PZ321	Бактерия	Штамм	Фаг PZ321
<i>E. amylovora</i>	1/79	+	<i>P. agglomerans</i>	194	+
	D4	+		197	–
	L 3-1	+		198	–
	L 3-8	+		208	+
	E2	+		216	+
	E3	+		219	+
	E4	+		220	+
	E5	+		221	–
	E10	+		222	–
	E19	+		228	–
<i>P. putida</i>		+	242	–	
<i>S. marcescens</i>		–	245	+	
<i>P. carotovorum</i>	jn42	+	246	+	
<i>E. coli</i>	B	–			

Примечание. Подавление роста бактерий фагом обозначается знаком “+”, отсутствие наблюдаемого подавления роста – “-”.

Для данного бактериофага PZ321 исследовали литическую активность в отношении штаммов бактерии вида *E. amylovora*, *P. agglomerans*, *P. putida*, *S. marcescens*, *P. carotovorum* и *E. coli*. Результаты исследований показали, что бактериофаг PZ321 активен только в

отношении бактерий вида *E. amylovora*, *P. carotovorum*, *P. putida* и некоторых штаммов *P. agglomerans*. Остальные бактерии оказались устойчивы к бактериофагу.

Положительные результаты литической активности в отношении штаммов *E. amylovora* D4, *P. agglomerans*, *P. putida* и *P. carotovorum* требуют дальнейших исследований с помощью метода Грация.

На следующем этапе работы осуществлено выделение нуклеиновой кислоты из бактериофага PZ321.

В результате ПЦР-анализа с праймерами, специфичными к последовательностям геномов Loshitsa2 и Micant, можно предположить, что бактериофаг PZ321 является родственным бактериофагу Loshitsa2.

Для определения гетерогенности коллекции бактериофагов *E. amylovora* кафедры молекулярной биологии, был проведен ПДРФ-анализ геномов бактериофагов Loshitsa2 и нового бактериофага PZ321. Результаты анализа представлены на рисунке 2.

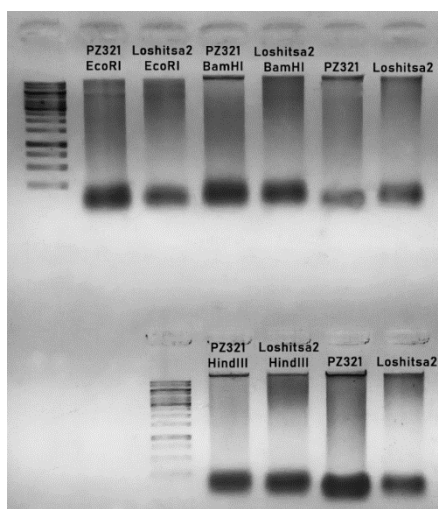


Рис. 2. Результаты реакции рестрикции ДНК

Было установлено, что ДНК-бактериофагов PZ321 и Loshitsa2 подвержены гидролизу эндонуклеазной рестрикции EcoRI. Для установления идентичности бактериофагов требуются дальнейшие исследования.

В результате первичных исследований методом электронной микроскопии было показано, что частица фага PZ321 представлен капсидом в виде икосаэдрической головки без длинного сократимого отростка, что типично группам по Брэдли А, В и С. Фаг PZ321 имеет размер около 50 нм. Результаты наблюдений представлены на рисунке 3.

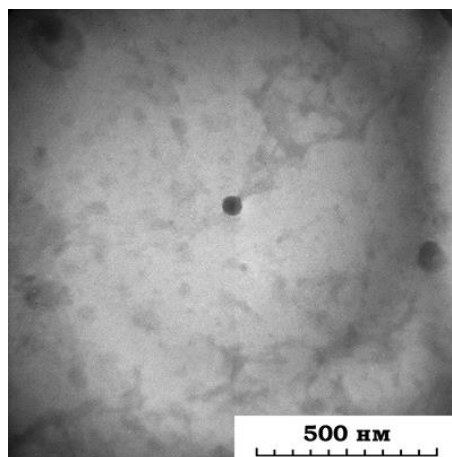


Рис. 3. Микрофотографии морфологии фаговых частиц, полученных на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi H-800

Таким образом, в ходе проделанной работы, нами была проведена характеристика биологических и молекулярно-генетических свойств нового бактериофага *E. amylovora* PZ321.

Выражаем отдельную благодарность Моховикову Максиму Александровичу за предоставление возможности получения микрофотографий бактериофага при помощи электронного микроскопа (НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ).

#### Библиографические ссылки

1. Акимкин, В.Г. Бактериофаги: исторические и современные аспекты их применения. Опыт и перспективы / В.Г. Акимкин, О.С. Дарбеева, В.Ф. Колков // Клиническая практика. – 2010. – № 4. – 48–54.
2. Lagonenko, A.L., Komardina, V.S., Nikolaichik, Y.A. and Evtushenkov, A.N. (2008), First Report of *Erwinia amylovora* Fire Blight in Belarus. *Journal of Phytopathology*, 156: 638-640.
3. Turner, D., Kropinski, A. M., & Adriaenssens, E. M. (2021). A Roadmap for Genome-Based Phage Taxonomy. *Viruses*, 13(3), 506. doi:10.3390/v13030506.

# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ КЛЕТОК КОРНЯ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ В ОТВЕТ НА ПОВЫШЕННЫЕ УРОВНИ ИОНОВ НИКЕЛЯ В СРЕДЕ

А. Л. Рекиш, А. В. Ныч

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*v.mackievic@gmail.com, nych@bsu.by;*

*науч. рук. – В. С. Мацкевич, ст. преп.*

В индустриально развитых регионах уровни никеля ( $\text{Ni}^{2+}$ ) в среде часто превышают допустимые значения и оказывают токсическое действие на окружающую флору. Механизмы ответной реакции растений на избыток  $\text{Ni}^{2+}$  в настоящее время не ясны. В данной работе было показано, что повышенные уровни  $\text{Ni}^{2+}$  ингибируют ростовые процессы и индуцируют гибель клеток корня высших растений. Добавление гистидина оказывает протекторное действие при никелевом стрессе, снижает ЗКГ, а также может индуцировать автофагию в кончиках корней на ранних стадиях токсического воздействия  $\text{Ni}^{2+}$ , что может быть связано с удалением поврежденных органов, перестройкой метаболизма и запуском адаптивных реакций.

**Ключевые слова:** автофагия; никель; гистидин; флуоресцентная микроскопия; корень; арабидопсис; ATG8a-mCherry.

## ВВЕДЕНИЕ

В индустриально развитых регионах часто возникает проблема никелевого загрязнения. Для большинства видов растений концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  свыше 10-50 мкМ вызывают токсические эффекты: тормозят рост, подавляют фотосинтез, прорастание семян, транспорт сахара и индуцируют хлороз, некроз и увядание [1]. Первичный и наиболее общий ответ растений на воздействие стресс-факторов среды – ингибирование ростовых процессов, происходящее вследствие переключения с использования энергетических ресурсов для накопления биомассы на активацию защитных механизмов. Одним из таких механизмов является запуск автофагических реакций. Автофагия играет двойную роль: с одной стороны, она направлена на выживание клетки, с другой – служит частью процесса запрограммированной клеточной гибели (ЗКГ). Не смотря на то, что автофагия довольно хорошо изучена в животных организмах, в растениях механизм индукции автофагических реакций не до конца понятен [2]. Особенно актуальным представляется исследование данного процесса в клетках корня, так как именно они выступают основной мишенью большинства абиотических стресс-факторов. Цель данной работы: выявить влияние повышенных уровней никеля на жизнеспособность клеток корня высших растений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе тестировалась реакция двух видов растений *Arabidopsis thaliana* L. Heynh. и *Triticum aestivum* L. Культивирование пшеницы проводилось рулонным методом [3]. Анализ ростового ответа арабидопсиса проводился с использованием тестов в стерильной гелевой среде и гидропонике [4, 5]. Общую жизнеспособность клеток корня оценивали при помощи Evans Blue [3]: после обработки стресс-растворами проростки выдерживались 30 мин в 0,025% растворе EB, затем 10 мин промывались в буфере (мМ): 0,1 KCl, 0,1 CaCl<sub>2</sub>, 1 Tris/ 2 Mes pH 6,0; накопление флуоресценцию EB регистрировали на микроскопе Nikon Eclipse TS100 (фильтр G-2A); изображения анализировались в приложении ImageJ. Индукцию автофагии в клетках корня арабидопсиса при никелевом стрессе регистрировали с использованием трансгенной линии *A. thaliana*, у которых экспрессируется меченый mCherry белок ATG8a; флуоресценцию mCherry определяли также на микроскопе Nikon Eclipse TS100 (фильтр G-2A) и анализировали в программе ImageJ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

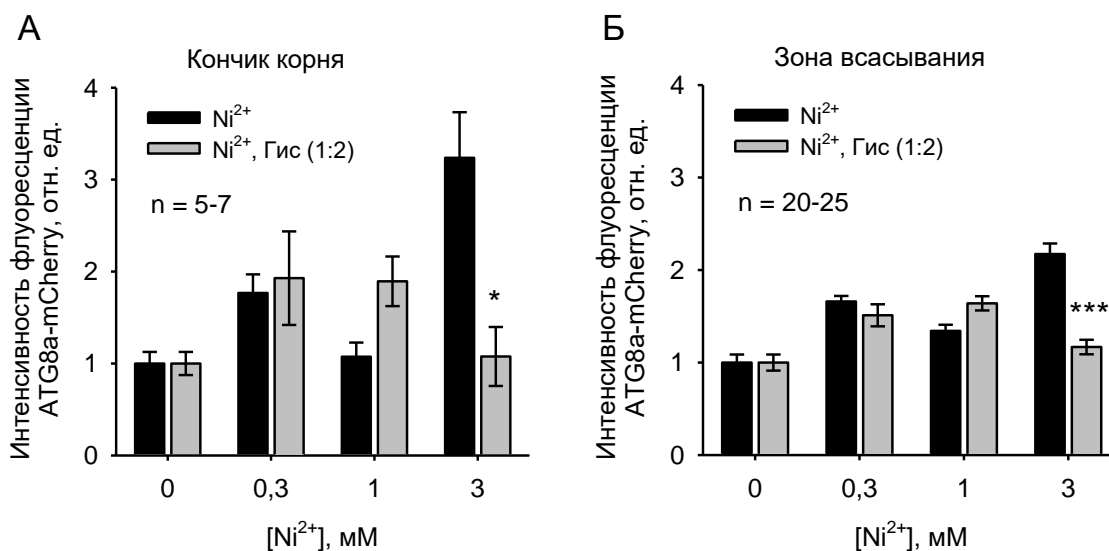
Ростовые тесты в гелевой среде показали, что никель (Ni<sup>2+</sup>) в концентрации свыше 100 мМ ингибирует рост корней арабидопсиса. Добавление гистидина (Гис) оказывает протекторное действие при никелевой стрессе, при этом наиболее эффективным является соотношение 1 Ni<sup>2+</sup>: 2 Гис. В гидропонной системе были получены схожие результаты, однако токсический эффект Ni<sup>2+</sup> был более выражен. Так, например, в гелевых тестах на 5 сут культивирования на фоне 0,3 мМ Ni<sup>2+</sup> скорость роста корней арабидопсиса снижалась на 25%, а в гидропонике – на 50%.

При выдерживании растений в растворах с 0,3-3 мМ Ni<sup>2+</sup> в течение 15 ч наблюдалось резкое снижение общей жизнеспособности клеток корня арабидопсиса, о чем свидетельствовало накопление синего окрашивания и красной флуоресценции EB. В кончиках корней, обработанных Ni<sup>2+</sup>, интенсивность флуоресценции EB возрастала в 2,2-2,5 раза по сравнению с контрольными образцами. В зрелой зоне корня Ni<sup>2+</sup>-индуцированное увеличение флуоресценции составляло 50-70%.

Обработка арабидопсиса сублетальными и летальными концентрациями никеля в течение 3-15 ч индуцировала развитие автофагии в клетках корня арабидопсиса. Наибольший эффект регистрировался при 15 ч экспозиции растений в 3 мМ Ni<sup>2+</sup>: флуоресценция ATG8a-mCherry в кочихак корня возрастала в 3,2 раза, в



зоне всасывания – в 2,3 раза (рисунок). При введении Гис  $Ni^{2+}$ -индуцированная автофагия снижалась во всех случаях, кроме 3 ч обработки 1 мМ  $Ni^{2+}$  и 2 мМ Гис. Образующиеся комплексы Ni-Гис<sub>1(2)</sub> благодаря своей редокс-активности стимулируют быстрое накопление АФК в кончиках корней и запуск автофагии. Вероятно, данный механизм используется растениями для распознавания повышенных уровней никеля в среде и удаления корней, растущих в направлении данного стрессора. Интересно отметить, что как в кончиках корней, так и в зрелой зоне при увеличении времени обработки никелем до 24 ч флуоресценция ATG8a-mCherry снижалась примерно до уровня контроля. В то время как введение комплексов Ni-Гис<sub>1(2)</sub> вызывало значительное увеличение флуоресценции ATG8a-mCherry. Можно предположить, что на данном этапе развития никелевого стресса включаются другие, более поздние, типы клеточной гибели, в частности апоптозоподобная ЗКГ.



Индукция автофагии в корнях арабидопсиса при 15 ч обработке растений растворами  $Ni^{2+}$  и Ni-Гис<sub>2</sub>: А – Интенсивности флуоресценции ATG8a-mCherry в кончиках корня ( $X \pm SE$ , n=5-7); Б – Интенсивности флуоресценции ATG8a-mCherry в зоне всасывания ( $X \pm SE$ , n=20-25). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю при помощи ANOVA-теста: \* –  $p \leq 0,05$  и \*\*\* –  $p \leq 0,001$

В опытах с сельскохозяйственными культурами нами было продемонстрировано, что низкие концентрации  $Ni^{2+}$  (до 0,01 мМ) стимулировали рост основного корня пшеницы, однако при увеличении концентрации металла свыше 0,03 мМ наблюдалось ингибирование ростовых процессов. Полунгибирующий эффект отмечался при 0,3 мМ  $Ni^{2+}$ , концентрация 10 мМ  $Ni^{2+}$  была летальной. В присутствии Гис токсический эффект  $Ni^{2+}$  снижался, ингибирование роста корней регистрировалось только, начиная с обработки 0,3 мМ  $Ni^{2+}$  и 0,6 мМ Гис.

Как и в случае с арабидопсисом, Гис также оказывал протекторное действие на жизнеспособность клеток корня при никелевом стрессе.

В результате нами было показано, что присутствие  $\text{Ni}^{2+}$  в среде выращивания в концентрации свыше 0,03-0,1 мМ ингибирует рост растений, а также снижает жизнеспособность клеток корня. Гис оказывает протекторное действие при никелевом стрессе, причем наибольший эффект демонстрирует соотношение 1  $\text{Ni}^{2+}$ : 2 Гис. При воздействии 0,3-3 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  в первые 15 ч наблюдается запуск автофагических реакций, однако при увеличении времени экспозиции уровень автофагии падает, что, вероятно, обусловлено включением других типов клеточной гибели. Гис снижает  $\text{Ni}^{2+}$ -индуцированную автофагию при 15 ч воздействия, однако при 3 ч обработке стимулирует автофагические реакции в кончиках корней, что может быть связано с удалением поврежденных органов, перестройкой метаболизма и запуском адаптивных реакций.

Работа была выполнена в рамках темы НИР «Исследование функционального взаимодействия сигнально-регуляторных и антиоксидантных систем при стрессе с целью повышения общей стрессоустойчивости высших растений и создания новых биотехнологий» (№ государственной регистрации 20211222), подпрограммы «Молекулярные и клеточные биотехнологии-2» государственной программы научных исследований «Биотехнологии-2» на 2021–2025 годы.

#### Библиографические ссылки

1. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants / T.V.M. Srekanth [et al.] // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2013. – Vol. 10. – P. 1129-1140.
2. The role of ion disequilibrium in induction of root cell death and autophagy by environmental stresses / V. Demidchik [et al.] // Functional plant biology. – 2017. – Vol. 45, № 1. – P. 28-46.
3. Ингибирование ростовых процессов и индукция запрограммированной клеточной гибели в корне *Helianthus annuus* L. под действием ионов никеля и никель-гистидиновых комплексов / В.С. Мацкевич и др. // Экспериментальная биология и биотехнология – 2020. – Т. 1. – С. 11-19.
4. Effects of exogenously-applied L-ascorbic acid on root expansive growth and viability of the border-like cells / X. Li [et al.] // Plant Signaling & Behavior. – 2018. – P. 1–4.
5. Kozhevnikova, A.D. Translocation of Ni and Zn in *Odontarrhena corsica* and *Noccaea caerulea*: the effects of exogenous histidine and Ni/Zn interactions / A.D.Kozhevnikova, I.V. Seregin, H. Schat // Plant and Soil. – 2021. – Vol. 468, № 1. – P. 295-318.

## ВВЕДЕНИЕ *PUNICA GRANATUM L.* В КУЛЬТУРУ *IN VITRO*

А. А. Сергеева

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*cool.anna-sergeeva@yandex.by*;

науч. рук. – А.О. Логвина, канд. биол. наук, доц.

Целью исследования было получить культуру *in vitro* граната обыкновенного (*Punica granatum L.*) и изучить влияние отдельного внесения в состав среды фитогормонов ауксиновой и цитокининовой природы на проростки граната. В ходе получения асептически выращенных проростков установлено, что добавление в состав питательной среды 6-БАП в концентрации 3 мг/л стимулировало прорастание семян, в результате чего были получены асептические проростки. Проростки были сильно укороченными, формировалось несколько коротких побегов. При этом развитие корневой системы было отмечено лишь у 7% проростков. Внесение в состав среды ауксинов 2,4-Д или ИУК в концентрациях 5, 10, 15 и 20 мг/л, произведенное для изучения возможности стимуляции развития корневой системы, привело к потемнению проростков и формированию на их поверхности каллусной ткани, окрашенной в коричневый цвет, хотя объекты постоянно выращивались в условиях света. Эффект потемнения не зависел от концентрации вносимых ауксинов. На средах, дополненных цитокинином 6-БАП в концентрациях 5, 10, 15, 20 мг/л, с целью стимулирования развития побегов, также наблюдалось образование каллусной ткани в основании побегов. При этом в отличие от сред с ауксинами, каллусная ткань была ярко-зеленой. Таким образом, таких эффектов как стимуляция ризогенеза под действием экзогенных ауксинов или стимуляция роста адвентивных побегов под действием цитокинина отмечено не было. При отдельном внесении в состав среды фитогормонов ауксиновой (2,4-Д или ИУК) и цитокининовой (6-БАП) природы из проростков граната обыкновенного в обоих случаях наблюдалось образование каллусных тканей, но различающихся морфологически.

**Ключевые слова:** *Punica granatum*, гранат обыкновенный, фитогормоны, ауксины, цитокинины, органогенез, каллус.

Гранат, или гранатовое дерево (*Punica*) – это род многолетних кустарников и невысоких деревьев. Род включает в себя всего 2 вида: гранат обыкновенный (лат. *Punica granatum L.*) и гранат протопуника (лат. *Punica protopunica Balf.*). Гранат представляет собой субтропическое листопадное плодовое дерево до 5 м в высоту либо невысокий кустарник. Плод – крупная, округлой формы ягода под названием гранатина. С одного взрослого экземпляра собирают примерно 60 кг плодов. В гранате содержится ряд активных веществ, он особенно богат дубильными веществами: в коре и околоплоднике их содержится до 33%. В корнях дерева и коре присутствуют алкалоиды пельтверин и изопельтверин. В цветках найден антоциан пунцин – это пигмент ярко-алого оттенка [3].

Благодаря противовоспалительным, антисептическим и мочегонным свойствам, плоды граната используют с целью профилактики и терапии острых циститов и других воспалительных заболеваний мочеполовой системы. Полифенолы в составе нативного растения граната способны укрепить иммунную систему, благоприятны для работы ЖКТ, препятствуют различным воспалениям. Превосходные лечебные свойства граната связаны также с его антиоксидантной активностью [1; 2].

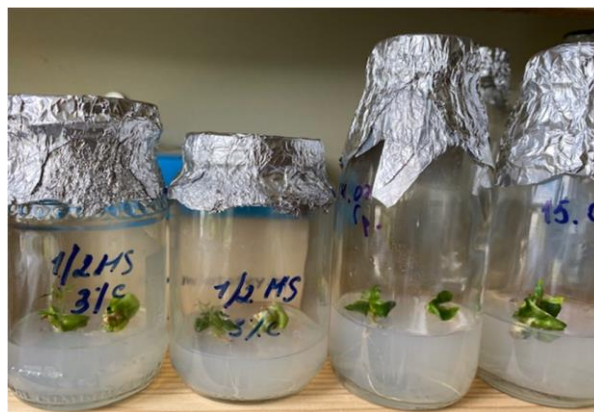
Ввиду ценного биохимического состава и широкого спектра биологических активностей актуальным видится введение граната обыкновенного в культуру *in vitro*, как с точки зрения получения каллусных и суспензионных культур в качестве альтернативного источника ценных вторичных метаболитов, так и с точки зрения разработки протокола микроклонального размножения.

Целью исследования было получить культуру *in vitro* граната обыкновенного и изучить влияние отдельного внесения в состав среды фитогормонов ауксиновой и цитокининовой природы на проростки граната.

Первым этапом работы было получить асептические растения. Источником семян служил плод (гранатина). Плод для забора семян выбирался спелый без видимых повреждений. Полученные семена подвергали стерилизации, после чего их помещали в чашки Петри для проращивания. Проращивание семян осуществлялось в чашках Петри на половинной среде Мурасиге и Скуга (МС) в условиях термостата при 24 °С в темноте (уплотнителем выступал агар-агар в концентрации 80 г/л). Было установлено, что на безгормональной среде семена прорастали с низкой эффективностью. Для стимулирования прорастания семян в состав питательной среды добавляли 6-бензиламинопурина (6-БАП) в концентрациях 3 мг/л, что положительно сказалось на всхожести семян.

Так, были получены этиолированные проростки, которые в дальнейшем переносили в стеклянные флаконы с половинной средой МС, дополненной 3% сахарозы, и помещали их на свет.

Проростки быстро зеленели, однако не росли в высоту, на них формировалось несколько коротких побегов (рис.1).



*Рис.1.* Проростки граната обыкновенного через месяц выращивания на свету

При этом развитие корневой системы было отмечено лишь у 7% проростков из их общего числа.

На следующем этапе работы для стимулирования корневого органогенеза проростки переносили на среды, дополненные ауксинами 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислотой (2,4-Д) или индолил-3-уксусной кислотой (ИУК) в концентрациях 5, 10, 15 и 20 мг/л. С целью изучения стимулирования развития адвентивных побегов проростки пересаживали на среды, дополненные цитокинином 6-БАП в концентрациях 5, 10, 15, 20 мг/л.

Внесение в состав среды ауксинов 2,4-Д или ИУК в концентрациях 5, 10, 15 и 20 мг/л, произведенное для изучения возможности стимуляции развития корневой системы, привело к потемнению проростков и формированию на их поверхности каллусной ткани, окрашенной в коричневый цвет, хотя объекты постоянно выращивались в условиях света (рис. 2, А). Эффект потемнения не зависел от концентрации вносимых ауксинов. На непродолжительный период времени в присутствии ИУК в наиболее высокой концентрации наблюдалось появление адвентивных корней на поверхности листьев проростка, которые в дальнейшем деградировали по мере разрастания каллусной ткани (рис. 2, Б). Проростки со временем деградировали.

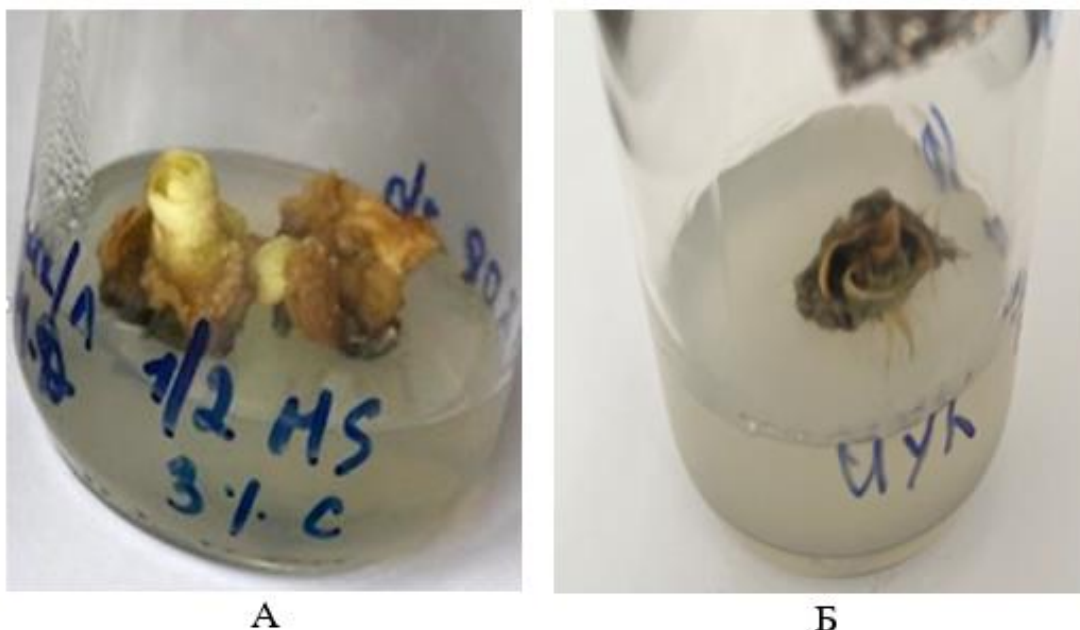


Рис. 2. Проростки граната обыкновенного на питательной среде с добавлением 2,4-Д (А) и ИУК (Б)

Интересно, что проростки, выращиваемые в присутствии в цитокинина 6-БАП, также характеризовались образованием каллусной ткани в основании побегов. При этом в отличие от сред с ауксинами, каллусная ткань была ярко-зеленой, кроме этого, проростки не деградировали (рис. 3) Вопреки ожиданиям, таких эффектов как стимуляция ризогенеза под действием экзогенных ауксинов или стимуляция роста адвентивных побегов под действием цитокинина, не наблюдалось.

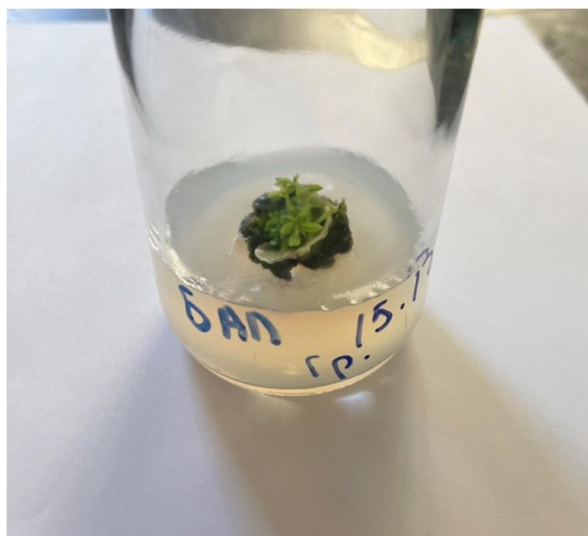


Рис. 3. Проростки граната обыкновенного на питательной среде с добавлением цитокинина 6-БАП

Таким образом, при действии фитогормонами разной природы

(ауксинами или цитокининами) были получены 2 разные каллусные линии. Можно заключить, что независимо от природы, фитогормоны стимулировали формирование каллусов, но различающихся морфологически.

Из рисунков видно, что каллус окрашенный в коричневый цвет, характеризовался наличием скоплений черных клеток, что вероятно говорит о накоплении в них фенольных соединений. Каллус, окрашенный в изумрудно-зеленый цвет также имел плотные темные очаги клеток, также, вероятно, представляющими собой вместилища фенольных соединений, однако в основной массе клетки были крупными и сильнооводненными.

Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию роста полученных линий каллусов и проведение их биохимического анализа, а также на изучение гормональной индукции органогенеза.

#### **Библиографические ссылки**

1. Biochemical composition and expression of anthocyanin biosynthetic genes of a yellow peeled and pinkish ariled pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivar are differentially regulated in response to agro-climatic conditions / R. Attanayake [et al.] // Agric. Food Chem. – 2018. – Vol. 66 (33). – P. 8761–8771.
2. Fabro, S. Toxicity and teratogenicity of optical isomers of thalidomide / S. Fabro, R.L.Smith, R.T.Williams // Nature. – 1967. – Vol. 215. – P. 296.
3. Lansky, E.P. *Punica granatum* (pomegranate) and its potential for prevention and treatment of inflammation and cancer / E.P. Lansky, R.A. Newman // J. Ethnopharmacol. – 2007. – Vol. 109. – P. 177-206.

# ВЫЗЫВАЕМЫЕ ХИЗАЛОФОП-П-ЭТИЛОМ ИЗМЕНЕНИЯ АЦИДОФИЦИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ КОРНЕЙ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ ПОСЛЕ ГИПОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**А. В. Станьковская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anyast136@gmail.com;*

*науч. рук. – О.Г. Яковец, канд. биол. наук, доц.*

В результате проведенных экспериментов установлено, что характер изменения ацидофицирующей активности корней проростков озимой пшеницы сорта Мроя зависит от времени, которое проходит после воздействия низкотемпературного стресса. Также выявлено, что характер изменения ацидофицирующей активности корней проростков пшеницы после гипотермии зависит от концентрации в наружной среде гербицида хизалофоп-П-этила. В работе показано, что адаптации растительного организма к действию стрессоров предшествует активация  $H^+$ -АТФазной помпы.

Ацидофицирующая активность,  $H^+$ -АТФазная помпа, гипотермия, гербициды, хизалофоп-П-этил, озимая пшеница, адаптация.

Хизалофоп-П-этил (*ХЗФ*) – высокоэффективный гербицид, использующийся в посевах двудольных культур против однолетних и многолетних злаковых культур. Относится к группе арилоксифеноксипропионатом, нарушающих синтез жирных кислот за счет ингибирования ацетил-КоА-карбоксилазы [3]. *ХЗФ* входит в состав таких препаратов, как, например, Агросан, КЭ (хизалофоп-П-этил, 51,6 г/л), Леопард, КЭ (хизалофоп-П-этил, 50 г/л), Миура, КЭ (хизалофоп-П-этил, 125 г/л) [2].

При обработке надземной части растений гербицидами возможно их попадание в почву и, как следствие, влияние на корневую систему растительного организма. Одной из характеристик корневой системы является ее ацидофицирующая активность (подкисление наружного раствора), которая обусловлена функционированием  $H^+$ -АТФазной помпы.  $H^+$ -АТФаза плазматической мембраны выполняет ключевую роль в адаптации растений к разнообразным неблагоприятным факторам. Нельзя исключить влияния попадающих в почву гербицидов на функциональную активность данной транспортной системы.

Для растительного организма характерно такое явление, как кросс-адаптации – приобретение или повышение устойчивости под воздействием одного из неблагоприятных факторов к другим стрессовым воздействиям. В литературе сообщается о возможном повышении устойчивости растений к последующему действию



стрессоров после их предобработки низкой температурой [3]. В связи с этим целью нашей работы было исследование изменения ацидофицирующая активность корней проростков озимой пшеницы под действием хизалофоп-П-этила после гипотермии.

Эксперименты проводились на 8-дневных проростках озимой пшеницы сорта Мроя, выращенных рулонным методом в темноте в растворе 0,1 мМ CaSO<sub>4</sub>. Контрольные измерения ацидофицирующей активности корней проводились в течение 180 мин в темноте в растворе, содержащем 0,1 мМ CaSO<sub>4</sub> и 1,0 мМ KCl. В литературе отмечено, что ионы K<sup>+</sup> способны стимулировать H<sup>+</sup>-отток в корневой системе злаковых культур [4]. Поэтому все опытные растворы содержали 1,0 мМ KCl. Величина значения pH раствора в начале опыта доводилась 5,0·10<sup>-3</sup> М NaOH до 6,8. Регистрировали pH экспериментального раствора с помощью настольного pH-метра HANNA instruments HI 221 и иономера лабораторного И-160. На основе изменений pH инкубационного раствора рассчитывали количество протонов, выделенных корнями за каждый интервал времени с учетом объема раствора, его pH и веса корней [4].

Для исследования влияния на ацидофицирующую активность корней пониженной температуры после контрольных измерений проростки помещали в термостат при температуре +12°C на 15 ч [1]. После этого сразу и через 24 и 48ч проводилось исследование ацидофицирующей активности корней в контрольном растворе и при добавлении 10<sup>-6</sup>, 10<sup>-5</sup> и 10<sup>-4</sup> М гербицида. После окончания экспериментов корни отделяли, промокали фильтровальной бумагой и взвешивали. На основе изменений pH инкубационного раствора рассчитывали концентрацию протонов и количество протонов, выделенных корнями за каждый интервал времени с учетом объема раствора и веса корней

При концентрации 10<sup>-6</sup> М хизалофоп-П-этила в контроле с увеличением длительности инкубации корней проростков озимой пшеницы их ацидофицирующая активность значительно увеличилась. Сразу после воздействия пониженной температуры достоверно увеличивал ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем. Через 24ч после гипотермической обработки гербицид достоверно ингибировал ацидофицирующую активность корней до 160 мин эксперимента по сравнению с контролем. Уже через 48ч после гипотермической обработки гербицид достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем.

При расчете количества протонов, выделенных корнями, в контроле, с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы

наблюдался выход ионов водорода. Гербицид сразу после гипотермического воздействия с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы вызывал достоверную активацию выхода ионов водорода. Гербицид через 24 ч и 48 ч после гипотермической обработки достоверно не изменял выход протонов из корней проростков.

При концентрации  $10^{-5}$  М хизалофоп-П-этила в контроле, с увеличением длительности инкубации корней проростков озимой пшеницы, их ацидофицирующая активность значительно не увеличилась. Гербицид сразу после воздействия пониженной температуры достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем. Через 24ч после гипотермической обработки гербицид достоверно ингибировал ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем. Через 48ч после гипотермической обработки гербицид достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем.

При расчете количества протонов, выделенных корнями, в контроле с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы практически не наблюдался выход ионов водорода. Гербицид сразу после гипотермического воздействия, с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы вызывал активацию выхода ионов водорода. Гербицид через 24 ч и 48 ч после гипотермической обработки достоверно не изменял выход ионов водорода из корней проростков по сравнению с контролем.

При концентрации  $10^{-4}$  М хизалофоп-П-этила в контроле, с увеличением длительности инкубации корней проростков озимой пшеницы, их ацидофицирующая активность значительно не ингибировалась. Гербицид сразу после воздействия пониженной температуры достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней в сравнении с контролем. Через 24ч после гипотермической обработки гербицид достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем. Через 48ч после гипотермической обработки гербицид достоверно увеличил ацидофицирующую активность корней по сравнению с контролем.

При расчете количества протонов, выделенных корнями, в контроле с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы выход ионов водорода практически не наблюдался. Сразу после гипотермического воздействия, с увеличением времени инкубации корней проростков озимой пшеницы гербицид вызывал достоверную активацию выхода ионов водорода. Гербицид через 24ч после гипотермической обработки достоверно увеличил выход  $H^+$  из корней

проростков по сравнению с контролем. Через 48ч после гипотермической обработки гербицид достоверно увеличил выход протонов из корней в наружный раствор по сравнению с контролем.

Таким образом, нами было показано, что, во-первых, характер изменения ацидофицирующей активности корней проростков пшеницы зависит от времени, которое проходит после воздействия низкотемпературного стресса. Сразу после действия гипотермии зафиксировано ингибирование  $H^+$ -помпы. С увеличением времени экспозиции в нормальных условиях происходит постепенное возвращение функциональной активности данной транспортной системы к контролю (через 48ч). При этом предварительно происходит ее активация (через 24ч). Во-вторых, характер изменения ацидофицирующей активности корней проростков пшеницы после гипотермии в присутствии хизалофоп-П-этила зависит от концентрации гербицида. По воздействию  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  М хизалофоп-П-этила сразу после действия гипотермии наблюдается активация  $H^+$ -помпы. С увеличением времени экспозиции проростков в нормальных условиях до 24 и 48ч достоверных изменений выхода протонов под действием  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  М не происходит, а под действием  $10^{-4}$  М гербицида - зафиксирована активация этого процесса. Обработка  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  М хизалофоп-П-этилом приводит к сокращению времени, в течение которого развивается адаптация корневой системы проростков после гипотермического воздействия, до 24ч. При обработке  $10^{-4}$  М хизалофоп-П-этилом в выбранном временном интервале не зафиксировано наступления адаптации корневой системы проростков после гипотермического воздействия. В-третьих, можно заключить, что адаптации растительного организма предшествует активация  $H^+$ -АТФазной помпы.

#### Библиографические ссылки

1. Современные проблемы биохимии. Методы исследований: учеб. пособие / Е.В. Барковский [и др.]; под ред. проф. А.А. Чиркина – Минск: Выш. шк., 2013. – 491с.
2. Хизалофоп-п-этил (квизалофоп-п-этил) [Электронный ресурс]. - 2018. Режим доступа: <https://pesticydy.by/dv/hizalofop-p-etil-kvizalofop-p-etil/>. Дата доступа: 27.04.2022.
3. Хизалофоп-П-этил [Электронный ресурс]. - 2020. Режим доступа: [https://www.agroxxi.ru/goshandbook/wiki/active\\_substance/quizalofop-P-ethyl.html](https://www.agroxxi.ru/goshandbook/wiki/active_substance/quizalofop-P-ethyl.html). Дата доступа: 27.04.2022.
4. Вахмистров, Д.Б. Переходный процесс при индукции протонного насоса корневых клеток [Текст] / Д.Б. Вахмистров, О Эн До // Физиология растений. – 1993. – Т.40, № 1. – С. 100-105.

# УЧАСТИЕ КАТИОННЫХ КАНАЛОВ GORK В ГРАВИТРОПИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ КОРНЯ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

А. Е. Стефанович

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*antony.stefanovich@gmail.com;*

*науч. рук. – В. В. Самохина, ст. преп.*

Гравитропизм – это способность различных органов растения располагаться и расти в определённом направлении по отношению к центру земного шара. Понимание молекулярных и физиологических основ формирования гравитропического ответа растений является одной из ключевых проблем современной биологии, решение которой позволит создать сорта растений, которые будут устойчивы к стрессовым факторам и на Земле, и в космосе. Показано, что в регуляции гравитропической реакции участвуют полярный транспорт фитогормона ауксина, цитоскелет, транспорт ионов  $Ca^{2+}$ ,  $H^+$  и  $K^+$ . При гравистимуляции проростков арабидопсиса происходит деполяризация плазматической мембраны клеток корней, что в свою очередь вызывает вход  $Ca^{2+}$  и выход  $K^+$ . Гравитропическая реакция растений линии *gork1-1* связана с тем, что при отсутствии гена GORK не происходит значительной утечки ионов калия, что положительно влияет на рост, а, следовательно, и на угол наклона корня растения.

**Ключевые слова:** гравитропизм, катионный канал GORK, гравистимуляция, корень, арабидопсис.

## ВВЕДЕНИЕ

Гравитропическая реакция – это ростовой ответ растения на изменение его положения в поле силы тяжести [1]. Внешним проявлением гравитропизма является ростовой изгиб, который восстанавливает нормальную ориентацию органов растения после изменения его положения в пространстве относительно вектора силы тяжести [1]. При отклонении того или иного органа от его естественного направления роста запускается сложный комплекс внутри- и межклеточных реакций, позволяющих растению восстановить правильное положение в пространстве.

В гравитропической реакции корня выделяют 3 этапа: 1) перцепция гравитационного стимула; 2) трансдукция сигнала; 3) развитие асимметричного ростового ответа. Восприятие гравитационного стимула осуществляется в статоцитах, которые в корнях располагаются в корневом чехлике [1, 2]. При отклонении осевого органа растения от вертикального положения гравитропическая реакция корректирует направление роста, тормозя рост на нижней стороне корня [2]. Показано,

в частности, что в регуляции гравитропической реакции участвуют полярный транспорт фитогормона ауксина, цитоскелет, транспорт ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$  и  $\text{K}^+$ .

Ионный канал GORK – это наружу-выпрямляющий  $\text{K}^+$ -канал, через который осуществляется потеря клеткой  $\text{K}^+$ . Стрессы активируют канал GORK и усиливают отток из клеток корня калия, что приводит к индукции запрограммированной клеточной гибели, ионному дисбалансу и возможно к снижению конститутивного уровня анаболических реакций [3, 4]. Активация канала GORK при воздействии стресс-факторов приводит к снижению суммарного входа  $\text{K}^+$  и замедлению роста корня. Следовательно, реакция скорости роста корня при воздействии гравистимуляции может быть показателем активности этих каналов. Цель настоящей работы – определить участие катионных каналов GORK в гравитропической реакции корня высших растений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были выбраны корни 7-дневных проростков *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. 2-ух линий: 1) дикий тип экотипа Wassilevskija (WS-0); 2) *gork1-1* (у которой отсутствует ген, кодирующий наружу-выпрямляющий  $\text{K}^+$ -канал GORK).

Среда выращивания содержала смесь солей Мурасиге и Скуга (МС) с микроэлементами, а также 1 % сахарозу и 0,35 % фитогель (рН 6,0). Проавтоклавируемая горячая среда разливалась в чашки Петри. Семена высаживались в ламинар-боксе на свежую затвердевшую среду. Чашки изолировались стерильной пластичной парафиновой пленкой с бумажной подложкой фирмы «Parafilm», которая позволяет проходить процессу газообмена, но не пропускает микроорганизмы. Чашки с высаженными семенами выдерживались 2 суток при 4 °С в темноте, что стимулировало их выход из состояния покоя. Затем они помещались в стерильный ростовой термостат с контролируемыми условиями освещения (16 ч света и 8 ч темноты) и температурой (22 °С), где культивировались в течение 6 суток. На 7 сутки проводилась гравистимуляция проростков арабидопсиса путём поворота чашек Петри с растениями в вертикальной плоскости на 90° относительно вектора силы тяжести. И через каждые 30 минут с помощью фотоаппарата проводилась регистрация гравитропической реакции корня на протяжении 5 часов. Фотографии обрабатывались в программе ImageJ, а статистический анализ данных проводился при помощи ANOVA-теста.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования было замечено, что не у всех проростков арабидопсиса в ответ на гравистимуляцию формировался гравитропический изгиб корня. Только 85% растений нокаутной линии *gork1-1* и 70% проростков дикого типа экотипа WS-0 отреагировали на гравистимуляцию, поэтому дальнейшие измерения проводили лишь на этих корнях. На рисунках 1 и 2 показано, что угол наклона корней арабидопсиса линии *gork1-1* был достоверно больше по сравнению с диким типом после 2-часовой гравистимуляции и далее на протяжении всего эксперимента. Также установлено, что скорость роста корней линии *gork1-1* ( $1.21 \pm 0.16$  мм/ч) была выше приблизительно на 60% по сравнению с диким типом арабидопсиса WS-0 ( $0.76 \pm 0.14$  мм/ч).

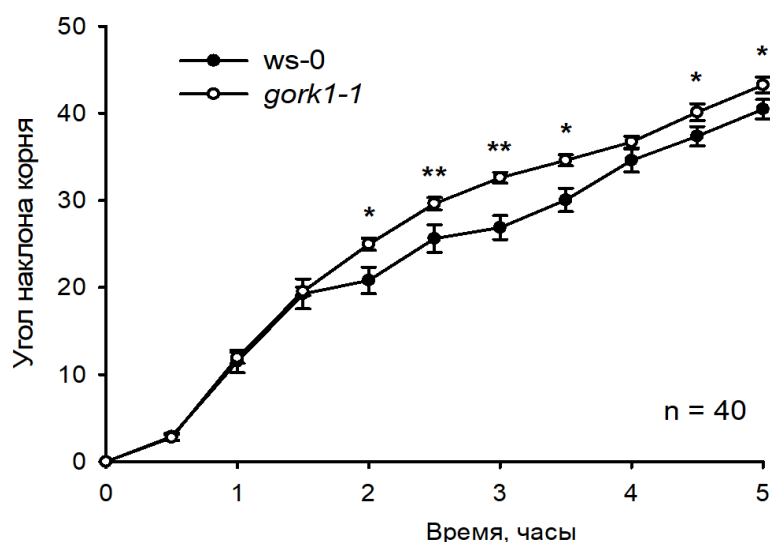


Рис. 1. Изменение угла наклона корней арабидопсиса линий WS-0 и *gork1-1*. Достоверность различий рассчитывалась при помощи ANOVA теста по отношению к дикому типу: \* и \*\* означают  $p < 0,01$  и  $p < 0,001$  соответственно

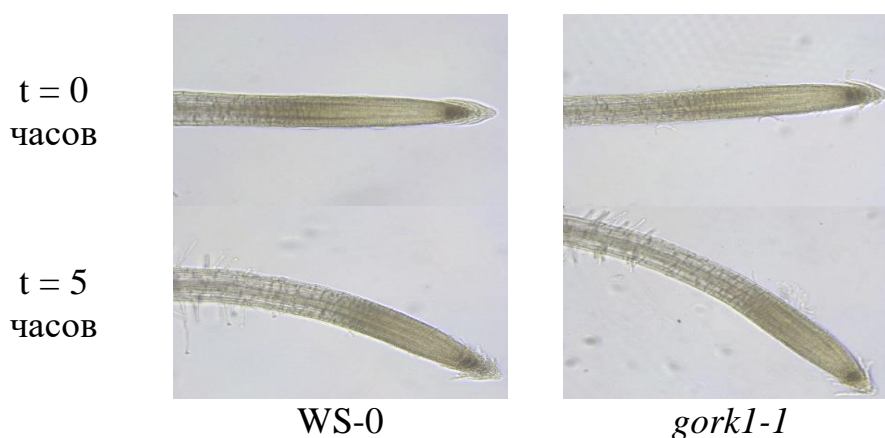


Рис. 2. Фотографии корней арабидопсиса до и после 5-часовой гравистимуляции

При гравистимуляции проростков арабидопсиса происходит деполяризация плазматической мембраны клеток корней, что в свою очередь вызывает вход ионов кальция и выход калия. Реакция растений линии *gork1-1* на гравистимуляцию (рис. 1 и 2), возможно, связана с тем, что при отсутствии гена GORK не происходит значительной утечки ионов калия, что положительно влияет на рост, а, следовательно, гравитропическую реакцию корня растения.

Таким образом, продемонстрировано, что при гравистимуляции проростков арабидопсиса путём поворота на 90° только 70-85% от общего количества растений формировали гравитропический изгиб; 2) угол наклона корней у арабидопсиса линии *gork1-1* достоверно увеличивался по сравнению с диким типом после 2-часовой гравистимуляции; 3) при гравистимуляции скорость роста корней у линии *gork1-1* по сравнению с диким типом была выше на 60%.

#### Библиографические ссылки

1. Пожванов, Г.А., Перестройки актинового цитоскелета в ходе гравитропической реакции корней арабидопсиса/ Г.А. Пожванов, Д.В. Сулов, С.С. Медведев // Цитология. – 2013. – № 55. – С. 28-35.
2. Медведев, С.С. Космическое растениеводство – новый вызов физиологии растений 21 века / С.С. Медведев // Физиология растений – основа создания растений будущего: материалы IX съезда общества физиологов растений России, Казань, 18–24 сентября 2019 г. / Казанский федеральный университет. – Казань. – 2019. – С. 256–356.
3. GORK channel: a master switch of plant metabolism? / G.D. Adem [et al.] // Trends in Plant Science. – 2019. Vol. 25, № 5. – P. 434-454.
4. Пожванов, Г.А. Низкомолекулярные метаболиты, этилен и актиновый цитоскелет вовлечены в регуляцию гравитропического ответа корней *Arabidopsis thaliana* / Г.А. Пожванов // Химия и технология растительных веществ: X Всероссийская научная конференция и школа молодых ученых, Казань, 5-9 июня 2017 г. / ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН. – Казань. – 2017. – С. 83–84.

# ВИДОВОЙ СОСТАВ И ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФИТОПЕРИФИТОНА НА РАЗНЫХ ВИДАХ МАКРОФИТОВ В СОЛИГОРСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Д. О. Сулим

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*sulimdaria@gmail.com*;

науч. рук. – Т. А. Макаревич, канд. биол. наук, доц.

Перифитон, так же как и другие группы гидробионтов, является важной частью гидроэкосистем и занимает особое место в их пространственно-временной структуре. Несмотря на это объём накопленных данных об этой группировке крайне невелик, а методы исследований не унифицированы. Изучение перифитона играет важную роль в исследованиях разнообразных водоёмов и водотоков, особенно испытывающих антропогенную нагрузку. Дальнейшая работа в этой области может повысить потенциал самоочищения для гидроэкосистем, а также внести большой вклад в развитие новых методов биоиндикации поверхностных вод. В этой работе был исследован видовой состав и таксономическая структура фитоперифитона на трёх видах макрофитов: *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton lucens* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. В результате, было выявлено 157 видов водорослей и показано, как таксономическая структура сообществ различается на разных субстратах.

**Ключевые слова:** фитоперифитон, макрофиты, Солигорское водохранилище, видовой состав, флористическое сходство.

## ВВЕДЕНИЕ

Перифитон наряду с другими группировками гидробионтов является неотъемлемой частью гидроэкосистем [2].

Как в общей, так и в прикладной гидробиологии, исследования перифитона занимают существенное место. Роль перифитона в водоемах определяется таксономическим и функциональным многообразием, большой активностью метаболических процессов, высокими показателями обилия.

Жизнедеятельность организмов перифитона, биологические процессы на разделе твердый субстрат-вода в значительной мере связаны с деятельностью человека: создается огромное количество новых благоприятных для развития гидробионтов биотопов, население которых в процессе своей жизнедеятельности изменяют их свойства. Создание новых активных поверхностей, которые заселяются организмами перифитона, рассматривается как действенный инструмент управления биологическими процессами в водоемах, в частности повышения их продуктивности [3].



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования фитоперифитона Солигорского водохранилища было заложено две станции: за городом недалеко от д. Метявичии и в черте города в непосредственной близости от санатория «Берёзка».

Глубина на обеих станциях от 0,3 до 0,5 м; дно песчаное однородное; расстояние от берега примерно 1,5 м. На станции Метявичи прибрежная растительность не густая, в основном представлена зарослями тростника, а на станции Березка – густые заросли тростника. Пробы перифитона отобраны с тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), а также с погруженных макрофитов – рдеста блестящего (*Potamogeton lucens* L.) и рдеста стеблеобъемлющего (*Potamogeton perfoliatus* L.).

Отбор проб в 2020 году проводился с 17 по 19 августа, а в 2021 г. 6 июля. Перифитон собирался с погружённых и прибрежных макрофитов. В 2020 г. в период отбора проб и в течение недели, предшествовавшей сбору материала, температура воздуха была в пределах 18–22 °С, дождей не было, ветер умеренный. В 2021 г. во время отбора проб стояла жаркая погода (+28 °С), наблюдалось обильное цветение воды, было много взвеси. За два дня до сбора материала проходили сильные ливневые дожди.

Для сравнения флористического сходства фитоперифитона на разных видах макрофитов использовали индекс Жаккара, который рассчитывается по формуле:

$$K_j = 100 \frac{c}{a + b - c}$$

где *a* и *b* – число видов в первой и второй сравниваемых пробах;  
*c* – число общих видов в этих пробах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фитоперифитон на исследованных станциях Солигорского водохранилища характеризуется высоким видовым богатством. В результате двухлетних исследований на доминирующих видах макрофитов было выявлено 157 видов водорослей.

Выявленные в перифитоне водоросли относятся к шести отделам: Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanophyta (Cyanoprokaryota), Cryptophyta, Euglenophyta, Dinophyta (Таблица).

### Таксономическая структура фитоперифитона

Отдел	Класс	Порядок	Семейство	Род	Вид
Cyanophyta	2	3	8	13	15
Cryptophyta	1	1	1	2	3
Dinophyta	1	1	1	1	1
Bacillariophyta	2	4	13	19	42
Euglenophyta	1	1	1	3	6
Chlorophyta	4	5	16	27	91

Chlorophyta является доминирующим отделом – представлен 91 видом (около 58 % от общего числа видов). На втором месте по видовому богатству находится отдел Bacillariophyta, представленный 42 видами (26 %) и на третьем месте – отдел Cyanophyta (Cyanoprokaryota) – 15 видов (9 %). Остальные отделы представлены незначительно: из отдела Euglenophyta выявлено 6 видов, из отдела Cryptophyta 3 вида, а из отдела Dinophyta 1 вид. Такая структура в целом характерна для фитоперифитона континентальных вод, что подтверждают литературные источники [2].

Анализ экологии обнаруженных водорослей показал, что подавляющее число видов являются космополитами с широкой экологической валентностью. По биотопической приуроченности в перифитоне преобладают типично планктонные формы и виды, встречающиеся как в планктоне, так и в обрастаниях. На их долю приходится свыше 80 % общего числа видов (рисунок 1).

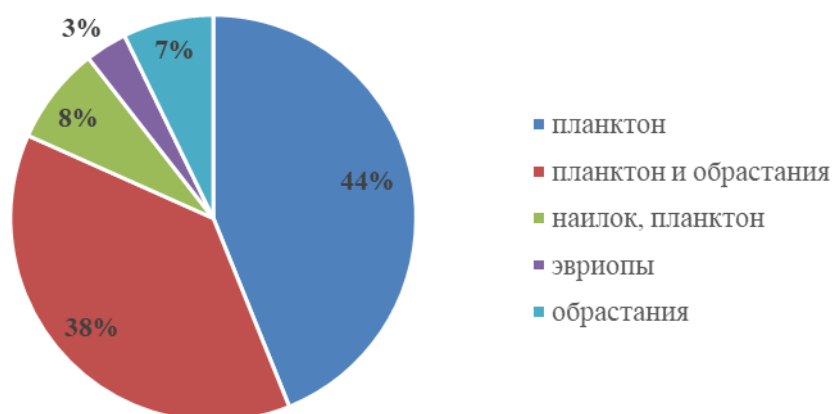


Рис. 1. Соотношение различных биотопических групп водорослей в фитоперифитоне

Сравнение сообществ фитоперифитона на разных видах макрофитов показало, что их таксономическая структура близка. Зелёные и диатомовые водоросли близки по значимости в формировании видового богатства и в сумме составляют около 80 % от общего числа видов. Синезелёные водоросли также вносят свой вклад (около 15 %), остальные отделы представлены незначительно.

На рисунке 2 представлены значения индексов флористического сходства Жаккара альгофлоры перифитона на разных видах макрофитов и на одних и тех же видах макрофитов, произрастающих на разных станциях.

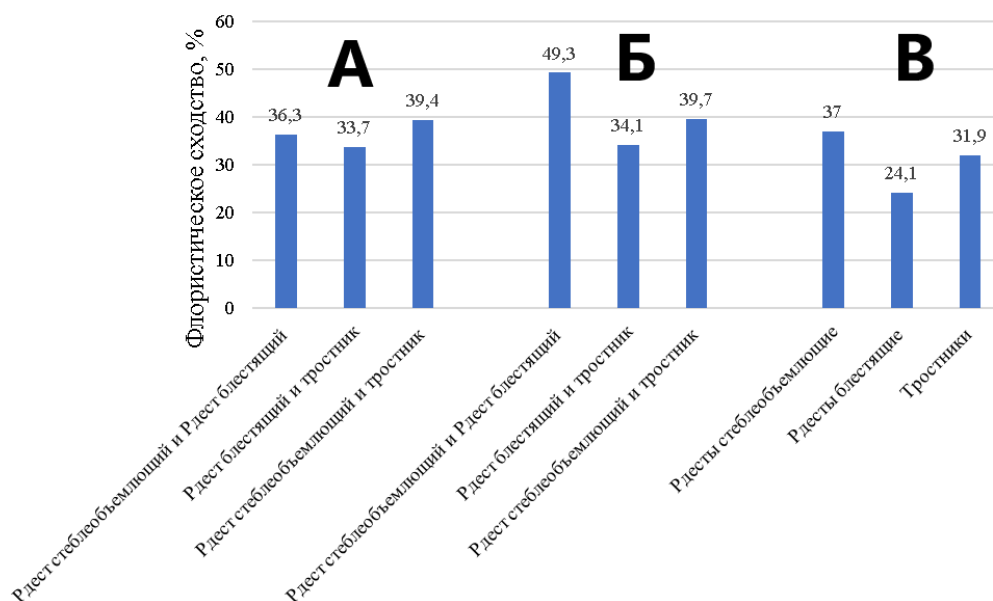


Рис. 2. Сравнение перифитонных сообществ на основании коэффициентов флористического сходства Жаккара (А – ст. Метявичи, Б – ст. Берёзка, В – сравнение фитоперифитона на одних и тех же видах макрофитов, произрастающих на разных станциях)

Видно, что в пределах одной станции значения индексов флористического сходства перифитона на разных видах макрофитов выше, чем на одних и тех же видах макрофитов, но произрастающих на разных станциях. Можно сказать, что условия среды, в которой находится субстрат, вносят больший вклад в формирование перифитонных сообществ, чем факторы, обусловленные морфофункциональными особенностями макрофита-субстрата. Однако, значения индексов всё же указывают на малое соответствие, а также все факторы, обусловленные как видом макрофита-субстрата, так и условиями среды, в которых находится сам макрофит, влияют на состав, структуру, функционирование сообществ не изолированно, а как целостная система [1].

### Библиографические ссылки

1. *Макаревич, Т.А.* Макрофиты как субстрат для перифитона / Т.А. Макаревич, Т.М. Михеева, Е.В. Лукьянова // Вестник БГУ им. В.И. Ленина Сер.2. – 1986. – № 3. – С. 30–33.
2. *Протасов, А.А.* Перифитон пресноводных водоемов, его состав, формирование и значение: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.18 / Ин-т гидробиологии. – Киев, 1991. – 525 с.
3. *Протасов, А.А.* Перифитон как эколопическая группировка гидробионтов / А. А. Протасов // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2010. – №3. – С. 40–56.

# PYTHON КАК УДОБНЫЙ МУЛЬТИТУЛ ПРИ ОЦЕНКЕ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ ГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

И. С. Трусов

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*ivan.trusau@yandex.by;*

науч. рук. – В. В. Гринева, канд. биол. наук, доц.

Появление секвенирования следующего поколения (NGS) привело к генерации огромных объёмов данных. Высокопроизводительные платформы, такие как Illumina HiSeq, производят терабайты необработанных данных, которые требуют быстрой обработки. Контроль качества данных является важным компонентом перед последующим анализом. В рамках нашего проекта по поиску и идентификации полиморфизмов (SNP) в геноме человека мы создали программу на Python, которая позволила нам решить эту проблему. Наша программа выполнена полностью с использованием языка программирования Python. Она может использоваться как автономное приложение и может обрабатывать как сжатые, так и несжатые файлы с данными секвенирования формата *FASTQ*. Наше приложение поддерживает интеграцию Python с другими инструментами и языками программирования с открытым кодом, например, язык программирования R. При оценке данных используется распараллеливание задач с использованием библиотеки Python *multiprocessing*, а общение с пользователем происходит через консоль. Кроме того, наше приложение превосходит по скорости другие аналогичные программы на больших объёмах данных. Приложение доступно по URL-адресу [https://github.com/IvanTrusov/Quality\\_control](https://github.com/IvanTrusov/Quality_control) для быстрой оценки качества данных геномного секвенирования (Illumina).

**Ключевые слова:** NGS; Python; оценка качества; визуализация данных; SNP.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве эталона в данной работе мы использовали самую популярную программу для оценки качества NGS-чтений – *FastQC* [1]. Библиотеки для тестирования были взяты из European Nucleotide Archive (коды доступа библиотек SRR11479148 и SRR1608628). При работе в Python использовались пакеты *pyfastx*, *matplotlib*, *numpy*, *pandas*, *scipy*, *seaborn*, *statsmodels*, *PyPDF2*, *multiprocessing*. Для оценки быстродействия программы на Python использовалась библиотека *time*. Для оценки скорости *FastQC* был использован скрипт на bash с командой *time*. Расчёты проводились на компьютере с 8-ядерным процессором и тактовой частотой 3,2 ГГц и 16 Гб оперативной памяти, а также SSD-диском.

## ЗАГРУЗКА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ ГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ В СРЕДУ РАЗРАБОТКИ PYTHON

Для загрузки данных в среду Python был использован пакет *pyfastx* [2] с функцией *pyfastx.Fastq*. Данный пакет был нами выбран в ходе сравнения скорости загрузки и потребления оперативной памяти между аналогами на Python и со стороны пакетов на языке программирования R [3]. Основными преимуществами данного пакета являются скорость и низкое потребление оперативной памяти. Также *pyfastx* отличается высокой гибкостью, так как при прочтении файла данные могут быть сохранены в любом формате.

В нашей работе для оценки качества библиотеки чтений мы использовали частичный анализ всего файла с данными. Для нахождения репрезентативной выборки мы провели сравнение распределения и плотности качества чтений в разных выборках. В первом эксперименте из библиотеки полноразмерных 150-нуклеотидных чтений были взяты 6 выборок с разным числом чтений (рис. 1 А). По результатам, разницы между 100000 и 1 млн чтений не было выявлено. Во втором эксперименте сравнивались 3 выборки с разным методом генерации и размером 100000 чтений, а также контрольная, представляющая весь файл целиком (рис. 1 Б). По результатам был сделан вывод о том, что 100000 первых чтений достаточно для оценки качества всей библиотеки.

Данные результаты позволили нам существенно увеличить скорость обработки больших объёмов данных, в сравнении с FastQC. Сравнение скорости проводилось на двух библиотеках размером 1 млн чтений (рис. 1 В) и 65 млн (рис. 1 Г) чтений с длиной чтения в 150 нуклеотидов. Из результатов видно, что на 1 млн чтений скорость различается не существенно, однако на 65 млн чтений разница составила в 38,5 раз. Таким образом наш подход позволил существенно выиграть в скорости, при этом не потеряв точности в оценке качества данных геномного секвенирования.

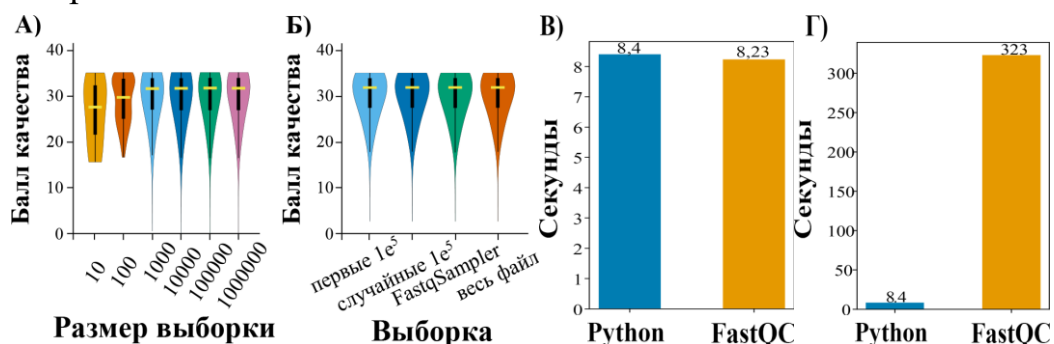


Рис. 1. Распределение качества чтения в зависимости от размера выборки (А) и метода генерации выборки (Б), сравнение скорости между Python и FastQC на 1 млн чтений (В) и на 65 млн (Г)

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ И ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Существует множество критериев для оценки качества первичных данных геномного секвенирования, одними из важнейших являются показатели качества нуклеотидных чтений, а также степень контаминации чтений адаптерами. Для визуализации данных мы использовали библиотеки Python *matplotlib*, *seaborn*, *statsmodels*. Основным изменением в визуальной составляющей, в сравнении с FastQC, является использование столбчатых диаграмм, а также специально подобранная цветовая палитра, способная обеспечить полноценную передачу информации для людей с различными видами дальтонизма (рис. 2). Все алгоритмы, использованные при построении графиков, были написаны без использования сторонних пакетов и библиотек, а также являются аналогичными программе FastQC. Однако для проведения сложных вычислений и удобной работы с данными применялись библиотеки Python *pandas*, *numpy*, *scipy*. Функционал готового приложения на Python является схожим с FastQC. Однако в ходе нашей работы были ряд графиков подвергся доработке, например, график демонстрирующий распределение GC-нуклеотидов вдоль чтения. Мы добавили оценку нормальности этого распределения, представленного в виде Q-Q графика вместе с тестом Шапиро-Уилка, реализованного с помощью пакета *scipy* и *statsmodels*. Данное изменение поможет лучше оценивать загрязнённость и однородность полученной библиотеки коротких чтений. Другим изменением стало добавление графика, показывающего количественное содержание адаптерных подпоследовательностей по каждой позиции в чтении. Данный график может стать очень полезным в тех случаях, когда требуется сохранить определённую длину чтения, при этом избавившись от адаптеров.

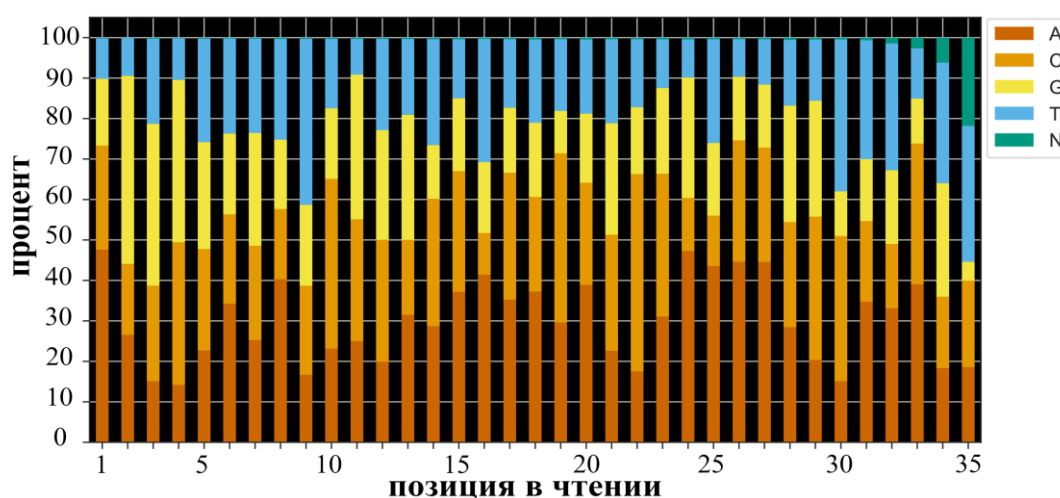


Рис. 2. График доли четырёх основных нуклеотидов для каждой позиции внутри чтения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам нашей работы видно, что язык программирования Python обладает богатым функционалом и удобными инструментами, позволяющими создавать на их основе полноценные организованные проекты с пайплайнами, которые ничем не уступают уже существующим решениям или даже превосходят их. Так как код нашего приложения является открытым, то его можно без проблем редактировать, модифицировать и интегрировать в другие проекты. Также преимуществами являются кроссплатформенность, простота в установке и использовании. Выходной формат данных представлен в виде файла с векторными графиками формата *PDF*, что обеспечивает удобный доступ как для просмотра, так и для редактирования.

Таким образом по итогам работы мы получили очень удобную и гибкую программу, которая позволяет нам очень быстро проводить оценку данных геномного секвенирования. Кроме того, благодаря интеграции с другими программами обеспечивается прямая передача полученных результатов последующим этапом анализа, что обеспечивает быстроту не только оценки качества данных, но и всего процесса анализа в целом.

### Библиографические ссылки

1. *FastQC*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc>. – Дата доступа: 10.05.2022.
2. *Python module for fast access to sequences from FASTA/Q file*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/lmdu/pyfastx>. – Дата доступа: 31.03.2022.
3. *Гринев, В. В* Оценка качества данных массового параллельного секвенирования в средах программирования R и Python / *В. В. Гринев* [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): материалы III междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апреля 2022 г / БГУ. – Минск, 2022. – С. 306–309.



# ХАРАКТЕРИСТИКА БАКТЕРИОФАГА ERWINIA AMYLOVORA, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Е. А. Турков

Белорусский государственный университет, г. Минск;

egorturkov@tut.by;

науч. рук. – А.Л. Лагоненко, канд. биол. наук, доц.;

Н.В. Бесараб, ассист.

В ходе данной работы был выделен бактериофаг EP1, способный заражать клетки *Erwinia amylovora* и *Pantoea agglomerans*. На основании анализа морфологии капсида и последовательности фрагмента генома фаг EP1 был предварительно отнесен к семейству *Autographiviridae*.

**Ключевые слова:** *Erwinia amylovora*, бактериальный ожог, фитопатогены, бактериофаги

## ВВЕДЕНИЕ

Фитопатогенная бактерия *Erwinia amylovora* является возбудителем бактериального ожога плодовых и отнесена к карантинным объектам стран Европейской Организации Защиты Растений. В Республике Беларусь бактериальный ожог был впервые выявлен в 2007 году [3]. Основными методами борьбы с этой болезнью являются применение антибиотиков и медьсодержащих препаратов. Однако, использование антибиотиков против патогенов растений ограничено, в связи с рисками развития устойчивости к антибиотикам у патогенов человека, а использование препаратов на основе меди приводит к ее накоплению в почве и отдельных частях растения [4]. На данный момент в фитопатологии развивается направление, связанное с использованием бактериофагов в качестве средства борьбы с фитопатогенами [2].

Целью данной работы является выделение бактериофагов *Erwinia amylovora* и их микробиологическая и молекулярно-биологическая характеристика.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы, проверяемые на наличие бактериофага, инкубировали с индикаторным штаммом *Erwinia amylovora* 1/79Sm и на следующий день культуральную жидкость центрифугировали и супернатант проверяли на наличие бактериофага методом агаровых слоев по Грациа.

Титр фага определяли методом агаровых слоев (метод Грация). Для получения концентрированных препаратов частицы фага из фаголизита штамма *Erwinia amylovora* 1/79Sm осаждали путем добавления полиэтиленгликоля (мол. вес 6000) до 6 %-ной концентрации с последующим центрифугированием при 40000 g 30 мин. Осадок ресуспензировали в малом объеме ТЕ-буфера. Полученные суспензии использовали для выделения нуклеиновой кислоты бактериофага.

Спектр литического действия определяли путем нанесения капли суспензии бактериофага на газон испытываемого штамма, приготовленный методом агаровых слоев. Чашки инкубировали при оптимальной температуре в течение 24 ч.

Выделение ДНК из фаговых частиц осуществляли по следующей методике: к 100 мкл концентрированной суспензии бактериофага добавляли 100 мкл 0,5 моль/л ЭДТА и 1 мкл 10 % ДСН, перемешивали и инкубировали при 65 °С 15 мин. К лизату добавляли равный объем хлороформа, перемешивали 3 мин и затем разделяли фазы центрифугированием в течение 3–5 мин. Осторожно, не затрагивая белого осадка, отбирали водную (верхнюю) фазу и переносили в чистую пробирку, добавляли равный объем насыщенного буфером ТЕ фенола и тщательно перемешивали до образования однородной эмульсии. Разделяли фазы центрифугированием в течение 3 мин при 12000 g, аккуратно отбирали водную фазу в чистую пробирку. Добавляли равный объем охлажденного до –20 °С этанола и осаждали выпавшую в осадок ДНК центрифугированием 10 мин при 12000 g.

Ферментативные реакции с ДНК и гель-электрофорез проводили согласно стандартным методикам.

Для негативного контрастирования сконцентрированных высокоскоростным центрифугированием фаговых частиц использовался 3% раствор ацетата урана. Анализ морфологии частиц бактериофага проводился на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi H-800 в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

Вектор со вставкой фрагмента генома бактериофага был передан в Институт микробиологии НАН Беларуси Валентовичу Леониду Николаевичу для проведения секвенирования по Сенгеру. Секвенирование проводили на приборе Li-Cor 4300.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате данной работы был из образца огуречного рассола был выделен бактериофаг *Erwinia amylovora*. Выделенный бактериофаг (здесь и далее EP1) на индикаторной культуре формировал круглые,

прозрачные негативные колонии различного размера (1–2 мм в диаметре) с мутным, нечетким краем и без признаков вторичного роста (рис. 1). Многократные пассажи как крупных, так и мелких негативных колоний бактериофага приводили к одинаковому результату – формированию разнородных по размеру колоний. Для определения спектра литического действия фага EP1 были использованы коллекционные штаммы бактерий *Erwinia amylovora* и *Pantoea agglomerans*.

Исследуемый штамм	Бактериофаг EP1
<i>Erwinia amylovora</i> E2	+
E3	+
E4	+
E5	+
L-3-1	+
L-3-2	+
L-3-5	+
L-3-6	+
L-3-8	+
<i>Pantoea agglomerans</i> 194	-
197	-
198	+
216	+
219	-
220	-
221	-
222	+
228	-

Примечание. Подавление роста бактерий фагом обозначается знаком “+”, отсутствие наблюдаемого подавления роста – “-”.

Для определения систематического положения выделенного бактериофага была изучена морфология его частиц. По данным электронной микроскопии, EP1 – бактериофаг с икосаэдрической головкой (диаметр 65-70нм) и коротким несократимым хвостом (рис. 2). Исходя из полученных данных, фаг EP1 был отнесен к морфотипу С.

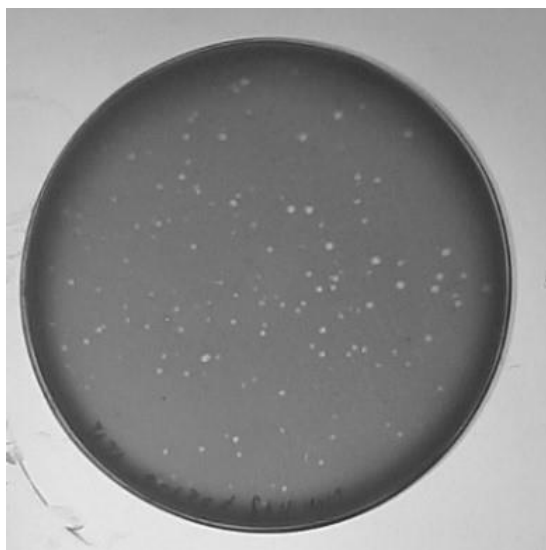


Рис. 1. Морфология негативных колоний бактериофага EP1

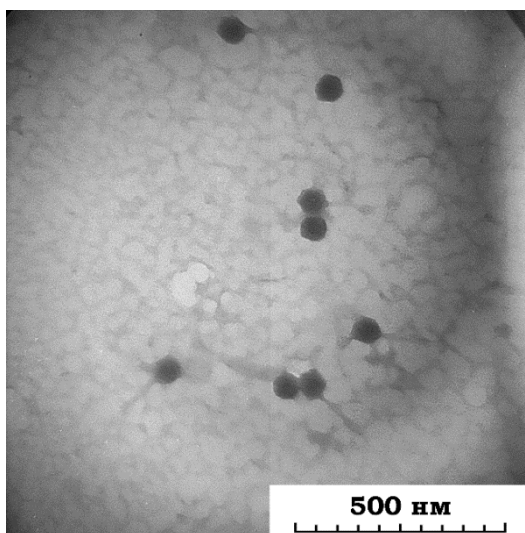


Рис. 2. Микрофотография фаговых частиц EP1, полученная на просвечивающем микроскопе Hitachi H-800

На следующем этапе работы, ДНК изучаемого бактериофага была очищена и подвергнута рестрикционному анализу с использованием ферментов PstI, HindIII, EcoRI, XhoI, BamHI. ДНК EP1 разрезалась лишь одной рестриктазой – EcoRI. Для выяснения систематического положения фага, фрагмент его генома был клонирован в векторе pUC18 и частично секвенирован. В результате была определена последовательность длиной 807 пар оснований, на 70,63% идентичная участку генома бактериофага LIMelight. Бактериофаг LIMelight на газоне бактерий *Pantoea agglomerans* образует мелкие негативные колонии диаметром 1мм, так же он способен поражать *Erwinia amylovora*. Его капсид представлен икосаэдрической головкой диаметром около 60 нм и коротким несократимым хвостом длиной около 12 нм,

относится к семейству *Autographiviridae* и имеет геном размером 44546 п.о. [1]. Исходя из полученных данных можно предположить, что выделенный в ходе данной работы бактериофаг EP1 также относится к семейству *Autographiviridae*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был выделен бактериофаг EP1. Было установлено, что данный фаг обладает литической активностью в отношении бактерий *Erwinia amylovora* и *Pantoea agglomerans*. Были получены микрофотографии фаговых частиц и секвенирован фрагмент генома фага размером 807 пар оснований. Исходя из данных, полученных в ходе молекулярно-генетического анализа, можно предположить, что бактериофаг EP1 относится к семейству *Autographiviridae*.

Выражаем отдельную благодарность Валентовичу Леониду Николаевичу за предоставление возможности секвенирования и Комарову Фадею Фадеевичу за предоставление возможности получения микрофотографий бактериофагов при помощи электронного микроскопа.

## Библиографические ссылки

1. Adriaenssens, Evelien M., Pieter-Jan Ceysens, Vincent Dunon, Hans-Wolfgang Ackermann, Johan Van Vaerenbergh, Martine Maes, Maurice De Proft, и Rob Lavigne. «Bacteriophages LIMelight and LIMEzero of *Pantoea Agglomerans*, Belonging to the “PhiKMV-Like Viruses”». *Applied and Environmental Microbiology* 77, вып. 10 (15 май 2011 г.): 3443–50.
2. Jones, J B, L E Jackson, B Balogh, A Obradovic, F B Iriarte, и M T Momol. «Bacteriophages for Plant Disease Control\*», 2007 г., 20.
3. Lagonenko, A.L., Komardina, V.S., Nikolaichik, Y.A. and Evtushenkov, A.N. (2008), First Report of *Erwinia amylovora* Fire Blight in Belarus. *Journal of Phytopathology*, 156: 638-640.
4. McManus, Patricia S, Virginia O Stockwell, George W Sundin, и Alan L Jones. «ANTIBIOTIC USE IN PLANT AGRICULTURE», 2002 г., 27.

# НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ЭКОЛОГИИ И БИОЛОГИИ ШМЕЛЕЙ (*BOMBUS LATR.*) И ШМЕЛЕЙ-КУКУШЕК (*PSITHYRUS LEP.*) НА ТЕРРИТОРИИ МИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. И. Хвир

Белорусский государственный университет, г. Минск;

daryalauryenia@gmail.com;

науч. рук. – С. В. Буга, д-р биол. наук

Аннотация. На основании сборов 2017–2021 гг. нами, на территории Минской области зарегистрировано 23 вида шмелей и 8 видов шмелей-кукушек. Анализ изменений состава и структуры фауны шмелей и шмелей-кукушек Минской области, проведенный нами, показал значительное обеднение фауны рода *Bombus* на исследуемой территории. Доминантными на территории Беларуси по результатам наших сборов являются виды шмелей *B. pascuorum*, *B. lucorum*, *B. lapidaries*, из шмелей-кукушек – *P. bohemicus*, *P. campestris*, *P. barbutellus*. К субдоминантным видам отнесены *B. sylvarum*, *B. muscorum*, *B. hypnorum*, *B. jonellus*, *B. ruderarius*. Остальные виды встречались значительно реже или в единичных экземплярах. На основании полученных данных *B. muscorum*, *B. lapidarius* отнесены нами к видам открытых биотопов, *B. pascuorum* – к лесным видам, *B. lucorum*, *B. soroensis* – к эвритопным видам.

**Ключевые слова:** Aculeata, фауна Беларуси, опылители.

Основная масса опылителей — пчелиные, однако роль отдельных видов в опылении различных сельскохозяйственных культур неравнозначна, а в ряде случаев и вовсе ничтожна.

Важная роль, которую играют шмели в сельскохозяйственных биоценозах, привлекала внимание многих исследователей. С практической точки зрения наибольшее значение приобретает изучение шмелей как опылителей хозяйственно значимых растений. Между тем, численность шмелей в природных биоценозах в настоящее время является не всегда достаточной даже для опыления посевов сельскохозяйственных культур, не говорят уже о том, что шмели являются эффективными опылителями многих культивируемых растений [4].

Широко используется для опыления сельскохозяйственных растений медоносная пчела – третичное лесное насекомое Евразии. Она — широкий политроф, и отлично приспособлена для опыления различных растений. Но, по мере расширения ареала медоносной пчелы, в результате ее расселения человеком, и продвижения на север южных сельскохозяйственных культур, медоносная пчела встретила растениями имеющие специализированные цветки, опылять которые она оказалась не в состоянии. В связи с этим, появилась необходимость искать альтернативу *Apis mellifera* [2, с. 220-245]. Таковой могут быть как раз шмели.

Сбор энтомологических материалов выполнялся нами в течение четырех полевых сезонов на территории районов Минской области. С целью выяснения биотопической приуроченности отдельных видов нами были обследованы самые разнообразные биотопы: посеvy культурного красного клевера, луговое разнотравье, опушки, поляны, просеки, травостой в различных типах лесов.

Основным из применяемых методов для выяснения видового разнообразия, экологии и биотопической приуроченности шмелей и шмелей-кукушек был индивидуальный сбор насекомых при помощи марлевого сачка и морилки. При этом, как правило, учитывались растения, на которых был произведен отлов, регистрировалась дата отлова, отмечались погодные условия и тип биотопа. Полученные данные сведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные данные по составу и числу шмелей в Минской области в период 2017-2021 гг.

Вид	Экземпляров	%
<i>B. subterraneus</i> L.	3	0,8
<i>B. sylvarum</i> L.	21	5,6
<i>B. lucorum</i> L.	53	14,0
<i>B. pascuorum</i> Scop.	62	16,4
<i>B. subbaicalensis</i> Vogt.	1	0,3
<i>B. lapidarius</i> L.	44	11,7
<i>B. muscorum</i> L.	35	9,3
<i>B. schrencki</i> Mor	7	1,9
<i>B. humilis</i> Illiger	11	2,9
<i>B. hypnorum</i> L.	16	4,2
<i>B. terrestris</i> L.	66	17,5
<i>B. pratorum</i> L.	3	0,8
<i>B. jonellus</i> Kirby	12	3,2
<i>B. ruderarius</i> Muller	18	4,8
<i>B. pomorum</i> Panzer	6	1,6
<i>B. semenoviellus</i> Skor.	2	0,5
<i>B. confusus</i> Sch.	2	0,5
<i>B. laesus</i> Moraw.	1	0,3
<i>B. ruderatus</i> Fabr.	6	1,6
<i>B. distinguendus</i> Fabr.	1	0,3
<i>B. veteranus</i> Fabr.	1	0,3
<i>B. soroensis</i> Fabr.	2	0,5
<i>B. hortorum</i> L.	4	1,1
<i>B. serrisquama</i> F.	-	-
<b>Всего</b>	<b>377</b>	<b>100</b>

Большая стабильность шмелей-кукушек может быть обусловлена их паразитическим образом жизни, наличием у большинства из обнаруженных видов не одного, а нескольких видов гнездовых хозяев и, как следствие этого, значительное смягчение отрицательного воздействия антропогенных факторов на их фауну [1, с.518]. Лишь численность *P. rupestris* B., паразитирующего только в гнездах *lapidarius*, существенно уменьшилась в связи с уменьшением общего числа количества вида-хозяина.

Таблица 2

Соотношение численности шмелей-кукушек  
в вегетационный период 2017-2021 гг.

Вид	Экземпляров	%
1. <i>P. bohemicus</i> Seide	27	21,3
2. <i>P. vestalis</i> Pour.	4	3,1
3. <i>P. rupestris</i> Fabr.	22	17,3
4. <i>P. campestris</i> Panz.	53	41,2
5. <i>P. barbutellus</i> Kirby	14	11
6. <i>P. quadricolor</i> Lep.	1	0,3
7. <i>P. sylvestris</i> Lep.	5	3,9
8. <i>P. norvegicus</i> Spa.	1	0,3
<b>Всего</b>	<b>127</b>	<b>100</b>

Таким образом, на основании сборов 2017-2021 гг. нами, на территории Минской области зарегистрировано 23 вида шмелей и 8 видов шмелей-кукушек. Анализ изменений состава и структуры фауны шмелей и шмелей-кукушек проведенный нами, показал значительное обеднение фауны рода *Bombus* на исследуемой территории. Так, *B. muscorum*, *B. sylvarum*, *B. ruderarius* описываемые Добротворским как массовые, встречаются нами значительно реже, а *B. muscorum* в настоящий момент занесен в Красную Книгу республики. Доминантными на территории Беларуси оказались виды шмелей *B. pascuorum*, *B. lucorum*, *B. lapidaries*, из шмелей-кукушек – *P. bohemicus*, *P. campestris*, *P. barbutellus*. К субдоминантным видам отнесены *B. sylvarum*, *B. muscorum*, *B. hypnorum*, *B. jonellus*, *B. ruderarius*. Остальные виды встречались значительно реже или в единичных экземплярах.

На основании полученных данных *B. muscorum* *B. lapidarius* отнесены нами к видам преимущественно открытых пространств, *B. pascuorum* – к лесным видам, *B. lucorum*, *B. soroensis* – к эвритопным видам.

Нами отмечена большая привязанность самок и рабочих особей шмелей к бобовым растениям, в первую очередь к красному клеверу, а



также предпочтение самцов обоих исследуемых родов сложноцветных с высокорасположенными соцветиями. Главная причина, на наш взгляд, заключается в том, что соцветия этих растений, высоко расположенные стоящие в основном на открытых местах, используются самцами в качестве своеобразных «смотровых площадок» для фиксирования пролетающих самок.

#### Библиографические ссылки

1. Дабратворскі, М. У. Чмялі – зязюлі (Hymenoptera, Psithyridae) / М. У. Дабратворскі. Менск.; Наш край, — 1928. – № 4. – 21–23 с.
2. Пономарева, А.А. Семейство Apoidea // Определитель насекомых Европейской части СССР / А.А. Пономарева, А.З. Осычнюк, Д.В. Панфилов. – Т. 3. Перепончатокрылые, часть 1. – Москва; Ленинград: Наука, 1978. – С. 279–519.
3. Радченко В.Г., Песенко Ю.А. Биология пчел (Hymenoptera, Apoidea). – СПб.: ЗИН РАН СССР, 1994. – 350с.
4. Michener, C.D. The bees of the world / C.D. Michener. – Pasadena: The John Hopkins University press, 2007. – 913 p.
5. Williams, P.H. An annotated checklist of bumble bees with an analysis of patterns of description / P.H. Williams // Bulletin of the Natural History Museum. – 1998.–№67.– pp. 79-152.

# ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПЛАСТИКА В РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЯХ НА *DAPHNIA CRISTATA* G. O. SARS, 1862 МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

Ю. Н. Хотянович

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*yulexotuan@gmail.com;*

*науч. рук. – Т. А. Макаревич, канд. биол. наук, доц.*

Пластик перерабатывается в мире только на одну четвертую. Под воздействием многих абиотических факторов пластик распадается на микропластик, который попадает во все организмы, в том числе организм человека. В работе проведено биотестирование с использованием цельного образца пластиковой упаковки, измельченной до 2 см и до микропластиковой пыли. Проведены острые тесты (96 ч) на смертность и хронические, в которых отслеживались репродуктивные изменения тестируемого тест-объекта *Daphnia cristata*: время полового созревания, продолжительность беременности, количество потомков, их жизнеспособность. Оценивалось влияние одной и той же упаковки в разных фракциях для выявления фракции, которая оказывает сильнейшее токсическое воздействие на дафний, и оказывает ли вообще пластик токсическое действие.

**Ключевые слова:** биотестирование, исследование токсичности, микропластик, острый тест, хронический тест.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Токсичность различных типов пластиковой упаковки определялась в процессе постановки острых и хронических тестов биотестирования.

Брали образцы пластиковых упаковок различных маркировок, из них вырезались образцы площадью поверхности  $S=13 \text{ см}^2$ , а также аналогичные по размеру образцы тех же упаковок дополнительно повреждались, разрезались на частицы 0,6-2 см и измельчались до микропластика размером до 0,2 см (пластиковой пыли).

Образцы помещали в емкости с объемом культуральной жидкости  $V=0,25 \text{ л}$ . В контрольных емкостях образцы упаковок отсутствовали. Для кормления дафний использовалась *Chlorella sp.*, культивируемая в среде Тамия [1].

Острый тест проводился в течение 4 суток (96 ч) [2]. Результаты хронических тестов анализировались в сравнении с контролем по количеству потомков и их жизнеспособности, по времени полового созревания (первой закладки яиц), длительности беременности дафний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Критерием острой токсичности служит гибель 50% и более дафний за 96 часов в исследуемой воде при условии, что в контроле гибель не превышает 10% [3]. Для вычисления смертности рассчитывают процент погибших в тестируемой пробе дафний (А, %) по сравнению с контролем:

$$A = \frac{X_k - X_t}{X_k} 100\%,$$

где  $X_k$  – количество выживших дафний в контроле,

$X_t$  – количество выживших дафний в тестируемой воде.

При  $A \leq 10\%$  тестируемая проба воды не оказывает токсического воздействия. При  $A \geq 50\%$  тестируемая вода оказывает острое токсическое действие [4].

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Смертность тест-объекта при проведении острого теста (96ч)

Маркировка пластика	Смертность дафний в сосудах с цельным образцом пластика, %	Смертность дафний в сосудах с поврежденным и измельченным образцом пластика, %	Смертность дафний в сосудах с микропластиком, %
Контроль	0	0	0
Полиэтилентерефталат (PET)	23	23	38
Полиэтилен высокого давления (HDPE)	15	23	15
Поливинилхлорид (PVC)	15	15	23
Полиэтилен низкого давления (LDPE)	23	54	61,5
Полипропилен (PP)	15	23	23
Полистирол (PS)	100	15	23
Другие(OTHER)	15	38	53,8

Острое токсическое воздействие может оказывать PS в цельном виде и LDPE в поврежденном виде и в виде микрочастиц, а также микропластик с маркировкой OTHER. При этом стоит отметить, что

пластик в любом виде оказывает токсическое действие, минимальная смертность составляет 15% и в среднем составляет 30%.

Результаты хронического теста определялись по репродуктивным показателям тест-объектов (таблица 2).

Таблица 2

**Сравнение результатов при проведении хронического биотестирования**

	Наступление половозрелости, сут	Продолжительность беременности, сут	Количество потомков на одну дафнию из тестируемых, шт
Контроль	4	6	19
PEТ (цельный)	9	4	5
PEТ (измельченный)	12	4	5,9
PEТ (микрочастицы)	9	4	7
HDPE (цельный)	10	4	1
HDPE (измельченный)	-	-	-
HDPE (микрочастицы)	-	-	-
PVC (цельный)	5	5	7
PVC (измельченный)	10	5	2,2
PVC (микрочастицы)	11	4	2,5
LDPE (цельный)	7	5	3,36
LDPE (измельченный)	4	3	3,8
LDPE (микрочастицы)	5	3	4,5
PP (цельный)	8	4	8,2
PP (измельченный)	10	4	2,7
PP (микрочастицы)	10	5	3
PS (цельный)	-	-	-
PS (измельченный)	5	5	5,45
PS (микрочастицы)	5	4	5,6 + 2 мертвые
OTHER (цельный)	5	5	3,63
OTHER (измельченный)	10	4	2,8
OTHER (микрочастицы)	10	3	4,3

Таким образом, все образцы, на которых ставился хронический тест, в той либо иной степени оказывают влияние на репродуктивность дафний. Увеличивается время полового созревания во всех емкостях с пластиком. Отклонения от нормы не было в повторности с полиэтиленом низкого давления. Максимальное отклонение от нормы наблюдалось в сосуде с измельченным полиэтилентерефталатом, где наступление половозрелости происходило в 3 раза дольше, чем в контроле.

Продолжительность беременности в среднем короче на 25%. При этом максимальное отклонение от нормы наблюдалось в сосуде с полиэтиленом низкого давления (измельченным и микрочастицами), и микропластиком OTHER где продолжительность беременности была на 50% больше от контрольного образца.

#### **Библиографические ссылки**

1. Бужаев, Д. М. Особенности накопления биомассы микроводоросли *Chlorella vulgaris* в присутствии ионов марганца / Д. М. Бужаев, Е. М. Кандыба, А. И. Лакишик. – Пинск: Полесский государственный университет, 2017.
2. Жукова, А. А. Биоиндикация качества природной среды: пособие / А. А. Жукова, С. Э. Мастицкий. – Минск: БГУ, 2014. – 112 с.
3. Мелехова, О. П. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / О. П. Мелехова, Е. И. Сарапульцева – Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.
4. Мисейко, Г. Н. Биологический анализ качества пресных вод / Г. Н. Мисейко, Д. М. Безматерных, Г. И. Тушкова. – Барнаул: АлтГУ, 2001. – 201 с.

# ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ШИКИМОВОЙ КИСЛОТЫ ШТАММАМИ *B.SUBTILIS* С ИНАКТИВИРОВАННЫМ ГЕНОМ ШИКИМАТКИНАЗЫ

ЮЙ ЧАО

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
cygoodluck1989@gmail.com;  
науч. рук. – А. В. Лагодич, канд. биол. наук, доц.

В результате выполнения настоящей работы были изучены особенности синтеза шикимовой кислоты штаммами *B. subtilis 168wt21CSA* и *B. subtilis 5434p4SA*, полученными ранее путем инактивации гена шикиматкиназы, что обеспечило им возможность накопление шикимовой кислоты в ферментационной среде в концентрациях, превышающих значения исходных штаммов в 2-3 раза.

Путем измерения концентрации шикимовой кислоты в среде культивирования анализируемых штаммов была произведена оценка эффективности синтеза шикимовой кислоты от условий культивирования и состава питательной среды. Оценен вклад влияния концентраций источника углерода (глюкозы) и концентраций аминокислот на титр шикимовой кислоты в ферментационной среде в условиях прерывистого культивирования. Определены оптимальные условия для ее синтеза, позволяющие обеспечить выход до 808 мкг/мл для штамма *B. subtilis 168wt21CSA* и 1385 мкг/мл для штамма *B. subtilis 5434p4SA*.

**Ключевые слова:** шикимовая кислота; метаболитический путь шикимовой кислоты; ретроингибирование; оптимизация состава ферментационной среды.

Штаммы *B.subtilis 168wt21CSA* и *B.subtilis 5434p4SA*, были получены на основе штаммов *B.subtilis 168wt* и *B.subtilis* ВКПМ5434 в результате инактивации гена *aroK* путем гомологичной рекомбинации [1].

Бактериальные культуры выращивали в жидких и на плотных питательных средах LB [2]. Ферментация осуществлялась в среде Spizizen [3] с глюкозой в различных концентрациях (0,5%; 1%; 2%). Смесь аминокислот (продуктов преобразования шикимата - тирозин, триптофан и фенилаланин) дополнительно добавляли в ферментационную среду до достижения следующих концентраций 12,5мкг/мл; 25мкг/мл; 50мкг/мл. Агаризованные среды содержали 1,5 % агара.

Рост клеток контролировали путем измерения оптической плотности при 600 нм (ОП<sub>600</sub>) с помощью УФ спектрофотометра. Количество сырой биомассы клеток, полученных в ферментационной среде, определяли как прямым методом (осаждение, промывка, взвешивание), так и с использованием калибровочной кривой зависимости величины ОП<sub>600</sub> от биомассы и количества клеток.

Для детекции шикимовой кислоты использовали жидкостной хроматограф LCMS-2020 (Shimadzu, Япония). Спектры поглощения

регистрировали в потоке с помощью детектора на основе фотодиодной матрицы SPD-M20A (Shimadzu, Япония).

Супернатанты анализировали с помощью HPLC (колонка Allure C18, 4,6 мм × 150 мм, 5 мкм), температура колонки составляла 40 °С. HPLC проводили со смесью метанола и муравьиной кислоты при скорости потока 0,5 мл / мин, время работы 20 мин. Условия градиента мобильной фазы представлены в таблицах 1 и 2.

*Таблица 1*

**Условия хроматографического разделения**

<b>Время, мин</b>	<b>H<sub>2</sub>O, %</b>	<b>Метанол, %</b>	<b>1% муравьиная кислота, %</b>
0-12	88-80	2-10	10
12-13	80-0	10-90	10
13-15	0	90	10
15-20	88	2	10

Стандарт шикимовой кислоты элюировался на 2,9 мин в этих условиях.

*Таблица 2*

**Условия хроматографического разделения модифицированные**

<b>Время (мин)</b>	<b>H<sub>2</sub>O, %</b>	<b>Метанол, %</b>	<b>1% муравьиная кислота, %</b>
0-12	97-92	2-7	1
12-13	92-4	7-95	1
13-15	4	95	1
15-20	97	2	1

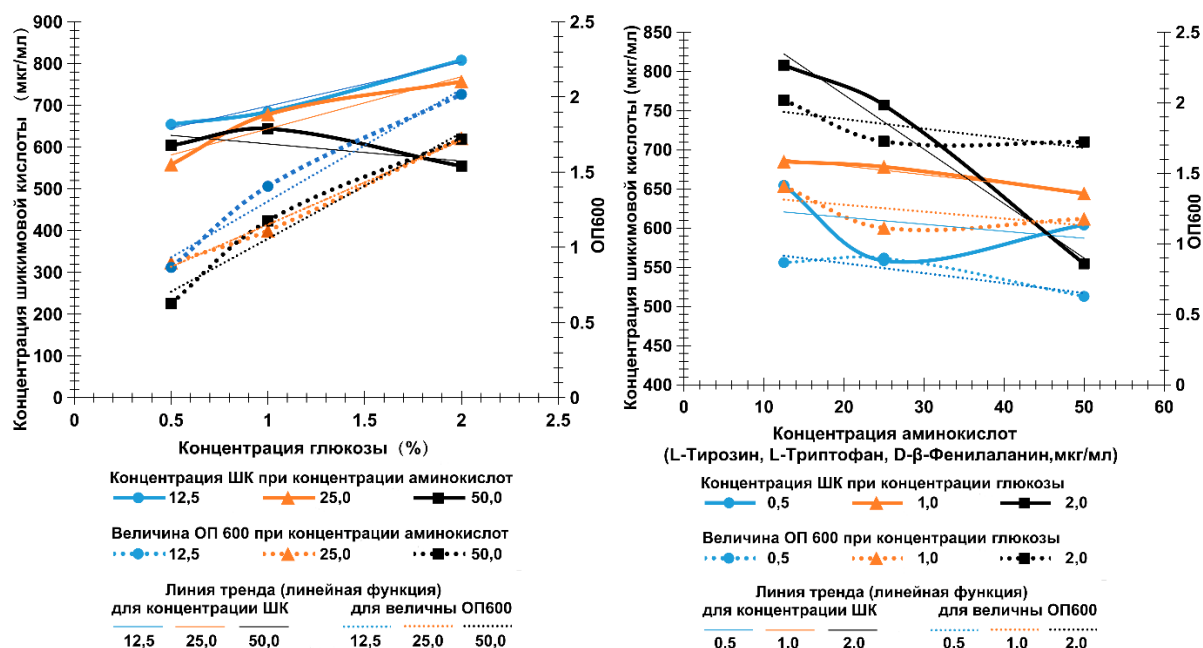
Стандарт шикимовой кислоты элюировался на 2,7 мин в этих условиях.

Обнаружение и измерение концентрации шикимовой кислоты проводили при 210 нм с помощью детектора на основе фотодиодной матрицы SPD-M20A [4 ,5].

Вклад различных концентраций источников углерода и азота на эффективность синтеза шикимовой кислоты определяли в серии экспериментов с контролируруемыми монофакторными изменениями. Для оценки эффективности синтеза шикимовой кислоты были использованы три уровня следующих двух факторов: исходные концентрации глюкозы и аминокислот в среде культивирования. Полученные результаты обобщали с использованием ортогонального теста [6].

Для выявления оптимальных условий культивирования штаммов-продуцентов шикимовой кислоты была осуществлена серия опытов, в

которых штаммы выращивали при изменении следующих контролируемых условий (по отношению к ферментационной среде): начальная концентрация глюкозы 0,5%, 1%, 2%; начальная концентрация аминокислот 12,5 мкг/мл, 25 мкг/мл, 50 мкг/мл; доля инокулята 5%, 10%, 20%; время культивирования – 48 и 72 часа. Пример анализируемых значений концентрации шикимовой кислоты при разных условиях культивирования представлен на рисунке.



А

Б

Эффективность накопления шикимовой кислоты в культуральной жидкости от состава ферментационной среды и параметров культивирования: А) прямая зависимость синтеза шикимовой кислоты от концентрации глюкозы (на примере штамма *B. subtilis 168wt21CSA*, 10% инокулята, ферментация 72 часа); Б) обратная зависимость синтеза шикимовой кислоты от концентрации аминокислот (на примере штамма *B. subtilis 5434p4SA*, 10% инокулята, ферментация 72 часа)

Данные, представленные на рисунке 1, наглядно демонстрируют, что высокая концентрация глюкозы приводит к более эффективному синтезу шикимовой кислоты и, как следствие, более высокому титру шикимата в культуральной среде, а снижение концентрации конечных метаболитов шикимата позволяет существенно усилить этот эффект.

Вклад различных концентраций глюкозы и аминокислот на уровень синтеза шикимовой кислоты дополнительно рассчитывали с помощью ортогонального теста. Для обоих анализируемых штаммов была продемонстрирована прямая корреляционная зависимость эффективности синтеза шикимовой кислоты от концентрации глюкозы и



обратная от продуктов шикиматного пути, однако соотношение значений R было различно. Для штамма *B.subtilis 168wt21CSA* было продемонстрировано, что показатели вклада концентраций глюкозы и аминокислот примерно одинаковы, с небольшим преобладанием последних: Rглюкоза(100)<Раминокислота(115). Для штамма *B.subtilis 5434p4SA* вклад концентрации глюкозы в регуляцию синтеза шикимовой кислоты был более существенным: Rглюкоза(156)>Раминокислота(77). Полученные результаты свидетельствуют о явлении ретроингибирования, которое в меньшей степени проявляется у штамма *B.subtilis 5434p4SA*. С использованием оптимизированных условий для штаммов *B. subtilis 168wt21CSA* и *B.subtilis 5434p4SA* был определен максимальный титр шикимата в ферментационной среде равный 808 мкг/мл и 1385 мкг/мл, соответственно.

#### Библиографические ссылки

1. Chao Y., Lahodzich AV. Analysis of the efficiency factors of electro-transformation of *Bacillus subtilis* to inactivate the *aroK* gene by the method of homologous recombination //Journal of the Belarusian State University. Biology. 2021; № 2. P. 64–73.
2. Sambrook J., Fritsch E., Maniatis T. Molecular cloning : a laboratory manual. 2nd ed. New York : Cold Spring Harbor Lab. : Cold Spring Harbor Publishing, 1989.
3. Anagnostopoulos C., Spizizen J. Requirements for transformation in *Bacillus subtilis* // J. of Bacteriology. 1961. Vol. 81, № 5. P. 741–746.
4. Chen FL, Hou KX, Li SY, Zu YG and Lei Y(2014) Extraction and chromatographic determination of shikimic acid in Chinese conifer needles with 1-benzyl-3-methylimidazolium bromide ionic liquid aqueous solutions. Journal Of Analytical Methods In Chemistry/ P12.
5. Çiğdem A, Burçin EÖ, Mehmet LA (2016) Quantification of shikimic acid in the methanolic extracts of three alnus taxons growing in Turkey. Turkish Journal Of Pharmaceutical Sciences 13(1):71-76.
6. J. Gao, H. Weng, D. Zhu, M. Yuan, F. Guan, Y. Xi, Production and characterization of cellulolytic enzymes from the thermoacidophilic fungal *Aspergillus terreus* M11 under solid-state cultivation of corn stover, Bioresour. Technol. 99 (16) (2008) 7623–7629.

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФИТОПАТОГЕННЫХ БАКТЕРИЙ ГРУППЫ *PSEUDOMONAS*, ВЫДЕЛЕННЫХ В БЕЛАРУСИ

Чэнь Пяньшэнь

Белорусский государственный университет, г. Минск;

85860828@qq.com;

науч. рук. – А.Г.Песнякевич, канд. биол. наук, доц.

Этот эксперимент направлен на 19 штаммов, собранных в Беларуси и депонированных на кафедре микробов биологического факультета Белорусского государственного университета, для определения принадлежности этих штаммов к фитопатогенным бактериям. Эти 19 штаммов были предварительно идентифицированы как штаммы *Pseudomonas* перед экспериментом. Этот эксперимент включает изучение физиологических и биохимических характеристик и характеристик 19 штаммов, а также оценку инфекционного статуса некоторых штаммов на тканях и растениях восприимчивых растений (картофеля, томатов и табака). Принадлежность штаммов 46-2 и 67-2 к виду *Ralstonia solanacearum* подтверждена не только по физиологическим характеристикам, но и на молекулярном уровне. Штаммы 3-2, 36, 46-2, 67-2, 99 и 100 принадлежат к расе 3 дикого типа (F.) *Ralstonia solanacearum*. Штаммы 92 и 96 принадлежат к штаммам варианта (Op.) *Ralstonia solanacearum*, Из которых штамм 96 все еще обладает патогенной способностью штамма расы 1. Штаммы 84 и 87-2 не относятся к виду *Ralstonia solanacearum*, но являются фитопатогенами бактериями. Штаммы 4-7, 4-8, 32-2, 94 не относятся к фитопатогенным бактериям, а штаммы 4-7 и 94 предположительно относятся к *Pseudomonas fluorescens*. Классификация штаммы 85, 87-1, 91 и 95-2 до сих пор неясна, некоторые экспериментальные результаты показывают, что 87-1, 91 можно предположительно отнести к виду *Ralstonia solanacearum* дикого типа (F.), но для окончательной идентификации необходимы дополнительные исследования.

**Ключевые слова:** фитопатогенные бактерии, штамм *Pseudomonas*, *Ralstonia solanacearum*, картофель, томат, табак.

Картофель, который является четвертой по значимости экономической культурой в мире и одной из основных экономических культур в Беларуси, не должен подвергаться влиянию различных факторов. Некоторые бактериальные патогены растений, которые могут инфицировать растения пасленовых и вызывать болезни растений, могут вызвать серьезное сокращение производства культур пасленовых, включая картофель, и вызвать серьезные экономические потери. Во избежание снижения урожайности и экономических потерь, вызванных болезнями растений, скрининг и идентификация собранных патогенных микроорганизмов является важным шагом в профилактике эпидемий сельскохозяйственных культур. В коллекции микроорганизмов кафедры микробиологии имеются штаммы фитопатогенных бактерий, выделенных из поврежденных с/х растений на территории Беларуси. Не

все эти штаммы идентифицированы до вида. Видовая идентификация важна для дальнейшей разработки методов быстрого определения возбудителей в случае возникающих эпифитотий и порчи хранящихся овощей и фруктов. В задачу исследования входила видовая идентификация штаммов, предположительно отнесённых к группе *Pseudomonas*, по физиолого - биохимическим и молекулярно - биологическими критериям.

Использованные в работе штаммы были сняты с полужидкой питательной среды для хранения штаммов, и посеяны на картофельную агаризованную среду (среда КА), с целью получения изолированных колонии, и культивировали при 28 °С в течение примерно 48 часов. Затем выбрали по одной колонии каждого штамма и расселяли до изолированных колонии на такой же среде. В результате оценки роста штаммов на КА, было установлено, что часть штаммов формируют мелкие колонии даже при 48 - часовом культивировании. И поэтому было решено изменить среду культивирования на среду РУА. Каждый раз штаммы культивировали при 28 °С в течение 36 часов. Анализ роста бактерий анализируемых штаммов на среде РУА, содержащей дрожжевой экстракт и пептон, позволил разделить штаммы на несколько типов по морфологии и текстуре колоний: (1) Штаммы первого типа (тип I), образуют изолированные колонии, диаметр которых не превышает 1 мм. Консистенция колоний позволяет легко снимать их с поверхности агара бактериальной петлёй. (2) Штаммы второго типа (тип II), образуют колонии диаметром от 2 до 5 мм. Колонии более слизистые, чем колонии типа I. При снятии бактериальной петлёй колонии не отделяются от поверхности агара. (3) Штаммы третьего типа (тип III), образуют колонии диаметром от 3 до 5 мм, но выделяют гораздо большее количество слизи, чем колонии типа II. При снятии бактериальной петлёй трудно отделить колонию от агара из-за большого количества слизи. Рост штаммов на среде РУА очень нестабилен и очень чувствителен к концентрации питательных веществ в среде. и очень легко дико расти на поверхности среды. Результаты определения морфологических характеристик колоний и бактериальных клеток, проведенное при микроскопировании препаратов «раздавленная капля» и препаратов, окрашенных по методу Грама, подвижность бактерии анализировали входе преживненного микроскопирования в фазовом контрасте. (табл. 1)

Среди 19 штаммов протеазная активность штаммов 4-7, 4-8 и 84 была значительно выше, чем у других штаммов, тогда как у штаммов 3-2, 85, 94, 95-2 и 98 к 100. она была невысокой, а штамм 94 вообще не обладает протеазной активностью. Результаты культивирования 19 штаммов с использованием среды с карбоксиметилцеллюлозой (КМЦ) и

посева на полипектатный гель показали отсутствие целлюлолитической и пектолитической активностей у всех исследованных штаммов, в то время как контрольный штамм *Pectobacterium carotovorum* штамма D3310 проявлял эти активности в ходе таких экспериментов. Анализ способности исследуемых штаммов утилизировать лактозу и глюкозу образованием кислоты показал, что ни один из 19 штаммов не может использовать лактозу в качестве источника энергии. Из экспериментальных результатов на рисунке 5 видно, что все 19 штаммов могут использовать глюкозу в качестве источника энергии в разной степени, но только штамм 85 может полностью ферментировать глюкозу с образованием кислоты, штаммы 4-7, 4-8, 32-2 также могут использовать глюкозу, но цвет среды все еще слегка пурпурный, что указывает на то, что эти три штамма имеют неполное сбраживание глюкозы. Остальные штаммы не ферментируют глюкозу в жидкой среде с бромкрезоловым пурпурным. мало влияют на ферментацию глюкозы, что очень очевидно, из которых штаммов 36, 46- 2, 67-2, 94 и 100 не могут сбраживать глюкозу с образованием кислоты, но способны утилизировать её другим путём. Выращенные на среде CPG на жидкие культуры были проанализированы на способность флюоресцировать при освещении UV светом. Штаммы 4-7 и 94 давали очень явную синезеленую флуоресценцию в ультрафиолетовом свете. В этой ситуации я объясню свое мнение, когда сообщу о результатах 19 штаммов штаммов, культивируемых на селективной среде. (табл.1)

Таблица 1

**Морфологические характеристики исследуемых штаммов.**

Штамм ов	Окраска по Граму	Морфология	Подвижность	Тип колонии	Протеазной	Целлюлозной	Пектатной	Лактозы	Глюкозы	Флуоресценция
3-2	G <sup>-</sup>	палочка	++	II (III?)	++	-	-	-	+	-
4-7	G <sup>-</sup>	палочка	+++	I	++++	-	-	-	++	+
4-8	G <sup>-</sup>	палочка	+++	I	++++	-	-	-	++	-
32-2	G <sup>-</sup>	палочка	+++	I	+++	-	-	-	++	-
36	G <sup>-</sup>	палочка	++	II	+++	-	-	-	+	-
46-2	G <sup>-</sup>	палочка	++	III	+++	-	-	-	+	-

Штамм ов	Окр аска по Гра му	Морфо логия	Подви жность	Тип коло нии	Про теаз ной	Цел люл азно й	Пект атле азно й	Лакт озы	Глю коз ы	Флу орес цен ция
67-2	G <sup>-</sup>	палочк а	++	III	+++	-	-	-	+	-
84	G <sup>-</sup>	палочк а	+++	I (II?)	++++	-	-	-	+	-
85	G <sup>-</sup>	палочк а	++	I	+	-	-	-	+++	-
87-1	G <sup>-</sup>	палочк а	++	II	++	-	-	-	+	-
87-2	G <sup>-</sup>	палочк а	++	II	++	-	-	-	+	-
91	G <sup>-</sup>	палочк а	++	II	++	-	-	-	+	-
92	G <sup>-</sup>	палочк а	++	I	++	-	-	-	+	-
94	G <sup>-</sup>	палочк а	+	I	-	-	-	-	-	+
95-2	G <sup>-</sup>	палочк а	+	I	+	-	-	-	+	-
96	G <sup>-</sup>	палочк а	++	I	++++	-	-	-	+	-
98	G <sup>-</sup>	палочк а	++	II	+	-	-	-	+	-
99	G <sup>-</sup>	палочк а	+	III	+	-	-	-	++	-
100	G <sup>-</sup>	палочк а	+	III	+	-	-	-	+	-
контро ль	G <sup>-</sup>	палочк а			+	+	+	-	-	-

Примечание G<sup>-</sup> - Грамотрицательный «+» - есть активности; «-» - отрицательный результат.

Результаты культивирования 19 штаммов с использованием среды ТТС, Штаммы 32-2, 36, 46-2, 67-2, 87-1, 87-2, 91, 98, 99 и 100 образовывали очень заметные белые слизистые колонии на среде, штамм 3-2 образовывал меньшее количества слизи, колонии штамма 96 не имели слизитой морфологии. Разница между ними и другими штаммами, которые не образовывали колоний с белой слизью, заключается в том, что центральная часть колонии имела красную

окраску, а периферия - белую. Согласно [1] модифицированная среда SMSA может быть использована как селективная при выделении *Ralstonia solanacearum* из природных источников. Присутствие в среде антибиотиков, ТТС и кристаллического фиолетового не препятствует росту не *Ralstonia solanacearum*, но ограничивает размножение бактерий других видов. Исходя из этого было проведено культивирование исследуемых нами штаммов в модифицированной среде SMSA. В качестве контроля помимо использования штамма D3310 *Pectobacterium carotovorum* в были добавлены бактерии двух видов: *Pseudomonas putida*, М и *Pseudomonas fluorescens*.( табл. 2)

Таблица 2

**Рост исследуемых бактерий в модифицированной среде SMSA**

Штамм	рост	Штамм	рост
3-2	++	91	-
4-7	-	92	++
4-8	-	94	-
32-2	-	95-2	-
36	++	96	++
46-2	++	98	-
67-2	+	99	++
84	-	100	++
85	-	<i>P. carotovorum</i>	-
87-1	-	<i>P. putida</i> , М	-
87-2	-	<i>P. fluorescens</i>	-

Примечание: рост всех штаммов в среде без антибиотиков, ТТХ и кристаллвиолета -- +++++.

Результаты определения мацерирующей активности бактерии на ломтиках клубней картофеля, По результатом этой серии экспериментов штаммы разделились на три типа: первый тип при заражении штаммами первого типа ломтик картофеля становился полностью мягким, вокруг ломтика регистрировалось желтое слизеподобное вещество, поэтому данный тип был обозначен как тип **Y** (yellow). Второй тип вызывал мацерацию центральный части ломтиках, но внешняя стенка оставалась неповрежденной **M** (middle). Третий тип: в ломтиках клубней картофеля вообще нет повреждений, что обозначается знаком «-». Мацерция ломтика, вызванная контрольным штаммом *Pectobacterium carotovorum* D3310 не сопровождается выделеннем желтой слизи и обозначена **W**

(white). Заражение целостных клубней картофеля показало деление на 4 типа: Первый тип: ткань картофеля мягкая и гнилая, имеет белый цвет, зона мацерации имеет размер 2 - 3 см. Такое повреждение характерно для клубней, зараженных контрольным штаммом *Pectobacterium carotovorum* D3310, поэтому этот тип был обозначен С (control). Второй тип: гниль имеет коричневый цвет и жидкую консистенцию, и размер зоны мацераций не превышает 1 см Гниль не распространилась внутри клубень картофеля в период наблюдения (48 часов). такие повреждения были обозначены как тип В (brown). Третий тип: стенки вырезанной лунки имеют коричневый цвет, мацерация отсутствует, идет отмирание клеток по пути опробковения. В этом эксперименте эта метка S (suberenization)-типа. Четвертый тип: у картофеля, инокулированного штаммами, нет изменений в засеянной части или во всем клубне картофеля. В этом эксперименте такой знак - «-», это непатогенные бактерии, не относящиеся к картофелю. Результаты инокуляции штаммов в листья табака показаны, среди 10 штаммов, выбранных для инокулирования в листьях табака, штаммы 84, 87-2 и 96 вызвали наиболее серьезное повреждение, которое непосредственно вызвало высыхание инокулированного участка на листьях табака. Штаммы 3-2, 36, и 46 - 2, 67-2 и 87-1 вызывают пожелтение в листа табака в месте введения. Лист, инокулированный бактериями штаммов 87-1 и 87-2 полностью пожелтел на 12 день после заражения. Это подтверждает принадлежность штамма 96 к расе 1 *Ralstonia solanacearum*, так как согласно [2] бактерии этой расы поражают и картофель, и табак. Четыре штамма 3-2, 36, 46-2 и 67-2 вызывали слабое пожелтение в соответствующей зоне инокуляции на листьях табака, но они не вызывали некроза и высыхания. Другими словами, эти четыре штамма не являются патогенами, которые могут вызывать поражение табака. Они также подтверждают предыдущее предположение о том, что они принадлежат к штамму к расе 3 *Ralstonia solanacearum* (табл. 3). И результаты, проведенные на растении томатов, показали, что все 10 штаммов являются патогенными для томата. Заражение вегетирующих стеблей картофеля показало, что наиболее патогенным является штамм 36, зараженное растение по гибло через месяц после инокуляции. Штамм 46-2 вызывал пожелтение нижних листьев, но растении сохраняло жизни способность. Отмирание листьев также наблюдалось при инфицировании штаммом 98, но в меньшей степени. Остальные штаммы не вызывали поражения вегетирующих стеблей картофеля.

Таблица 3

**Результаты определения мацерирующей активности и влияние микроорганизмов на листья табака**

Штамм	Клубень картофеля		Степень поражение листа		
	Ломтики	Целый		Ломтики	Целый
3-2	Y	B	-	+	-
4-7	-	-			
4-8	-	-			
32-2	-	-			
36	Y	B	-	++	-
46-2	M	B	-	+++	-
67-2	Y	B	-	++	-
84	Y	S	-	-	+++
85	-	-			
87-1	Y	-	-	++	-
87-2	Y	B	-	-	+
91	M	S			
92	-	S			
94	-	-			
95-2	-	S			
96	M	S	-	-	++
98	M	-	+	-	-
99	-	S			
100	M	-	+	-	-
Контроль	W	C			

Примечания: контроль - *Pectobacterium carotovorum*, D. 3310.

Таким образом, принадлежность штаммов 46-2 и 67-2 к виду *Ralstonia solanacearum* подтверждена не только по физиолого-биохимическим характеристика, но и на молекулярном уровне. Штаммы 3-2, 36, 46-2, 67-2, 99 и 100 принадлежат к расе 3 дикого типа (F.) *Ralstonia solanacearum*. Штаммы 92 и 96 принадлежат к штаммам варианта (Op.) *Ralstonia solanacearum*, Из которых штамм 96 все еще обладает патогенной способностью штамма расы 1. Штаммы 84 и 87-2 не относятся к виду *Ralstonia solanacearum*., но являются фитопатогенами бактериями.

Штаммы 4-7, 4-8, 32-2, 94 не относятся к фитопатогенным бактериям, а штаммы 4-7 и 94 предположительно относятся к *Pseudomonas fluorescens*. Классификация штаммы 85, 87-1, 91 и 95-2 до сих пор неясна, некоторые экспериментальные результаты показывают, что 87-1, 91 можно предположительно к виду *Ralstonia solanacearum* дикого типа



(F.), но для окончательной идентификации необходимы дополнительные исследования.

#### **Библиографические ссылки**

1. Хикари Хорита: *Ralstonia solanacearum* / Хикари Хорита, Кеничи Цучия //MAFF Microorganism Genetic Resources Manual - 2012 - Vol.12, №.2.
2. Zeng Guoqin: Diagnosis and Identification of Important Plant Bacterial Diseases / Zeng Guoqin, Xu Shidian // Special Issue of Seminar on Diagnosis and Identification Technology of Important Plant Disease Prevention and Quarantine. - Vol.2 - p.95-115.

# ПЕКТАТЛИАЗНАЯ АКТИВНОСТЬ ШТАММОВ PECTOBACTERIUM В ЗАРАЖЕННЫХ КЛУБНЕЙ И СТЕБЛЕЙ КАРТОФЕЛЯ

Шао Чэнюе

Белорусский государственный университет, г. Минск;

520095424@qq.com;

науч. рук. А. Н. Евтушенко, д-р. биол. наук, проф.

Из стеблей картофеля и клубней картофеля, с симптомами черной ножки и мягкой гнили, выделены и идентифицированы пектолитические бактерии *Pectobacterium brasiliense* (Pcb), *P. carotovorum* (Pcc) и *P. parmentieri* (Ppa). Штаммы *P. brasiliense* впервые выявлены нами в Республике Беларусь. Изучали вирулентные свойства выделенных бактерий путем заражения клубней и стеблей картофеля сортов Винета и Палац. Различие в степени мацерации сортов Палац и Венета проявлялось при заражении бактериями *P. carotovorum* и *P. parmentieri*. Сорт Палац оказался более устойчивым в сравнении с сортом Венета. Сорт Палац также показал более высокую устойчивость к черной ножке, вызываемой *P. carotovorum* и *P. parmentieri*. *P. brasiliense* одинаково эффективно мацерировала клубни обоих сортов и вызывала черную ножку, что свидетельствует о более высокой степени вирулентности в сравнении с *P. carotovorum* и *P. parmentieri*. Пектатлиазная активность в мацерированных клубнях и стеблях картофеля коррелировала со степенью поражения растительного материала, подтверждая ведущую роль пектатлиаз в вирулентности пектобактерий.

**Ключевые слова:** пектатлиаза, мацерация клубней, черная ножка, картофель сорт Винета, сорт Палац,

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе заражения растений пектобактерии продуцируют комплекс внеклеточных ферментов, включающих целлюлазы и пектиназы. Эти ферменты играют ведущую роль в разрушении и деградации клеточных стенок растений, обеспечивая бактерии питательными веществами для роста самих бактерий. Таким образом, внеклеточные ферменты являются одним из важных факторов вирулентности при заражении растений-хозяев фитопатогенными бактериями. Двумя наиболее важными классами пектиназ, присутствующих в патогенах растений, являются пектинлиаза (PL) и полигалактуроназа (PG) [1].

Пектатлиазы являются основными внеклеточными ферментами пектобактерий, расщепляющими пектин в межклетниках и стенках клеток растений, что приводит к коллапсу тканей, повреждению клеток и утечке электролитов [2].

Целью нашей работы было изучение вирулентных свойств штаммов *Pectobacterium* при экспериментальном заражении клубней и стеблей картофеля и анализа пектатлиазной активности в зараженных тканях. В работе использовали 18 штаммов *Pectobacterium* (Таблица 1), выделенных из образцов картофеля с симптомами мягких гнилей (клубни) и черной ножки (стебли), собранных на территории Беларуси. Штаммы были идентифицированы до вида на основании изучения биохимических свойств и ПЦР с видоспецифическими праймерами.

Таблица 1

**Штаммы, использованные в работе**

Вид, Штамм	Источник	Место отбора проб
Рсс 4-3	Морковь	Минская область
Рсс 52-1	Клубень картофеля	П.Самохвалович
Рсс 52-2	Клубень картофеля	П.Самохвалович
Рсс 74	Бегония	Минская область
Рсс 88-2	Клубень картофеля	Брестская обл
Рсс 114-1	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 106-1	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 108-2	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 111-2	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 113-1	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 119-2	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рра 121-2	Стебли картофеля (черная ножка)	Минская область
Рсб 98-1	Клубень картофеля	Брестская обл
Рсб 98-2	Клубень картофеля	Брестская обл
Рсб 126	Стебли картофеля (черная ножка)	Брестская обл
Рсб 127	Стебли картофеля (черная ножка)	Брестская обл
Рсб 129	Стебли картофеля (черная ножка)	Брестская обл
Рсб 130	Стебли картофеля (черная ножка)	Брестская обл

**Инокуляция клубней и стеблей**

Клубни картофеля (сорта Винета и сорта Палац) стерилизовали поверхностно 70% этанолом и заражали суспензией бактерий. Бактерии выращивали в жидкой среде LB в течение ночи, центрифугировали, промыть 0,85% раствором NaCl, ресуспендировали в том же растворе до OD600, соответствующей плотности клеток ( $3 \times 10^8$  клеток/мл). Шприцем вводили 20 мкл бактериальной суспензии и рану изолировали пленкой парафильм. Инокулированные клубни картофеля помещали в условия 28°C и относительной влажности от 70% до 80%. Через 48 ч после инокуляции измеряли массу мацерированной ткани и сохраняли при температуре -20°C до измерения ферментативной активности.

Растения картофеля выращивали в фитотроне при 22°C с фотопериодом 16 часов. Заражали стебли картофеля 20 мкл суспензии бактерий и инкубировали до развития симптомов черной ножки.

#### Анализ активности пектатлиазы

К 500 мг образца мацерированной ткани клубней или стеблей картофеля, добавляли 500 мкл дистиллированной воды, перемешивали и центрифугировали для получения неочищенного ферментного экстракта. Определение активности пектатлиазы проводили путем регистрации увеличения оптической плотности реакционной смеси при OD235 нм, температуре 30°C на регистрирующем спектрофотометре как описано ранее[3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Все изучаемые штаммы активно мацерировали ткани клубней картофеля и на стеблях картофеля вызывали черную ножку. Два сорта картофеля различались по степени поражения клубней; сорт Палац оказался более устойчивым в сравнении с сортом Винета. Различие в степени мацерации сортов Палац и Венета проявлялось при заражении бактериями *P.carotovorum* и *P.parmentieri*. *P.brasiliense* одинаково эффективно мацерировала клубни обоих сортов.

Похожая картина наблюдалась и при заражении стеблей картофеля. Сорт Палац также показал более высокую устойчивость к черной ножке, вызываемой *P.carotovorum* и *P.parmentieri*. *P.brasiliense* одинаково эффективно заражала стебли обоих сортов картофеля и быстро вызывала черную ножку (в среднем за 3,35 дня) (Таблица 2). Следует отметить что *P.brasiliense* впервые выявлена нами в Республике Беларусь и судя по способности эффективно заражать клубни и стебля картофеля разных сортов является более опасным патогеном в сравнении с *P.carotovorum* и *P.parmentieri*. (Рис.1). Ранее уже отмечали высокий потенциал вирулентности *P.brasiliense* в сравнении с другими пектобактериями [4].

Таблица 2

### Результаты мацерации клубней картофеля и заражения стеблей картофеля штаммами пектобактерий

Вид бактерий	Мацерация клубней, г		Поражение стеблей картофеля, дни	
	Сорт Винета	Сорт Палац	Сорт Винета	Сорт Палац
<i>P.carotovorum</i>	1.85	0,78	6,5	14.2
<i>P.parmentieri</i>	2,31	0,64	3,8	7,4
<i>P.brasiliense</i>	2.1	1,9	3,3	3,4

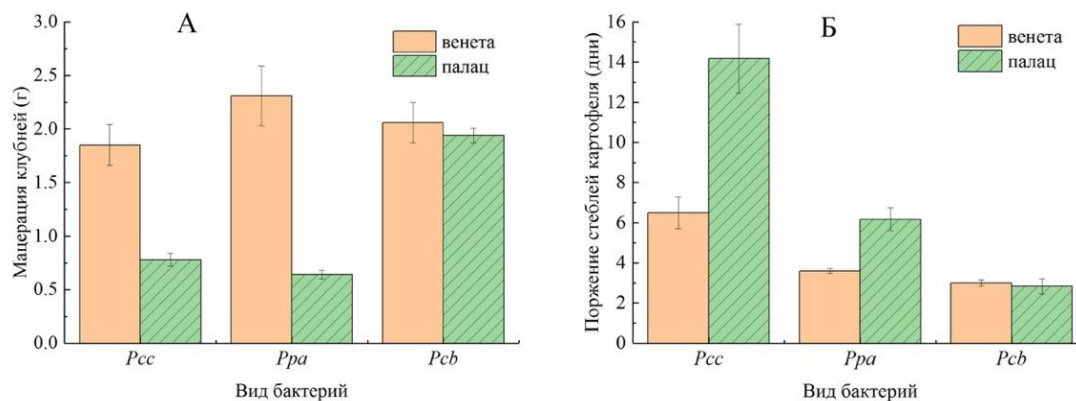


Рис. 1. Результаты мацерации клубней картофеля и заражения стеблей картофеля штаммами пектобактерий. А- мацерация клубней картофеля. Б- Время развития черной ножки. *Pcc* - *P.carotovorum*, *Ppa* - *P.parmentieri*, *Pcb* - *P.brasiliense*

Пекталиазная активность бактерий также была более высокой при заражении клубней сорта венета, чем палац. Это коррелировало с мацерующей активностью. (Рис.2)

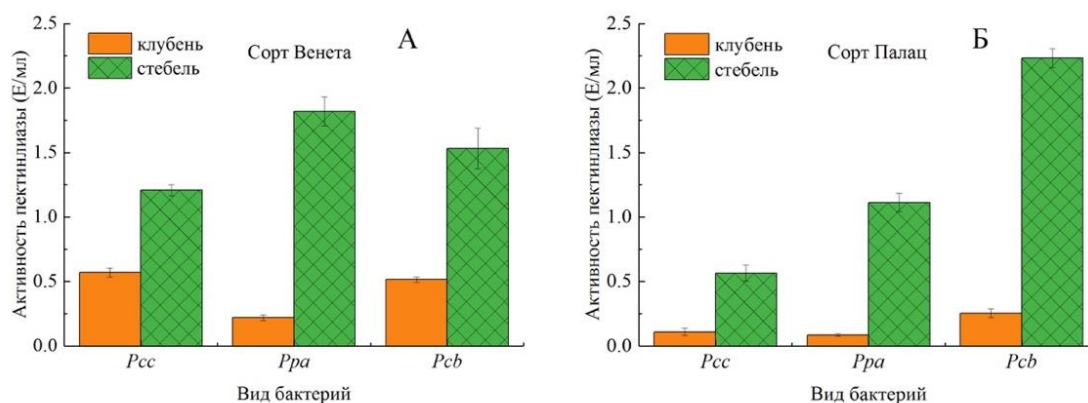


Рис.2. Сравнение пекталиазной активности *Pectobacterium* в стеблях и клубнях картофеля. А-Сравнение активности пектинлиазы в стеблях и клубнях картофеля сорта Винета. Б-Сравнение активности пектинлиазы в стеблях и клубнях картофеля сорта Палац. *Pcc* - *P.carotovorum*, *Ppa* - *P.parmentieri*, *Pcb* - *P.brasiliense*

## ВЫВОДЫ

Выделенные из растений в Республике Беларусь фитопатогенные пектобактерии идентифицированы до 3 основных видов: *P. carotovorum*, *P.parmentieri*, *P.brasiliense*.

Все виды пектобактерий эффективно поражали клубни и стебли картофеля при экспериментальном заражении.

Сорта картофеля отличались по устойчивости к заражению клубней пектобактериями: сорт Палац оказался более устойчивым в сравнении с

сортом Винета. При заражении стеблей картофеля сорт Палац оказался также более устойчивым в сравнении с сортом Винета.

При заражении клубней и стеблей картофеля бактериями *P.brasiliense* не наблюдали разности сортов в устойчивости, что свидетельствует о более высокой вирулентности *P.brasiliense*, способных преодолевать защитные механизмы растений.

#### Библиографические ссылки

1. Collmer A., Keen N. T. The Role of Pectic Enzymes in Plant Pathogenesis // Annual Review of Phytopathology. 1986. Т. 24. № 1. С. 383–409.
2. Hugouvieux-Cotte-Pattat N., Condemine G., Shevchik V. E. Bacterial pectate lyases, structural and functional diversity // Environmental microbiology reports. 2014. № 5 (6). С. 427–440. doi:10.1111/1758-2229.1216
3. А.Н. Евтушенко, В.Е. Шевчик, Л.Б. Попова, Ю.К. Фомичев. Очистка и свойства двух внеклеточных пектатлиаз штамма *Erwinia chrysanthemi* ENA49 // Прикладная биохимия и микробиология. 1986. Т. 22, № 2.- С. 187-192.
4. Li L. и др. Comparative genomic analysis of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliense* SX309 provides novel insights into its genetic and phenotypic features // BMC genomics. 2019. Т. 20. № 1. С. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5831-x>.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ Г. БРЕСТА

М. А. Дубовец

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*maksim.dubovecz@gmail.com;*

*науч. рук. – А. П. Безрученок, канд. геогр. наук, доц.*

В белорусской школе социально-экономической географии наблюдается недостаток работ, посвященных анализу экономико-географического развития городов. Актуальность данного исследования обусловлена отсутствием публикаций, в которых проводился бы анализ территориальной структуры белорусских городов, оценка пространственных особенностей их хозяйственного профиля. Целью данного исследования является оценка территориальной структуры г. Бреста. Объектом исследования является территориальная структура г. Бреста на основе схемы функционального зонирования. В данной статье проанализированы пространственные особенности размещения функциональных зон и крупнейших промышленных предприятий в городе. Автором обоснован вывод о наличии элементов секторальной и концентрической моделей территориальной структуры г. Бреста. На основе оцифрованной схемы функционального зонирования областного центра определен экстенсивный тип территориального развития города.

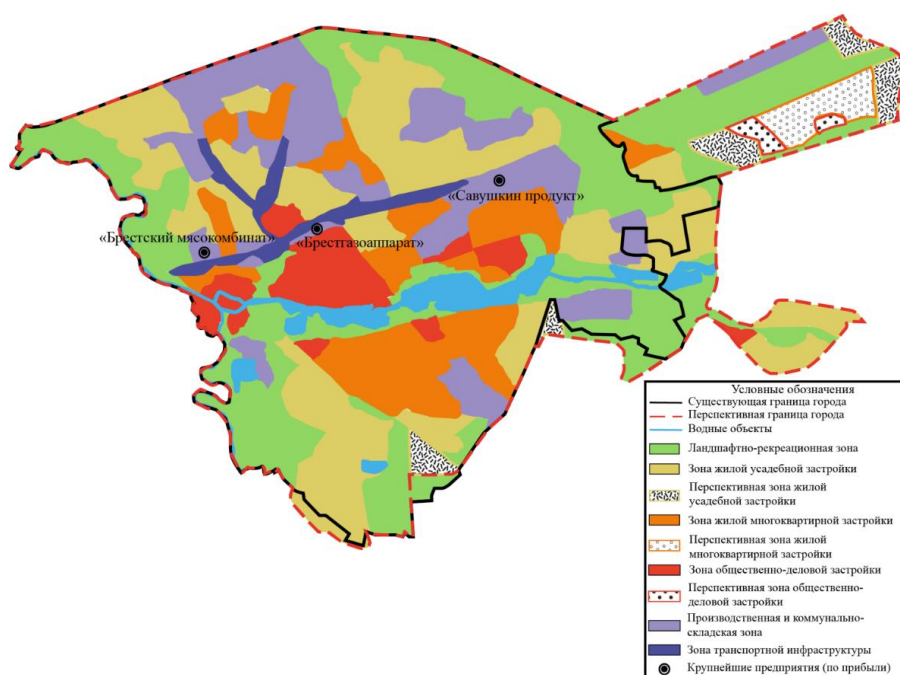
**Ключевые слова:** территориальная структура, город, функциональное зонирование, пространственное размещение, промышленные предприятия.

Территориальную структуру города позволяет раскрыть функциональное зонирование территории на основе схемы генерального плана города. Оцифровка схемы генерального плана города в разрезе функциональных зон была выполнена на основе материалов, полученных на официальных сайтах Брестского городского исполнительного комитета [1]. Информационной базой исследования послужили данные, предоставленные по запросу в УП «БелНИИПградостроительства» [2], а также данные электронного ресурса удаленного доступа по наиболее прибыльным предприятиям Беларуси [3].

Пространственное распределение функциональных зон Бреста позволяет утверждать о сочетании секторальной и концентрической моделей территориальной структуры города (рисунок).

Территориальная структура Бреста позволяет говорить о наличие пространственной дифференциации в размещении ряда функциональных зон. Общественно-деловая зона и зона жилой многоквартирной застройки приурочена к центральной части города (за исключением отдельных небольших площадей), что связана с длительной историей развития Бреста (один из старейших городов

Беларуси, впервые упоминается в 1019 г.) и современными процессами трансформации городского пространства в эпоху перехода к постиндустриальному развитию.



Функциональное зонирование территории г. Бреста (составлено автором по [1])

В то же время наблюдается пространственная неоднородность в размещении производственной и коммунально-складской зоны города, которая располагается и в центральной части, и на периферии, занимая значительные площади территории в северной части города. Данную пространственную особенность можно объяснить наличием многочисленных транспортных (автомобильных и железнодорожных) магистралей, проходящих через территорию Бреста, к которым и приурочены производственные и складские зоны.

Ранжирование крупнейших функциональных зон современной территориальной структуры Бреста выглядит следующим образом [2]:

- ландшафтно-рекреационная зона – 15,9%;
- производственная и коммунально-складская – 15,4%;
- зона транспортной инфраструктуры – 11,8%.

Преобладание данных зон в структуре Бреста можно объяснить его ролью в рамках страны как крупного туристского и промышленного центра и одного из крупнейших транспортных узлов Беларуси. Лидерство данных функциональных зон по площади является общей закономерностью для областных центров. Крупные города в рамках Беларуси выступают в роли важных промышленных и транспортных центров, они сосредотачивают в себе значительный демографический потенциал, имеют высокую туристскую привлекательность, отличаются значительной степенью озелененности территории.



Преобладание ландшафтно-рекреационных зон в территориальной структуре города обуславливается нормативами озеленения территории городов, которые непосредственно связаны с их численностью населения. Поскольку Брест является шестым по численности населения городом Беларуси, то в связи с этим в нем высока доля территории, занятой под ландшафтно-рекреационную зону (лесопарки, скверы, бульвары).

Крупнейшими промышленными предприятиями города по величине прибыли являются СП ОАО «Брестгазоаппарат», ОАО «Брестский мясокомбинат», ОАО «Савушкин продукт» [3]. Факторами размещения данных предприятий на территории города являются: 1) трудовые ресурсы (расположение в центральной части города, где концентрируется больше населения), 2) исторический (во время основания предприятий город имел меньшую численность населения и площадь территории); 3) транспортный (здесь пересекаются важнейшие внутригородские транспортные магистрали, а также важна близость к внешним транспортным коммуникациям для перевозки готовой продукции).

Динамика городского пространства г. Бреста позволяет говорить об экстенсивном пути территориального развития (вширь) за счет включения в состав города и освоения пригородных территорий.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что преобладающей по площади функциональной зоной Бреста является ландшафтно-рекреационная зона, для которой характерна неравномерность в пространственном размещении на территории города. Общей закономерности в пространственном размещении функциональных зон в городе не прослеживается, для города характерна смешанная модель территориальной структуры, которая сочетает в себе элементы секторальной и концентрической моделей. Основными факторами, обуславливающими пространственное размещение крупнейших промышленных предприятий на территории города, выступают трудовые ресурсы, исторический и транспортный. Также следует отметить, что для г. Бреста характерен экстенсивный тип территориального развития города за счет поглощения пригородных территорий.

#### **Библиографические ссылки**

1. Брестский городской исполнительный комитет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://city-brest.gov.by>.
2. УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.irup.by>.
3. ООО «Центр деловых коммуникаций БЕЛБИЗ» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://bel.biz>.

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ В КАДАСТРЕ ЗЕМЕЛЬ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. МИНСКА)

А. Н. Жуховцова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*zhuhovcova@gmail.com;*

*науч. рук. – А.Л. Киндеев, преп.*

В работе была выведена формула для учета экологической компоненты при проведении кадастровой оценки городских территорий с дальнейшим применением на территорию г. Минска. Расчет экологической составляющей включал в себя состояние атмосферного воздуха, почвенного покрова и расположение рекреационных объектов.

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, почвенный покров, рекреационная ценность кадастровая оценка.

Город Минск, будучи столицей Республики Беларусь, подвергается сильному антропогенному воздействию. Значительное влияние на компоненты окружающей среды приводит к нарушению их функционирования и ухудшению экологической обстановки в целом, что негативно сказывается на здоровье населения и качестве жизни, поэтому оценка экологического состояния урбанизированных территорий должна быть ориентирована на создание благоприятных условий для проживания населения.

В терминологии оценки недвижимости под экологическим фактором понимается состояние окружающей среды и её отдельных компонентов, влияющее на рыночную стоимость недвижимого имущества. Часто совокупность этих факторов разделяют на отрицательные (загрязнение отдельных элементов окружающей среды) и положительные (близкое расположение к рекреационным, природоохранным и другим зонам) составляющие [1]. Поэтому в некоторой литературе можно встретить несколько иное разделение экологического фактора на показатели, характеризующие состояние окружающей среды и рекреационную ценность территории [2].

В Беларуси при проведении кадастровой оценки учитывается сводный коэффициент факторов оценки. На практике в перечне факторов можно увидеть доступность мест для отдыха населения в радиусе 1 километра и расположение санитарно-защитных зон [3]. Установление размеров таких зон выполняется на основании расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, уровней физического воздействия и оценки риска для жизни и здоровья

населения [4]. Следовательно, можно сделать вывод о том, что экологическая составляющая учитывается не полностью.

Одним из самых важных показателей экологического состояния является загрязнение атмосферного воздуха. Для Минска характерно неравномерное распределение выбросов по всему городу: наиболее загрязненными являются общественные и промышленные зоны в центре города, а наименее – рекреационные и жилые зоны на востоке, юго-востоке и западе Минска. Это обусловлено размещением источников загрязнения, однако стоит отметить, что наибольшую долю в структуре источников загрязнения составляют мобильные – более 85% [5]. Кроме того нужно брать во внимание еще и погодные условия, которые влияют на перемещение атмосферного воздуха, рассеивание загрязняющих элементов в воздухе и выпадение осадков, которые осаждают загрязнители в верхние слои почвенного покрова, также загрязняя их.

Для почвенного покрова проявляется более заметная зависимость от функциональной зоны: максимальное загрязнение почв характерно для промышленных зон (предприятия машиностроения, металлообработки). Это особенно заметно в Заводском и Партизанском районах, где загрязнение почв обусловлено выбросами от предприятий. Также стоит отметить, что в более старых районах города уровень загрязнения почв выше за счет более длительного антропогенного воздействия [6].

Для определения уровня загрязнения совокупностью загрязняющих элементов рассчитывался комплексный показатель – суммарный коэффициент загрязнения. Оценка уровня загрязнения производится путём присвоением балла, отражающего уровень содержания загрязняющих элементов в соответствии с установленной градацией (таблица).

**Система оценки загрязнения окружающей среды**

Критерий экологического состояния	Балл уровня загрязнения / содержание загрязняющих элементов				
	5	4	3	2	1
Атмосферный воздух	0,79-0,83	0,84-0,86	0,87-0,90	0,91-0,93	0,94-0,96
Почвенный покров	2,71-5,45	5,46-8,18	8,19-10,92	10,93-13,66	13,67-16,39

Оценка рекреационной ценности проведена на основе Генерального плана города Минска, на котором показаны виды ландшафтно-рекреационных зон и их границы [7]. В качестве рабочего участка была принята функциональная зона города. Для оценки рекреационной ценности территорий были выделены зоны 350, 700 и 1000-метровой

пешеходной доступности, которым присвоены значения коэффициента рекреационной ценности  $K_{рекр}$  равные 1, 0,7 и 0,3 для каждой зоны соответственно. При большем удалении объекта от ландшафтно-рекреационных зон значение коэффициента принимается за 0.

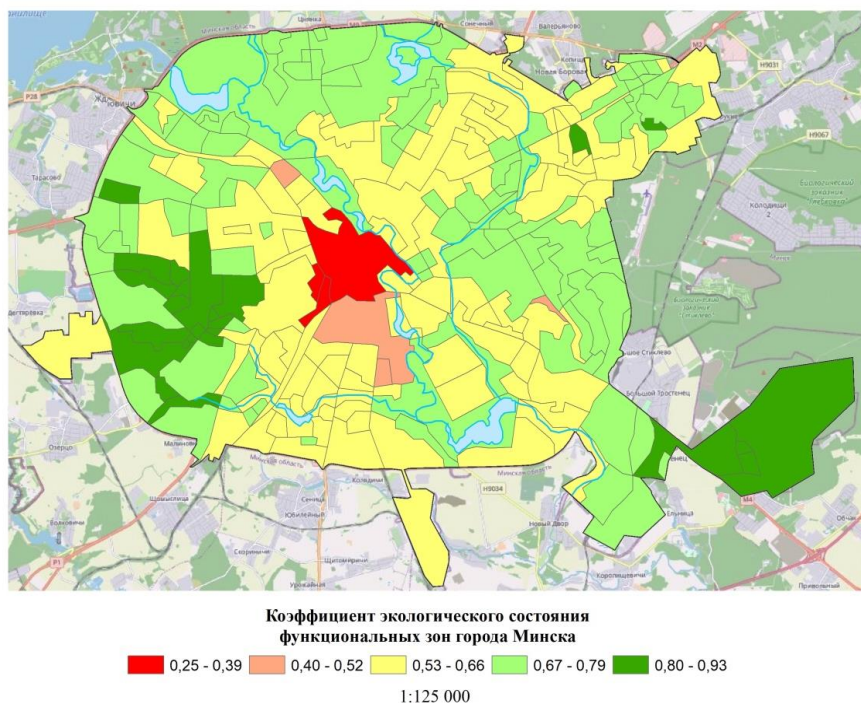
Исходя из имеющихся данных об экологическом состоянии города Минска, формула для расчета коэффициента экологического состояния  $K$  будет иметь следующий вид:

$$K = 0,125 (0,8 \times B_1 + 0,6 \times B_2 + K_{рекр}), (1)$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  – балл загрязнения почвенного покрова или воздуха, в зависимости от приоритетности данного вида загрязнения,  $K_{рекр}$  – коэффициент рекреационной ценности территории.

Число 0,125 означает, что в самых экологически благоприятных зонах значение коэффициента будет равно 1. Также предлагаемая формула может быть дополнена и другими видами влияния на экологическую обстановку (шумовое и радиационное загрязнение, качество поверхностных и подземных вод и другие).

Результатом обобщения всех полученных данных об экологическом состоянии является карта, визуализирующая значения рассчитанного по формуле 1 коэффициента экологического состояния (рисунок).



Коэффициент экологического состояния по функциональным зонам г. Минска

Наибольшая антропогенная нагрузка приходится на центр города (производственная и общественная зоны): здесь получены минимальные значения коэффициента. Наиболее благоприятные с точки зрения экологии районы расположены в пределах жилой застройки микрорайонов Сухарево, Запад, Слепянка и Шабаны, а также ландшафтно-рекреационных зон по всей территории города.

Результат расчета данного коэффициента предполагает его учет при проведении кадастровой оценки. Поскольку значения коэффициента не достигли 1, его влияние будет снижать стоимость земель и земельных участков. Повышение коэффициента возможно путём ограничения количества выбросов загрязняющих веществ (преимущественно от мобильных источников, так как они занимают большую долю в структуре загрязнений) либо увеличением количества ландшафтно-рекреационных зон.

#### Библиографические ссылки

1. Грибовский, С.В., Иванова, Е.Н., Львов, Д.С. Оценка стоимости недвижимости. – М.: ИНТЕРРЕКЛАМА, 2003. — 704 с.
2. Оценка экологической компоненты в кадастре земель урбанизированных территорий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arcreview.esri-cis.ru>.
3. Факторы кадастровой оценки земель, земельных участков – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vlf.nca.by>.
4. Санитарные нормы и правила «Требования к санитарно-защитным зонам организаций, сооружений и иных объектов, оказывающих воздействие на здоровье человека и окружающую среду» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mshp.gov.by>.
5. Государственный кадастр атмосферного воздуха – Минск: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь РУП «Бел НИЦ «Экология». 2018, 63 с.
6. Хомич, В.С. Особенности загрязнения почв в различных функционально-планировочных зонах Минска / В.С. Хомич [и др.]. – Минск.: ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ. ВЫП. 16, 2009. – 71-81 с.
7. Генеральный план города Минска. Основные положения градостроительного развития г. Минска. Система градостроительных регламентов: утв. Указом Президента РБ от 15.09.2016. – Минск: Мингорисполком Комитет архитектуры и градостроительства УП «Минскград», 2016. – 123 с.

# ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РЫНКА ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО РИТЕЙЛА Г. МИНСКА

Ю. В. Зиновик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*raptorloomer@gmail.com;*

*науч. рук. – Н. В. Жуковская, канд. геогр. наук, доц.*

В работе представлены результаты геомаркетингового исследования рынка продовольственного ритейла г. Минска. Выделены три классификационных уровня торговых объектов и разработана модель размещения населения г. Минска. На основе созданных сетевых наборов данных (пешеходная и автомобильная сеть) определены зоны обслуживания для каждого торгового объекта выделенных классификационных уровней. С помощью инструмента *Location-Allocation* модуля сетевого анализа ArcGIS выявлены оптимальные места расположения новых торговых объектов (для всех выделенных категорий) с учётом точек спроса и конкурентной среды.

**Ключевые слова:** геомаркетинг, геоинформационный анализ, ритейл, сетевой анализ, оптимальное месторасположение.

Интеграция пространственных данных в сферу маркетинга позволила получить новый инструмент управления – геомаркетинг. Геомаркетинговые исследования могут выполняться с использованием геоинформационных систем (ГИС) с привлечением внешней и внутренней социально-экономической информации относительно компании и анализируемой территории [1].

Целью настоящей работы является геомаркетинговый анализ рынка продовольственного ритейла г. Минска. Исследование выполнялось в несколько этапов: подготовка исходных данных; выделение зон обслуживания торговых объектов; выявление оптимальных мест расположения новых торговых объектов для выделенных классификационных уровней.

В качестве исходных использовались данные открытого сервиса OpenStreetMap (OSM) о размещении и характеристиках продовольственных торговых объектов, дорожной сети и жилых строениях г. Минска [2]. Геомаркетинговый анализ выполнялся в среде ГИС ArcGIS.

На этапе подготовки исходных данных была выполнена инвентаризация и классификация объектов продовольственного ритейла города Минска. Выделены три основных класса торговых объектов: гастрономы (496 единиц), супермаркеты (259 единиц) и гипермаркеты (43 единиц). Общее количество исследуемых торговых объектов

составило 798 единиц. Были созданы два набора сетевых данных, представляющие пешеходную и автомобильную сеть города.

С целью учёта потребительского спроса, была построена модель отражающая распределение населения по территории города (рисунок 1). Разработка последней осуществлялась на основе данных Национального статистического комитета Республики Беларусь о жилищном фонде, а также информации об этажности и площади, занимаемой жилыми зданиями. Общая площадь здания была вычислена как произведение этажности и занимаемой им площади. Затем, подсчитывалась плотность населения – частное от общей площади и данных жилищного фонда. В среднем в 2019 г. на одного человека приходилось 25,2 м<sup>2</sup> и 36,5 м<sup>2</sup> общей жилой площади (городской и сельский жилищный фонд).

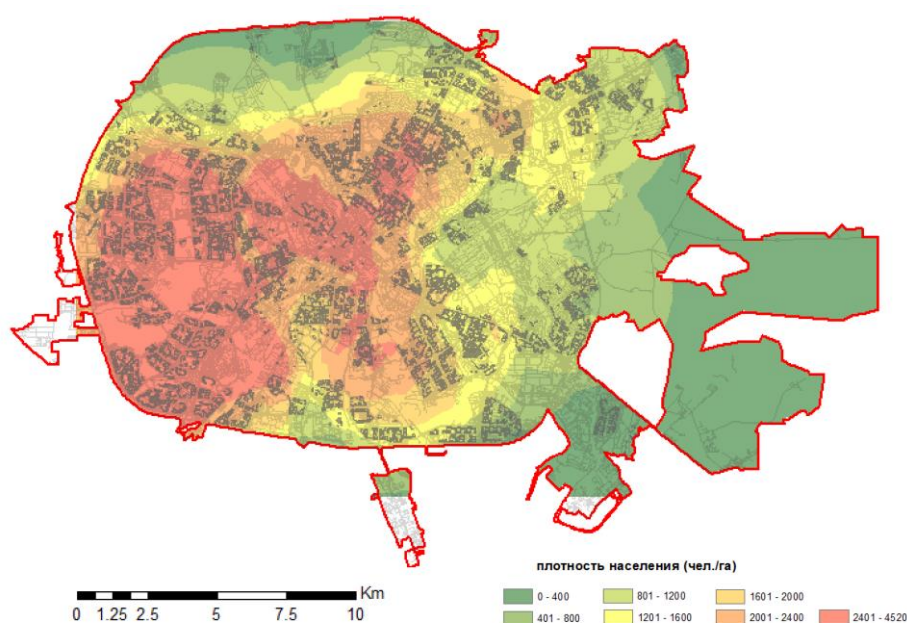


Рис. 1. Плотность населения г. Минска, чел./га

Для определения зон обслуживания было использовано одно из наиболее современных направлений ГИС-анализа – сетевой анализ. Зоны выделялись с помощью инструмента *Service Area* модуля *Network Analyst*. В зависимости от классификационного уровня торговых объектов использовался либо автомобильный, либо пешеходный набор сетевых данных. Подход дифференцированного моделирования опирается на попытку учёта «назначения» предприятий торговли. Например, такой класс продовольственных магазинов как гастроном, является магазином «быстрой доступности», имеет небольшую площадь (200-1000 м<sup>2</sup>), расположен преимущественно вблизи жилых кварталов, т.е. можно сказать, что «ориентированным» типом дорог гастрономов

являются пешеходные. Кардинально иная ситуация с гипермаркетами. Это магазины с широким ассортиментом товаров, площадью более 4000 м<sup>2</sup>, обладающие своей инфраструктурой (парковки, ландшафтная архитектура, указатели и др.). Расположение такого класса торговых объектов предположительно ориентировано на удобство дорожной сети. Поэтому для построения зон обслуживания гипермаркетов были использованы автомобильные дороги. Для супермаркетов в данном исследовании использовалась пешеходная сеть.

Также, дифференцированный подход позволяет приблизить моделируемую ситуацию к известной гравитационной модели Хаффа. В которой, полезность или привлекательность центра прямо пропорциональна его размеру и обратно пропорциональна расстоянию, отделяющему потребителей от центра [3].

Выявление оптимальных мест расположения новых объектов для выделенных классификационных уровней выполнено с помощью инструмента *Location-Allocation* модуля сетевого анализа ArcGIS. Предварительно были проанализированы факторы, определяющие удачное месторасположение торговых объектов, которые можно классифицировать следующим образом: управление, инфраструктура, окружающая среда [4]. К факторам управления в основном относятся элементы, которыми можно управлять внутри торговой точки. К факторам инфраструктуры – связанные с уникальной физической планировкой здания и окружающих его объектов. Факторы окружающей среды представлены демографическими показателями, потребительским спросом, транспортной загрузкой, образующими трафик предприятия (торговые центры, аэропорты, стадионы и др.), конкурентами и др. [4].

Сопряженный анализ позволил выявить приуроченность определённых классов продовольственных магазинов к жилым кварталам (рисунок 2) – фактор окружающей среды. Фактор инфраструктуры учитывался косвенно, а такой фактор как управление, в данном геомаркетинговом исследовании не был учтён. В результате анализа были определены потенциальные места для открытия новых торговых объектов трёх классов.

После построения модели были выделены три оптимальные локации каждого класса. Так, для гастрономов наилучшие месторасположения приурочены к южной части Октябрьского, центральной и северной частям Московского и Фрунзенского районов соответственно. Здесь отмечается достаточно высокая плотность населения (> 2100 чел./га) и значительная по времени доступность существующих торговых объектов данного класса по отношению к жилым кварталам.



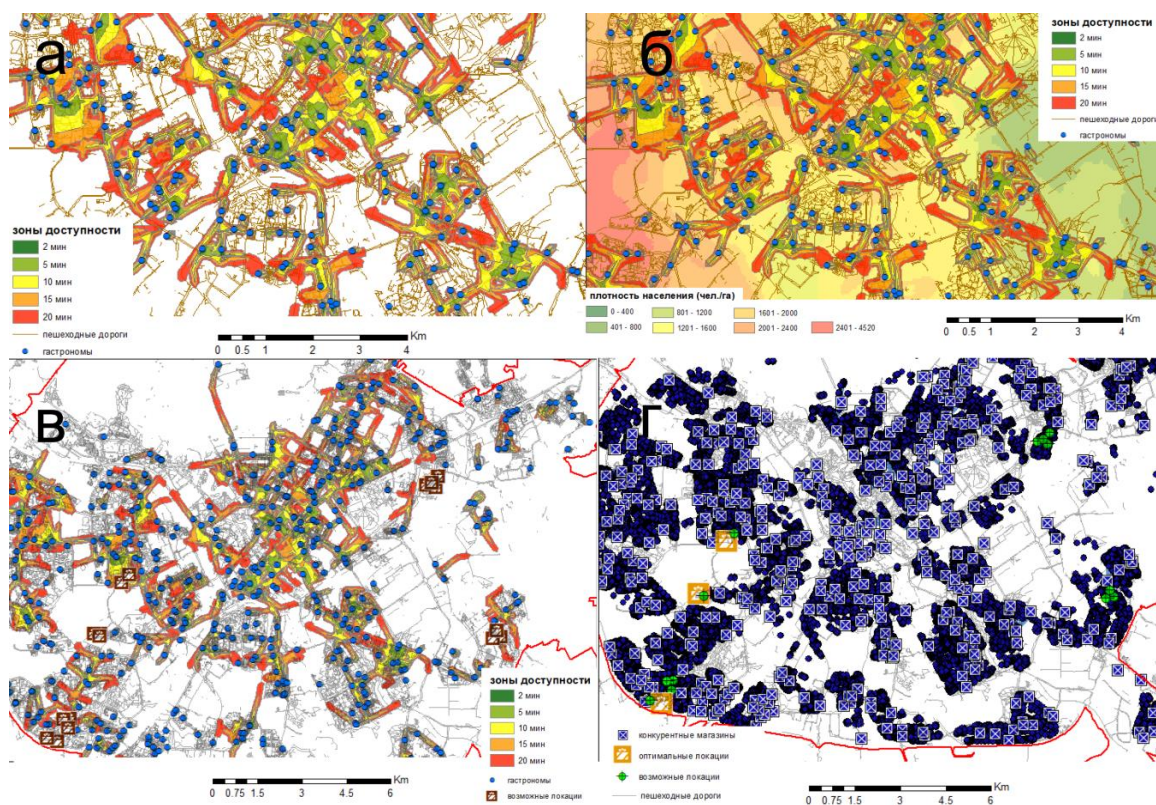


Рис. 2. Результаты исследования:

а) зоны обслуживания гастрономов, б) сопоставление модели размещения населения и зон обслуживания для нанесения потенциальных локаций гастрономов, в) возможные локации для размещения новых гастрономов, г) результат моделирования оптимальных локаций

Таким образом, применение ГИС-анализа в маркетинговых целях позволяет грамотно планировать ведение розничной торговли. От выявления оптимального месторасположения торгового объекта до оптимизации работы компании, построения её финансовой безопасности.

### Библиографические ссылки

1. Николаева Ю.А., Гринюк Д.Ю. Геомаркетинговый подход и перспективные направления рыночной деятельности // Проблемы и перспективы социально-экономической географии: материалы междунар. науч.-практ. конф. (12-14 ноября 2015 г., Минск). Минск, 2015. С. 75-76.
2. OpenStreetMap [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.openstreetmap.org>.
3. Wee C. H., Pearce M. R. Patronage Behavior Toward Shopping Areas: a Proposed Model Based on Huff's Model of Retail Gravitation // The association of consumer research. 1985. № 10. P. 592–597.
4. Леонов А.Л. ГИС для розничной торговли // ArcReview [Электронный ресурс]. 2010. № 4. Режим доступа: <https://arcreview.esri-cis.ru>.

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА БИОГЕННОГО СТОКА ВОДОТОКОВ БАССЕЙНА Р. ДНЕПР

**Е. А. Ивашко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*ivashkoegal@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. Л. Иванов, д-р геогр. наук, доц.*

Представлены результаты оценки выноса биогенных веществ речным стоком в бассейне р. Днепр на территории Беларуси. Выполнен анализ миграции биогенных веществ по длине реки и представлен анализ выноса азота аммонийного, азота нитратного, фосфора общего с площади водосборов рек бассейна Днепра.

**Ключевые слова:** бассейн р. Днепр, биогенный сток, качество вод.

Объект исследования – биогенный сток водотоков бассейна р. Днепр в пределах Республики Беларусь, предмет исследования – пространственно-временная динамика изменения биогенного стока в бассейне р. Днепр. Цель работы – проанализировать распределение ионного стока в пределах бассейна р. Днепр за период 1989-2020 гг. Задачи работы: рассмотреть особенности гидрографической сети водосбора р. Днепр, проанализировать динамику биогенного стока в водосборе.

В основу работы положены фондовые материалы ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» и РУП «ЦНИИКИВР». В ходе выполнения работы рассматривались и анализировались показатели, характеризующие химический и биогенный сток: азот аммонийный, азот нитритный и фосфор общий. Анализ материала осуществлялся, начиная со времени интенсивного потепления за период 1989-2019 гг. При обработке материалов использовались программно-математические и графические методы анализа и визуализации исходных данных, широко привлекались картографические материалы, поскольку изучение показателей и характеристик рек бассейна требует хронологической привязки и визуального анализа карт.

Бассейн Днепра – первый по площади речной бассейн в Республике Беларусь. Площадь водосбора составляет 63,7 тыс. км<sup>2</sup>, общее падение – 141,5 м, средний уклон – 0,12 ‰. Речная система реки Днепр древовидная, III типа, хорошо развита, насчитывает свыше 17000 водотоков длиной более 1 км, общей протяженностью порядка 88,4 тыс. км, из них около 9,0 тыс. км (около 10 %) приходится на искусственные водные объекты - каналы и канавы водных и осушительных систем,

сосредоточенные, главным образом, на территории Полесья. Подавляющее большинство гидрографической сети составляют малые водотоки, протяжением свыше 100 км насчитывается всего 30 рек – 9 % общей протяженности речной системы. Густота речной сети по течению реки Днепр на территории Беларуси: г. Орша – 0,47 км/км<sup>2</sup>, ниже устья реки Друть – 0,45 км/км<sup>2</sup>, ниже устья реки Березина – 0,41 км/км<sup>2</sup>, г. Речица – 0,39 км/км<sup>2</sup>, ниже устья реки Сож – 0,39 км/км<sup>2</sup>, в среднем на территории Беларуси – 0,39 км/км<sup>2</sup> [1].

В бассейне Днепра сеть мониторинга за состоянием поверхностных вод представлена 82 пунктами наблюдений за гидрохимическими показателями на 25 водотоках и 10 водоемах, и 6 трансграничными пунктами мониторинга за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях на 5 водотоках. Следует отметить, что после начавшейся в 1990-х годах «оптимизации» сети наблюдений в стране количество постов гидрологического мониторинга на водотоках было сокращено почти вдвое, в бассейне Днепра их осталось всего 29, при этом не все они имеют достаточно продолжительные и репрезентативные ряды наблюдений. Только за последние 7 лет общее количество пунктов мониторинга поверхностных вод на территории страны сократилось с 301 в 2014 г. до 256 – в 2020 г. [2].

Химический состав поверхностных вод бассейна Днепра не постоянен, зависит от времени года и варьирует от места взятия проб. Средняя мутность Днепра севернее г. Орша составляет около 82 мг/м<sup>3</sup>. Ниже по течению на протяжении нескольких километров вода реки засорена и непригодна для питья. Это связано с поступлением в нее сточных вод городской канализации, крупных предприятий и стока с сельскохозяйственных угодий. Причем в водные объекты с поверхностным стоком поступает около 20 % азота и 5 % фосфора внесенных в почву на сельскохозяйственных угодьях в пределах бассейна.

Дополнительная сельскохозяйственная нагрузка на агроландшафты способствует усилению выноса биогенных компонентов и отражается в увеличении азота и, в меньшей степени, – фосфора в поверхностной и подземной составляющей стока. Поверхностный смыв с сельскохозяйственных угодий – сезонный источник нагрузки, действующий преимущественно в вегетационный период. Осушительная мелиорация также приводит к усилению поступления в речную сеть продуктов агротехногенеза. Биогенные элементы привносятся также со стоками животноводства. Поэтому величина биогенного стока рек может выступать одним из показателей агрохозяйственного освоения водосбора [3].

Пространственная динамика биогенного стока за рассматриваемый период значительно варьирует на всей протяженности бассейна. Самые высокие значения выноса биогенов приурочены к пунктам наблюдений расположенным на юге бассейна и в районе крупных промышленных центров (рисунок 1). В северной части бассейна, ближе к границе с Россией высокие значения биогенов отмечаются лишь в русле самого Днепра, в то время как в водах притоков значения выноса не превышают 1000 т/год.

Такая же закономерность выноса биогенов речным стоком характерна и по другим компонентам. В направлении с севера на юг возрастают значения выноса азотных соединений с 400 до 7000 кг/км<sup>2</sup> в год, а соединения фосфора – от 100 до 1600 кг/км<sup>2</sup> в год.

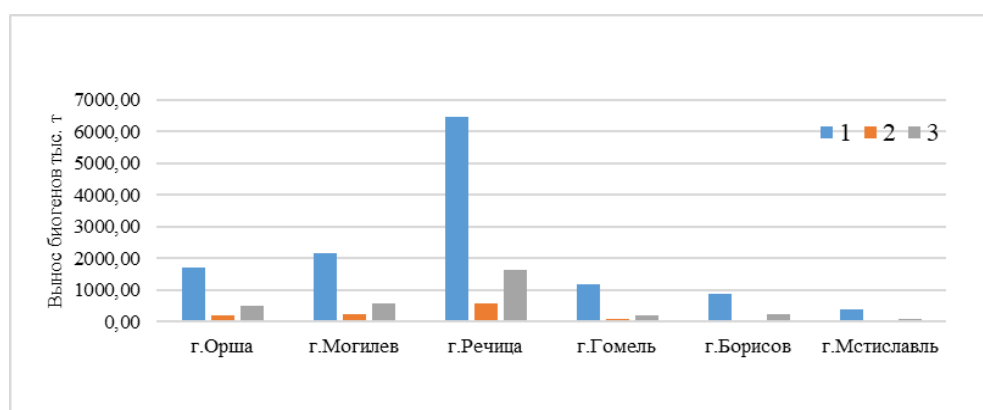


Рис. 1. Динамика выноса биогенных веществ в р. Днепр (за 2020 г.) (составлено автором по данным [1, 4]):

1 – азот аммонийный, 2 – азот нитратный, 3 – фосфор общий

Анализ динамики удельного выноса биогенных веществ реками бассейна Днепра за период 1989-2019 гг. позволил выявить наметившуюся тенденцию снижения выноса биогенов речным стоком в водах Днепра, а также его основных притоков (Сож и Березина)(рисунок 2).

Повышенный вынос азота аммонийного речным стоком практически во всех створах пришелся на 2012 г. Максимальный вынос азота аммонийного зарегистрирован в 1998 г. в створе р. Днепр – г. Речица (336 кг/км<sup>2</sup>), минимальный – в 2015 г. (114 кг/км<sup>2</sup>) В динамике выноса азота нитратного речным стоком выявлен рост в 2003-2007 гг. с последующим снижением, обусловленный резким увеличением точечных источников загрязнения, которые были в последующем устранены. Так, в створе ниже г. Жлобин после поступления максимального количества азота нитратного в 2003 г. (212,7 кг/км<sup>2</sup>), в последующие годы наблюдалось снижение показателей до 65,7 кг/км<sup>2</sup>.

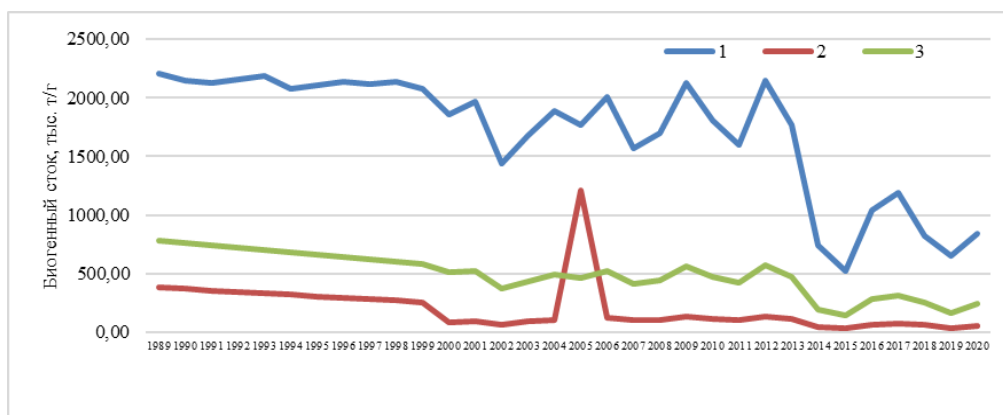


Рис. 2. Динамика биогенных веществ в р. Днепр (за период 1989-2020 гг.)  
(составлено автором по данным [1, 4]):

1 – азот аммонийный, 2 – азот нитратный, 3 – фосфор общий

Минимальный сток фосфора общего зарегистрирован в большинстве створов в 2009 г. Например, в створе ниже г. Могилев в 2004 г. годовое значение выноса опускается до отметки  $6,2 \text{ кг/км}^2$ . Максимальное значение зарегистрировано в 2005 году –  $67,8 \text{ кг/км}^2$ . Схожая ситуация наблюдается и в водосборах притоков Днепра – Соже и Березине [1, 4].

Снижение биогенного стока по всему бассейну на территории Беларуси отчасти обусловлено улучшением методов очистки сточных. Основными же причинами снижения биогенной составляющей гидрохимического стока в бассейне Днепра являются: уменьшение поголовья скота и, как следствие, – стоков животноводства; снижение распаханности в пределах долин постоянных водотоков и прилегающих участков; улучшение ведения агротехнических работ и дозированное внесение удобрений вследствие их значительного удорожания; снижение темпов, а в ряде районов и полная приостановка осушительной мелиорации. Все это вместе взятое привело к снижению поступления в речную сеть продуктов агротехногенеза.

#### Библиографические ссылки

1. Государственный водный кадастр Республики Беларусь (за 2016-2020 гг.) [Электронный ресурс]. – 2020.
2. Василько, М.С., Иванов, Д.Л. Состояние системы контроля качества поверхностных вод в республике Беларусь // М-лы Межд. науч.-практ. конференции молодых ученых «Молодежь и инновации – 2020». Горки, 2020. С. 29-33.
3. Кольмакова Е.Г. Антропогенные изменения стока растворенных веществ рек бассейна Немана / Е. Г. Кольмакова. – Мн.: БГУ, 2009. – 123 с.
4. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество воды. – Мн., 2000-2015.

# РАЗРАБОТКА ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ В 6 КЛАССАХ УЧРЕЖДЕНИЙ СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**А. Ю. Мачков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*arthur.machkov@gmail.com;*

*науч. рук. – Е. Г. Кольмакова, канд. геогр. наук, доц.*

География до сих пор является одной из важнейших наук для человека, которая рассказывает человеку о его окружении и процессах вокруг него происходящих, закладывает нормы поведения по отношению к природе и Земле в целом. И как наука, география не теряет своей актуальности, а, наоборот, открывает для себя новые горизонты. Исходя из важности географии, необходимо сказать, что крайне важным является то, как географию преподают, какие методы и приемы, формы организации и контроля при этом используют. Неотъемлемым элементом любого образовательного процесса является контроль знаний. В данной работе представлены авторские тесты по курсу физической географии в 6 классах и методика их разработки.

**Ключевые слова:** образование, физическая география, контроль и диагностика знаний, тестовые задания.

Тестовые задания разработаны по материалам учебного пособия «География. Физическая география. 6 класс» и атласа «Физическая география. 6 класс» [1].

Каждый тест состоит из десяти вопросов, разбитых на пять уровней сложности, на каждый уровень отводится по два вопроса [4]:

- 1 уровень используются для проверки умения учащихся выполнять действий с подсказкой. Это тесты на опознание или узнавание;
- 2 уровень используются для того, чтобы выявить умение учащихся самостоятельно без подсказок вспомнить и использовать усвоенную информацию;
- 3 уровень используются, чтобы выявить готовность учащихся к продуктивным действиям, это стандартные задачи и ситуации;
- 4 уровень используются, чтобы готовность учащихся к продуктивным действиям в нетипичных условиях;
- 5 уровень является творческим, он ориентирован на применение знаний в незнакомой ситуации, решение нестандартных задач. Чаще всего это сложные задачи, головоломки или усложнённые задания.

Для каждого уровня предусмотрены свои типы заданий, однако, некоторые типы заданий могут быть усложнены и перенесены на повышенный уровень сложности [4].

Также необходимо отметить, что все вопросы подразделяются на открытые (без вариантов ответа) и закрытые (с вариантами ответа). Все

задания первого уровня имеют варианты ответа, задания второго и третьего уровня могут быть как открытыми, так и закрытыми, все задания четвертого и пятого уровня не имеют вариантов ответа [2]. Ответы однозначны и не предполагают сложных предложений, представляют собой одно, в некоторых случаях два слова. Вопросы сформулированы четко и однозначно для исключения разночтения и путаницы [2].

По типам заданий тесты можно разделить на пять уровней [4]:

- 1 уровень представляет собой простые задания с четырьмя вариантами ответа, учащемуся необходимо выбрать из предложенных вариантов один правильный. Как правило на 1 уровне даются основные определения и терминология (рисунок 1);

Высота точки земной поверхности над уровнем моря:

- а) Средняя высота
- б) Абсолютная высота
- в) Относительная высота
- г) Крайняя высота

Горизонтالي – это:

- а) Линии на карте, соединяющие точки местности с равными высотами суши
- б) Линии на карте, соединяющие точки местности с равными глубинами
- в) Линии на карте, соединяющие точки местности с равными температурами
- г) Линии на карте, соединяющие точки местности с равным давлением

Рис. 1. Примеры заданий первого уровня (составлено автором по [2, 3, 4])

- 2 уровень представляет собой несколько усложнённый вариант первого, здесь учащемуся необходимо самому написать ответ, как правило, географический термин, или же дописать часть какого-либо определения. Также могут встречаться вопросы на отрицание или несколько вариантов ответа (рисунок 2);

Условная линия на земной поверхности, проведенная на равном удалении от полюсов – это:

Ответ: \_\_\_\_\_

Крупномасштабные карты имеют масштаб:

Ответ: \_\_\_\_\_

Дополните определение: Изолинии – специальные линии на карте, соединяющие точки местности с \_\_\_\_\_ значениями каких-либо величин.

Ответ: \_\_\_\_\_

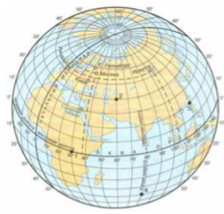
Все условные знаки, используемые на карте или плане, с пояснением к ним являются:

Ответ: \_\_\_\_\_

Рис. 2. Примеры заданий второго уровня (составлено автором по [2, 3, 4])


- 3 уровень предполагает действия по простому алгоритму в понятной ситуации. Он представлен простыми задачами или заданиями на соответствие. Задания в зависимости от контекста могут встречаться как с вариантами ответа, так и без (рисунок 3);

Определите координаты заданных точек:







Ответ: \_\_\_\_\_

Представленная карта по охвату территории является:



Ответ: \_\_\_\_\_

Установите соответствие «условный знак – географический объект»:

А		1	Сплошные заросли кустарников
Б		2	Фруктовый сад
В		3	Направление и скорость течения
Г		4	Церковь

Ответ: \_\_\_\_\_

Рис. 3. Примеры заданий третьего уровня (составлено автором по [2, 3, 4])

• 4 уровень предполагает действие учащегося в условиях недостатка информации или же нетипичной ситуации. Данные задания представляют собой преимущественно задания на счет, сложные соответствия, использование имеющихся знаний для нахождения недостающей информации (рисунок 4);

Расстояние между объектами, расположенными на одном меридиане равно 78°, чему будет равно реальное расстояние между данными объектами?  
Ответ: \_\_\_\_\_

В каких полушариях располагаются указанные объекты:




Объекты	Полушария	Северное	Восточное	Западное	Южное
Австралия					
Евразия					
Атлантический океан					

По географическим координатам, используя атлас, определите объекты и найдите лишний. В ответ запишите название лишнего объекта:

65° с. ш. 18° з. д.
78° с. ш. 15° в. д.
71° с. ш. 8° з. д.
1° с. ш. 114° в. д.
4° с. ш. 9° в. д.
27° ю. ш. 109° з. д.
7° с. ш. 80° в. д.

Ответ: \_\_\_\_\_

Соотнесите карты с их видами:

А		1	Содержание тематическое
		2	Содержание общегеографическое
		3	Карта отдельных областей
Б		4	Карта материков и океанов
		5	Карта полушарий
		6	Мировая карта
В		7	Масштаб мелкий
		8	Масштаб средний
		9	Масштаб крупный

Ответ: \_\_\_\_\_

Рис. 4. Примеры заданий первого уровня (составлено автором по [2, 3, 4])

• 5 уровень является творческим. В данных заданиях учащегося ставят в незнакомую и нетипичную ситуацию, используя имеющиеся знания ему необходимо самостоятельно продумать пути разрешения задачи и реализовать их. Большинство заданий этого уровня опираются на логику и смекалку учащихся (рисунок 5).



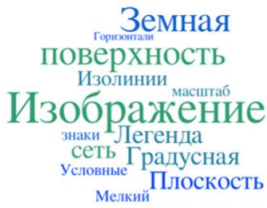
<p>Какое понятие зашифровано в облаке слов?</p>  <p>Ответ: _____</p>	<p>Гуляя по берегу Средиземного моря, вы нашли бутылку с письмом, в котором пираты описали путь к спрятанным сокровищам, проследите за путем пиратов и выясните, где спрятаны несметные богатства.</p> <p><i>“Путь наш начинается с города, где порой солнце не заходит за горизонт, а лежит этот город на 68° с. ш. и 33° в. д. От него спускаемся на юг на 3°, далее наш путь лежит на 30° в сторону востока, пробираясь сквозь холодную тундру, мы окажемся у подножия древних гор, что с незапамятных времен разделяли Азию и Европу. От них мы двинемся еще на 40° южнее, преодолевая горные хребты, тайгу и степи, увидев древнее озеро, что кличут морем и пройдя сухие пустыни, мы, наконец, выйдем к морю, от которого пойдем на восток еще на 60°, сквозь колыбель древних цивилизаций и холмов, что изрезаны словно ступеньки. Мы должны доплыть до острова, что называют настоящим Китаем. Оттуда наш путь лежит на 20° южнее, сквозь моря и непроходимые джунгли. И вот, добравшись до этой земли, вы найдете наши сокровища.”</i></p> <p>Ответ: _____</p>
<p>Вы отправились в путешествие. Отплыв от о. Куба, вы решили двигаться по Атлантическому океану в северо-восточном направлении, проплыв около 7700 километров, вы оказались в единственном месте в Северном полушарии, которое не имеет географической долготы. Где вы?</p> <p>Ответ: _____</p>	<p>Мальчик Саша вышел из дома и пошел к другу по азимуту 270°, после чего отправился к бабушке по азимуту в 0°. Дальше он побежал в магазин по азимуту в 90° и отправился домой. По какому азимуту будет возвращаться домой Саша, если расстояние между всеми объектами одинаковое?</p> <p>Ответ: _____</p>

Рис. 5. Примеры заданий пятого уровня (составлено автором по [2, 3, 4])

От объективности и эффективности выбранной методики диагностики знаний напрямую зависит и эффективность самого обучения, так как проверка знаний помогает сформировать чувство ответственности у учащихся, подстегивает их к более качественному изучению дисциплины. А также помогает педагогу оценить текущий уровень учащихся, выявить существующие пробелы в знаниях, найти наиболее сложные для усвоения темы, требующие особого внимания. Поэтому разработка тестовых заданий в данный момент времени является актуальной как никогда, ведь тесты позволяют объективно оценить уровень знаний большого количества учащихся при малых временных и трудовых затратах.

#### Библиографические ссылки

1. Атлас. Физическая география: учебное пособие для 6 класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения / РУП «Белкартография». – Минск, 2016. – 36 с.
2. Галай, И.П. Методика обучения географии. – Минск: Аверсэв, 2006 – С. 157.
3. Кольмакова Е.Г., Пикулик В.В. География. Физическая география: учеб. пособие для 6-го кл. учреждений общ. среднего образования с рус. яз. обучения / под ред. Кольмаковой Е.Г. – Минск: Народная Асвета, 2016. – 190 с.
4. Майоров А.Н. Теория и практика создания тестов для системы образования. – М., «Интеллект центр», 2001– С. 296.

# ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ БЕЛАРУСИ

**М. В. Медведько**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*marry\_medvedko25@mail.ru;*

*науч. рук. – Ю. А. Гледко, канд. геогр. наук, доц.*

На основе официальных данных государственной сети гидрометеорологических наблюдений Беларуси был проведен анализ опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) за период 2008-2020 гг. с помощью статистических методов и метода картирования. Впоследствии на основе количественного анализа ОЯ на территории Беларуси была проведена оценка интенсивности воздействия ОЯ на социально-экономическую систему Беларуси, с использованием официальных данных о численности населения, площади административных районов и ВРП областей Национального статистического комитета Республики Беларусь [3], а также методики оценки, предложенной сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института–Мирового центра данных, Обнинск (ВНИИГМИ-МЦД) [1]. Влияние ОЯ представлено посредством новых показателей, определяющих интенсивность воздействия гидрометеорологических факторов с учетом уровня социально-экономического развития региона. В результате проведенного исследования было выявлено, что административные районы Беларуси имеют неодинаковую уязвимость в отношении опасных проявлений погоды, поэтому были определены наиболее уязвимые районы, для которых гидрометеорологическое обслуживание имеет особую значимость.

**Ключевые слова:** опасные гидрометеорологические явления, интенсивность воздействия, повторяемость условий погоды, социально-экономическая система.

На территории Беларуси ежегодно ведется учет опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) и составляется «Обзор опасных гидрометеорологических явлений и климатических особенностей в Республике Беларусь» [2], критерии которых, приведены в техническом кодексе ТКП 17.10-06-2008 (02120) [4]. Для оценки интенсивности воздействия ОЯ на социально-экономическую систему Беларуси статистическим методом был проведен количественный анализ ОЯ на территории Беларуси в период 2008-2020 гг., исходными данными для которого послужили фондовые данные Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) за период 2008-2020 гг. Учитывались все ОЯ (метеорологические), которые были зафиксированы хотя бы в одном из пунктов наблюдений. Если ОЯ наблюдалось одновременно на нескольких станциях, и было вызвано одним и тем же атмосферным

процессом, то оно считалось как один случай. В период исследования наблюдались следующие ОЯ: очень сильный дождь, очень сильная жара, ливень, очень сильный ветер, шквал, смерч, град, чрезвычайная пожарная опасность, очень сильный снег, гололед, налипание мокрого снега.

С целью выявления опасных зон проявления ОЯ по фондовым данным Белгидромета за 2008-2020 гг. был проведен анализ повторяемости и плотности их проявления (числа опасных явлений) по территории административных районов Республики Беларусь. Повторяемость и плотность проявления ОЯ и социально-экономическая статистика численности населения, площади территорий административных районов и данных по валовому региональному продукту областей за 2020 г. позволяют провести расчеты двух показателей интенсивности воздействия ОЯ на социально-экономическую систему, которые отличаются от гидрометеорологического риска, так как определяются без привлечения максимальных возможных годовых экономических потерь [1]. Первый показатель ( $K_1$ ) формировался как произведение повторяемости ОЯ административного района/области на плотность населения на рассматриваемой территории. Следовательно, чем выше плотность населения и чем больше повторяемость ОЯ, тем выше интенсивность возможного воздействия на население – показатель характеризует влияние ОЯ на социальную сферу. Второй показатель ( $K_2$ ) формировался как произведение среднегодовой плотности ОЯ областей Беларуси на ВРП конкретно рассматриваемой территории – показатель характеризует влияние ОЯ на экономическую составляющую системы (район/область).

На территории Беларуси с 2008 по 2020 гг. было зафиксировано 179 случаев ОЯ. Из них 91% – ОЯ теплого периода, что составляет 163 случая от общего количества. В то время как на ОЯ холодного периода года пришлось лишь 9% и составило 16 случаев. На рисунке 1 отражены особенности пространственного распределения количества случаев ОЯ на территории Беларуси. Наибольшее число случаев ОЯ характерно для юга Беларуси, в частности это Припятское Полесье. В пределах Брестской и Гомельской области выделяются районы, для которых характерно наибольшее число случаев ОЯ за исследуемый период: Житковичский и Гомельский – 22 и 20 соответственно; Пинский – 16. Также следует отметить, что для территории Гомельской области характерно не только наибольшее количество разных видов ОЯ, но и количество случаев их возникновения. В свою очередь, наименьшее число случаев ОЯ на территории Беларуси наблюдается на западе,

северо-западе и востоке страны (северо-запад Витебской области, центральные районы Гродненской области и центральные районы Могилевской области).

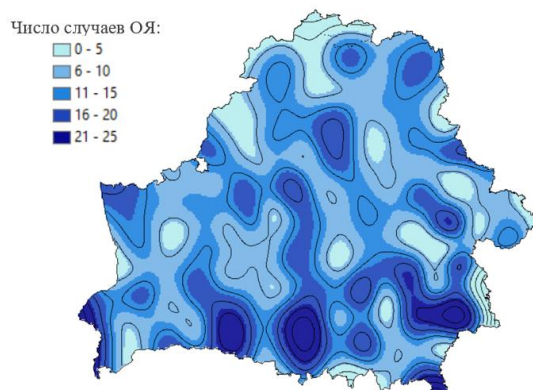


Рис. 1. Число случаев ОЯ на территории Беларуси в период 2008-2020 гг. (составлено автором по [2])

Наибольшее число случаев ОЯ за период исследования пришлось на 2020 г. и составило 21, в то время как 2014 г. отличился как год с наименьшим зафиксированным количеством ОЯ – 6.

На основании проанализированных данных по ОЯ и данных о площади и численности населения административных районов были рассчитаны коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ ), показывающие потенциально возможное влияние ОЯ на социально-экономическую систему Беларуси. Результаты расчетов этих показателей приведены на рисунках 2 и 3.

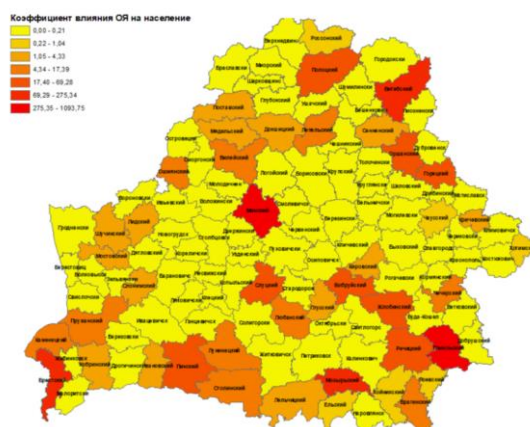


Рис. 2. Результаты расчетов показателей интенсивности воздействия ОЯ на население в разных административных районах Беларуси

Из рисунка 2 следует, что с точки зрения интенсивности воздействия ОЯ на социально-экономическую систему наиболее неблагоприятной областью является Минская, где  $K_1$  составляет 276,18 и  $K_2$  равен 1,795. Необходимо отметить, что на территории Беларуси данные

показатели будут наиболее высокими в районах, в которых концентрируется значительное количество населения, и, соответственно, располагаются крупнейшие промышленные центры страны. Такими районами являются, в первую очередь, относящиеся к областным городам: Брестский (154,28), Витебский (91,1), Гомельский (458,87), Гродненский (97,22), Минский (1 093,75) и Могилевский районы (226,88); а также Пинский, Барановичский районы – 64,329 и 35,834 соответственно (Брестская область); Оршанский, Полоцкий районы – 39,836 и 39,176 соответственно (Витебская область); Мозырский, Речицкий – 73,38 и 39,14 соответственно (Гомельская область); Волковысский район – 21,65 (Гродненская область); Борисовский район – 54,06 (Минская область); Бобруйский район – 55,02 (Могилевская область). Следовательно, наибольшее воздействие ОЯ на социальную систему среди областей оказывается на территорию Минской области (в г. Минске проживает около 2 млн. чел.).

Анализ результатов расчетов по второму показателю  $K_2$  (рисунок 3) показал, что наиболее велика опасность воздействия ОЯ на экономику в целом для территории Минской и Гомельской областей – 1,795 и 1,661 соответственно. Наименьшая опасность от воздействия ОЯ на экономику характерна для Могилевской области – 0,687.

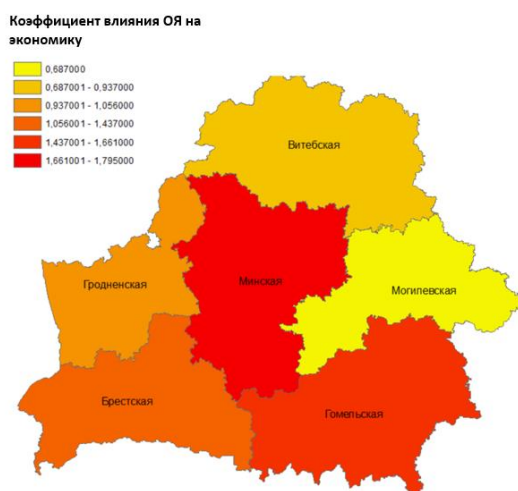


Рис. 3. Результаты расчетов показателей интенсивности воздействия ОЯ на экономику Республики Беларусь по областям

Предложенные подходы к оценке влияния интенсивности воздействия ОЯ на социально-экономическую систему Беларуси посредством выявления наиболее уязвимых экономических районов позволяют на основе совместного анализа социально-экономической и гидрометеорологической информации выполнять расчеты, которые

могут служить косвенной характеристикой интенсивности возможного воздействия метеорологических факторов на население и экономику.

Очевидно, что чем выше плотность населения и чем больше повторяемость опасных метеорологических явлений, тем выше интенсивность возможного воздействия на население. Соответственно, чем выше ВРП, тем более значительные экономические потери можно ожидать по конкретной области Республики Беларусь. Поэтому именно в областях с высоким ВРП следует в первую очередь предпринимать необходимые защитные меры с целью уменьшения последствий воздействия ОЯ.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Коршунов А.А., Рыбанова А.Ю., Фокичева А.А., Шаймарданов М.З.* Анализ интенсивности воздействия опасных условий погоды на социально-экономическую систему // Ученые записки РГГМУ, 2018, №53, с. 18-33.
2. Метеорологические данные Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды.
3. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения, ТКП 17.10-06-2008 (02120) (01.01.2009). Минск: БелНИЦ «Экология»; 2008. 30 с.

# РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РТУТЬСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

**А. В. Науменко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*naumenko.aleksa@list.ru;*

*науч. рук. – Н. В. Гагина, канд. геогр. наук, доц.*

В работе рассмотрена морфологическая структура образующихся ртутьсодержащих отходов, рассмотрены типы обращения с ртутьсодержащими отходами в разрезе областей Республики Беларусь. В ходе исследования было выделено 10 типов обращения с ртутьсодержащими отходами. Актуальность работы заключается в необходимости комплексного анализа типов обращения с ртутьсодержащими отходами в разрезе областей Республики Беларусь для оптимизации существующей системы обращения с ртутьсодержащими отходами.

**Ключевые слова:** ртутьсодержащие отходы, морфология отходов, геоэкологическая оценка, обращение с отходами.

В настоящее время обращение с ртутьсодержащими отходами является важной проблемой, требующей внимания, что связано с токсичностью ртути, которая содержится в данных отходах. Основным документом, который регулирует обращение с ртутьсодержащими отходами является Закон «Об обращении с отходами» [1]. К ртутьсодержащим отходам относятся [2]: батарейки, игнитроны, дифманометры, уголь-поглотитель, содержащий ртуть, грунт, загрязненный ртутью, компактные люминесцентные лампы и люминесцентные трубки, отходы ртути и ее соединений, ртутные лампы и термометры, шлам ртутьсодержащий и шлам после демеркуризации. Обращение с ртутьсодержащими отходами включает в себя сбор отходов, их сортировку, ежегодную инвентаризацию с учетом качественных и количественных показателей, а также последующее обращение с отходами (рисунок 1).

Основными источниками образования ртутьсодержащих отходов является производственное и коммунальное потребление отходов. В 2016 г. в Республике Беларусь было образовано 1,9 млн. т. ртутьсодержащих отходов, к 2020 г. их объем увеличился до 4,2 млн. т (рисунок 2). Наибольшее количество ртутьсодержащих отходов образуется организациями Брестской области. Кроме того, значительные объемы образования ртутьсодержащих отходов в 2016 г. характерны для Гомельской, Минской и Могилевской областей. Наименьший объем образования ртутьсодержащих отходов в 2016 г. характерен для

Витебской и Гродненской областей, а в 2020 г. – Витебской и Могилевской областей.



Рис. 1. Схема обращения со ртутьсодержащими отходами в Республике Беларусь

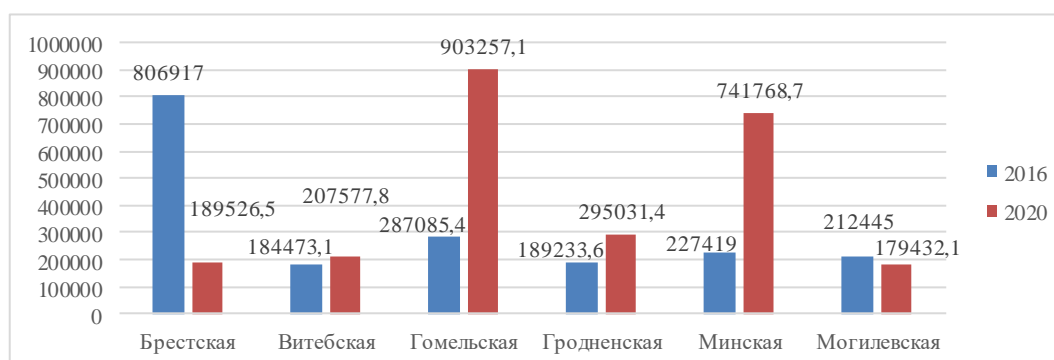


Рис. 2. Объем образованных ртутьсодержащих отходов в разрезе областей Республики Беларусь в 2016 и 2020 гг., тонн

Наибольшую долю в структуре ртутьсодержащих отходов занимают отходы I класса опасности. В морфологической структуре образованных ртутьсодержащих отходов преобладают отработанные люминесцентные лампы (76,3 %), ртутные лампы (16 %) и компактные люминесцентные лампы (6,1 %). Доля остальных ртутьсодержащих отходов не превышает 1%.

В Республике Беларусь обращение с ртутьсодержащими отходами, образующимися от организаций, более эффективно, чем в коммунальном секторе, где существуют проблема недостаточной информированности населения об опасности отходов. В связи с этим был разработан алгоритм оценки системы обращения с ртутьсодержащими отходами, который учитывал такие показатели как: объем образования отходов, сложность морфологической структуры образованных отходов и сложность обращения с отходами. В соответствии данными показателями каждому району был присвоен тип,



характеризующий систему обращения со ртутьсодержащими отходами в данном районе (рисунок 3).

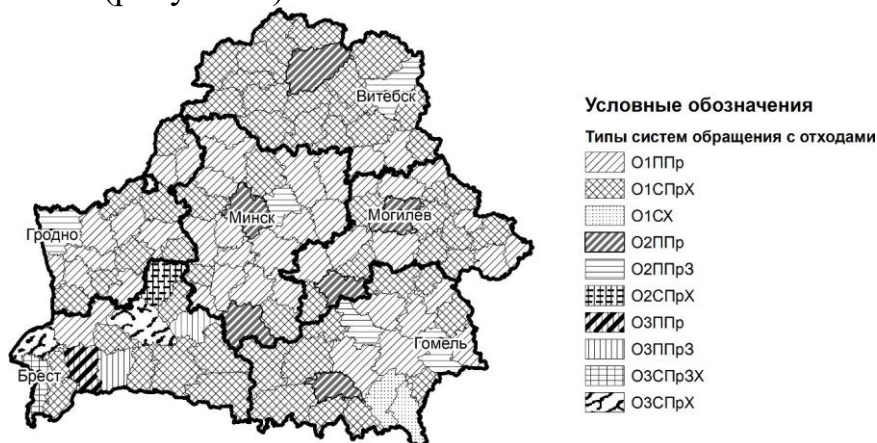


Рис. 3. Типы систем обращения со ртутьсодержащими отходами в разрезе административных районов Республики Беларусь

Брестская область имеет наиболее разнообразную структуру типов обращения с отходами, в которой преобладает тип O1СПрХ (54 %), для которого характерны низкие объемы образования отходов, имеющих сложную морфологическую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию и хранении на предприятии. Наименьшая доля характерна для типа O1ППр, который характеризуется низкими объемами образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на обезвреживание.

В структуре типов обращения со ртутьсодержащими отходами Гомельской области преобладают типы O1СПрХ (48 %), для которого характерны низкие объемы образования отходов, имеющих сложную морфологическую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию и хранении на предприятии, и O1ППр (29 %), который характеризуется низкими объемами образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на обезвреживание.

В структуре типов обращения с ртутьсодержащими отходами Гродненской области преобладают типы O1ППр (53 %), для которого характерны низкие объемы образования отходов, имеющих сложную морфологическую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию и хранении на предприятии, и O1СПрХ (41 %), который характеризуется низкими объемами образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию.

В Витебской области наиболее распространен: тип О1СПрХ (84 %), который характеризуется низкими объемами образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию. Наименее распространен тип О2ППрЗ (5 %), для которого характерен средний объем образования отходов, имеющих сложную структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на обезвреживание и захоронении.

В структуре типов обращения со ртутьсодержащими отходами Минской области преобладает тип О1ППр (70 %). Для данного типа характерны низкие объемы образования отходов, имеющих сложную морфологическую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на обезвреживание и хранения на предприятии. Наименьшую долю имеет тип О2ППрЗ (4 %), который характеризуется средним объемом образования отходов, имеющих сложную структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию и захоронении.

В структуре типов обращения со ртутьсодержащими отходами Могилевской области преобладает тип О1СПрХ (53 %), который характеризуется низкими объемами образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на обезвреживание. Наименьшая доля характерна для типа О2ППрЗ (5 %), который характеризуется средним объемом образования отходов, имеющих сложную структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию и захоронении.

Таким образом, основным видом ртутьсодержащих отходов являются ртутьсодержащие лампы и компактные люминесцентные лампы. В соответствии с проведенной оценкой обращения с ртутьсодержащими отходами были выделены основные типы обращения с ртутьсодержащими отходами в разрезе областей Республики Беларусь. Преобладающим типом обращения с ртутьсодержащими отходами в Республике Беларусь является тип О1СПрХ, к которому относятся 45 % административных районов Республики Беларусь. Для данного типа характерен низкий объем образования отходов, имеющих простую структуру, обращение с которыми заключается в их передаче на предприятия по обезвреживанию.

#### **Библиографические ссылки**

1. Закон Республики Беларусь «Об обращении с отходами» от 20 июля 2007 г. № 271-З // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь.
2. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды от 8 ноября 2007 г. № 85 «Об утверждении классификатора отходов, образующихся в Республике Беларусь» // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь.

# ГЕОГРАФИЯ ГОРНОЛЫЖНОГО ТУРИЗМА В АМЕРИКЕ КАК СРЕДСТВО ПРОДВИЖЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ НА МЕЖДУНАРОДНОМ ТУРИСТСКОМ РЫНКЕ

**В. А. Пядочкина**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*verapyadochkina@gmail.com;*

*науч. рук. – Е.А. Антипова, д-р геогр. наук, проф.*

Горнолыжный туризм в последние три десятилетия развивается очень быстро. Привлекательность горнолыжного туризма обусловлена тем, что это активный вид отдыха в зимнее время. К тому же зимний горный пейзаж отличается высокой эстетичностью, также, как и сам спуск по трассе ярко экипированных лыжников. Благодаря комплексному подходу горнолыжного туризма, совмещаются разные виды рекреационной деятельности, и уделяется внимание здоровью туриста – в этом и заключается актуальность данной работы. Объектом исследования в работе являются страны со специализацией на горнолыжном туризме в Америке, а предметом – географические особенности развития горнолыжного туризма для продвижения Америки на международном туристском рынке. Цель работы – исследовать географию горнолыжного туризма в Америке в разрезе стран как средство продвижения территории на международном туристском рынке.

**Ключевые слова:** горнолыжный туризм, туристический рынок, комплексная оценка, туристическое районирование.

В настоящее время туристско-экскурсионное направление использования гор и возвышенностей является одним из приоритетных. Спрос на горнолыжный туризм постоянно растет, доходы от него занимают существенную долю в туристической отрасли многих стран, открываются курорты в странах, где раньше не был развит этот вид туризма. Целью работы является экономико-географический анализ горнолыжного туризма в Америке в разрезе стран как средство продвижения территории на международном туристском рынке. Основными задачами исследования были: исследовать методику изучения горнолыжного туризма в экономико-географическом контексте, охарактеризовать факторы, определяющие развитие горнолыжного туризма в Америке, изучить особенности и динамику развития горнолыжного туризма в Америке, оценить перспективы развития горнолыжного туризма в Америке. Информационной базой исследования выступили официальные международные статистические данные ежегодного издания «International Report on Snow & Mountain Tourism» [1]. Период исследования – 2016 – 2021 гг.

Для реализации цели в данной работе нами применялись следующие методы научного исследования: 1) литературный метод; 2)

сравнительно-географический метод; 3) метод синтеза; 4) метод обобщения; 5) картографический метод.

В настоящий момент единого определения термина «горнолыжный туризм» не существует. Зарубежные авторы, исследующие вопрос понятийно-терминологического аппарата горнолыжного туризма, по-разному трактуют данный термин. По определению Федерального агентства по туризму России, Горнолыжный туризм – это экстремальный зимний вид туризма, который объединяет в себя горный туризм (катание на сноуборде) и лыжный туризм (катание на горных лыжах) [2].

В работе для анализа использовались следующие показатели: количество горнолыжных курортов, количество иностранных лыжников, количество местных посетителей, количество подъемников, количество лыжников, воспользовавшихся подъемником. Эти показатели позволили увидеть динамику развития горнолыжного туризма в Америке. Для оценки социально-экономического потенциала горнолыжного туризма в регионе были проанализированы: ВВП на душу населения по ППС стран Америки, стоимость ски-пасс на день курортов региона, аренда снаряжения на день, стоимость услуги тренера на день, а также стоимость ночи в отеле комплекса. Все показатели были проанализированы нами за период 2016–2021 гг.

Комплексная оценка уровня социально–экономического развития Америки за последние пять лет, показала, что регионы, специализирующиеся на горнолыжном туризме, относятся к разряду регионов с высоким уровнем развития. Это обуславливается высокой эффективностью использования центров горного туризма и, в частности, также характеризуется наличием единой комплексной концепции развития горных видов туризма. Нами установлено, что в странах с наибольшим ВВП на душу населения по ППС расположены более дорогие горнолыжные курорты (курорты США и Канады), с наименьшим ВВП на душу населения по ППС – дешевые горнолыжные курорты (курорты Аргентины и Чили).

Америка занимает второе место после Европы по популярности горнолыжного туризма. Хорошие характеристики склонов, ухоженные и разнообразные трассы, развитая инфраструктура курортов, возможность совмещать катание с экскурсионной программой – безусловные преимущества горнолыжной Америки (таблица).

### Динамика развития горнолыжного туризма в странах Америки

Страна/регион	Количество горнолыжных курортов, ед.	Количество иностранных лыжников, млн. чел.	Количество местных посетителей, млн. чел.	Количество подъемников, шт.	Количество лыжников, воспользовавшихся подъемником, тыс. чел.
2016 г.					
Аргентина	22	1,5	1,1	144	10,4
Канада	288	18,7	4,3	922	20,3
Чили	21	0,9	0,5	122	7,4
США	470	25,0	56,7	2970	19,2
Америка	801	46,2	62,8	4158	57,1
Среднее по региону	200	11,5	15,7	1039	14,3
2021 г.					
Аргентина	22	1,5	1,1	145	10,4
Канада	280	18,5	4,3	922	20,1
Чили	21	0,8	0,5	127	6,0
США	470	25,0	54,3	2975	18,3
Америка	793	45,8	60,1	4169	54,7
Среднее по региону	198	11,4	15,0	1042	13,7

Анализ показателей позволил сделать ряд выводов. Так, количество горнолыжных курортов в странах Америки к 2021 г. сократилось на 1 %. Это связано с закрытием горнолыжных курортов в США. Если говорить о динамике иностранных и местных посетителей в регионе, то она идет на спад с 2016 г. по 2021 г. Данная ситуация характерна для всех стран региона. В странах Америки количество подъемников увеличилось на 11 единиц, что связано с появлением подъемников в Аргентине, Чили и США. Количество лыжников, которые воспользовались подъемниками в странах региона также сократилось к 2021 г. на 2462 человека. Можно сделать вывод, что COVID-19 оказал значительное влияние на развитие горнолыжного туризма в рассматриваемом регионе.

На заключительном этапе нами было сделано туристическое районирование с выделением стран региона с высоким и низким уровнем развития горнолыжного туризма, а именно с показателями выше и ниже средних значений в регионе. Проведено сравнение показателей стран региона со средним значением показателей по

региону. Тип 1 – страны с высоким уровнем развития горнолыжного туризма (с показателями выше среднерегиональных). К этому типу относятся: Канада и США. К типу 2, который характеризуется, как страны с низким уровнем развития горнолыжного туризма (с показателями ниже среднерегиональных). К типу 2 относятся следующие страны: Аргентина и Чили.

Как было отмечено выше, одной из причин, повлиявшей на снижение отдельных показателей развития горнолыжного туризма в Америке, была пандемия COVID-19. Пока неясно, повлечет ли текущий кризис COVID-19 долгосрочные изменения в моделях потребления. Однако уже отмечалось, что в отношении катания на лыжах модели потребления имеют тенденцию меняться в неправильном направлении. Лыжи все больше рассматриваются как вид досуга, а не как вид спорта. Для решения этой проблемы было сделано очень мало, и даже сомнительно, что отрасль осознала угрозу, связанную с этим изменением. Сохранение этой тенденции ставит под угрозу горнолыжную индустрию, так как отдых гораздо больше подвержен тенденциям и моде, чем спорт [1].

В целом, исследование показало, что Американский регион благоприятен для развития горнолыжного туризма. На сегодняшний день туристы стремятся не просто отдохнуть, реализовав свои рекреационные потребности, но и хотят разнообразить свой отдых, путем включения полезных составляющих для развития своих физических, духовных сил и совершенствования умения техники катания. Так лечебно-оздоровительные элементы, способствуют улучшению самочувствия и восстановлению функций организма, воздействие происходит посредством горного воздуха и не только. Таким образом, в Американском регионе есть все возможности для реализации потребностей.

#### **Библиографические ссылки**

1. Laurent Vanat. International Report on Snow & Mountain Tourism, 2021.
2. Федеральное агентство по туризму России: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.russiatourism.ru>.
3. Зырянов А.И., Королев А.Ю. Туристское районирование горных территорий // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 19-25.

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЯ ОХРАНЫ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПОЛЕССКОГО РЕГИОНА В РАЗРЕЗЕ СТРАН

**Н. М. Роговский**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*nikita.rogovski.03@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. Г. Груммо, канд. биол. наук, доц.*

Полесье является одним из наиболее сохранившихся и ценных природных объектов Европы. Трудно переоценить значение водно-болотных и лесных угодий данного природного комплекса, которые препятствуют развитию парникового эффекта и являются «рефугиумом» биоразнообразия для многих видов живых организмов. На данный момент остро стоит вопрос сохранения ландшафтов Полесского региона ввиду изменения климата, а также последствий хозяйственной деятельности человека. В силу того, что Полесье является обширным регионом, находящимся на территории четырёх государств, сохранение биоразнообразия требует координации усилий между ними. В данной работе представлены результаты анализа текущего состояния природоохранной сети территории Полесья. Дана оценка уровню охраны природных территорий в соответствии с различными программами и организациями. Построены карты-схемы расположения объектов каждой из представленных сетей природных территорий. Составлена стратификация Полесского региона по уровню в сохранении природных территорий.

**Ключевые слова:** особо охраняемые природные территории, Полесье, Изумрудная сеть, территории важные для птиц, рамсарские угодья.

Создание территорий с особым режимом охраны природы позволяет регулировать или полностью запрещать хозяйственную деятельность человека с целью сохранения биоразнообразия. Существует большое количество государственных и некоммерческих организаций и инициатив в сфере охраны природы. Среди них можно выделить экологическую сеть Natura 2000, Emerald Network (Изумрудная сеть), международную программу International Birds Area (Территории важные для птиц), сеть водно-болотных угодий согласно Рамсарской конвенции и особо охраняемые природные территории (далее – ООПТ).

Целью работы было апробирование сравнительно-географического и картографического методов для выявления пространственной неоднородности расположения природных территорий в пределах трансграничного объекта – Полесья. Анализ уровня охраны природных территорий региона был проведён в среде ГИС ArcGIS 10.7. Границы региона проводились в соответствии с физико-географическим районированием Польши, Украины и Беларуси [1, 5, 8]. В России имеется более абстрактное понятие о Полесье и его границах, поэтому контур было решено провести по северной границе широколиственных

лесов, и по Неруссо-Деснянскому Полесью на юге. Стоит также сразу отметить, что существуют некоторые трудности в определении границ Полесья ввиду наличия расхождений при проведении физико-географического районирования в странах. В итоге была построена карта-схема расположения Полесья и рассчитана его площадь, равную 183 230,0 км<sup>2</sup>, из которых 6 910,9 км<sup>2</sup> расположены в Польше, 15 145,0 км<sup>2</sup> – в России, 60 506,4 км<sup>2</sup> – в Беларуси, и 100 713,1 км<sup>2</sup> – в Украине (рисунок 1).

Далее в проект были добавлены и обработаны открытые данные размещения объектов Изумрудной сети, Natura 2000, Рамсарских угодий, Территорий важных для птиц и ООПТ (рисунок 2). Каждая из представленных сеток объектов имеет свои минусы и плюсы при подобном анализе. Сеть ООПТ является наиболее репрезентативной для данного исследования, имея большое количество объектов разной категории охраны находящихся под контролем у профильных Министерств, что в теории говорит о соблюдении норм воздействия на окружающую среду в соответствии с категорией природной территории. Однако у каждой страны имеется различие в категориях ООПТ, что является недостатком для сравнения уровня охраны природоохранной сети по странам. Из остальных трёх сеток наиболее объективной могла бы явиться Изумрудная сеть и Natura 2000 ввиду их полной схожести – обе подчиняются Резолюциям Бернской конвенции (первая была создана для стран Европы, не входящих в Евросоюз, вторая – для членов Евросоюза). Однако в странах ЕС данная сеть объектов является центральным звеном в сохранении биоразнообразия на законодательном уровне, в отличие от стран с Изумрудной сетью.

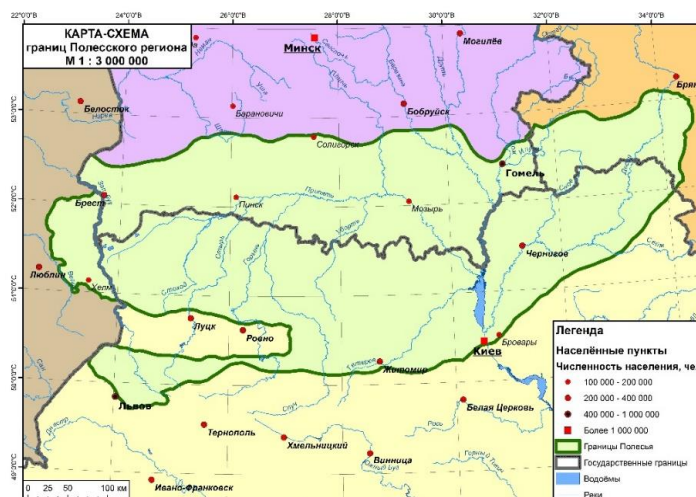


Рис. 1. Местоположение Полесья (составлено автором по [1, 5, 8])



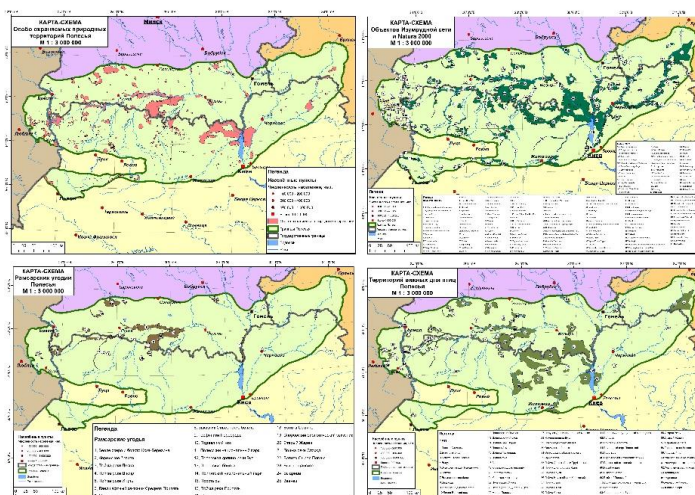


Рис. 2. Пространственное положение особо охраняемых природных территорий, объектов Изумрудной сети, рамсарских угодий и территорий важных для птиц в Полесье (составлено автором по [2-4, 6, 7, 9-11])

Рассчитанные показатели картографируемых единиц занесены в таблицу. Стоит отметить, что наибольшая доля сетей природных территорий принадлежит Украине и Беларуси, где в пределах Полесья наблюдается наименьшая степень воздействия на окружающую среду.

#### Количественная характеристика сетей природных территорий Полесья

Природные территории	Параметр оценки	Страны				Всего
		Беларусь	Польша	Россия	Украина	
ООПТ	S, км <sup>2</sup>	6 326,19	658,60	123,49	8 647,18	15 755,46
	Доля от S <sub>Полесья</sub> , %	3,45	0,36	0,07	4,72	8,60
Изумрудная сеть / Natura 2000	S, км <sup>2</sup>	12 181,56	1 201,7	2 028,66	18 663,49	34 075,41
	Доля от S <sub>Полесья</sub> , %	6,65	0,66	1,11	10,19	18,6
Рамсарские угодья	S, км <sup>2</sup>	4 810,95	97,68	-	1 269,26	6 177,89
	Доля от S <sub>Полесья</sub> , %	2,63	0,05	-	0,69	3,37
Территории важные для птиц	S, км <sup>2</sup>	9 242,26	585,46	1 965,34	4 876,50	16 669,56
	Доля от S <sub>Полесья</sub> , %	5,04	0,32	1,07	2,66	9,10

Для определения очагов сохранения природных территорий была составлена карта стратификации по уровню охраны (рисунок 3).

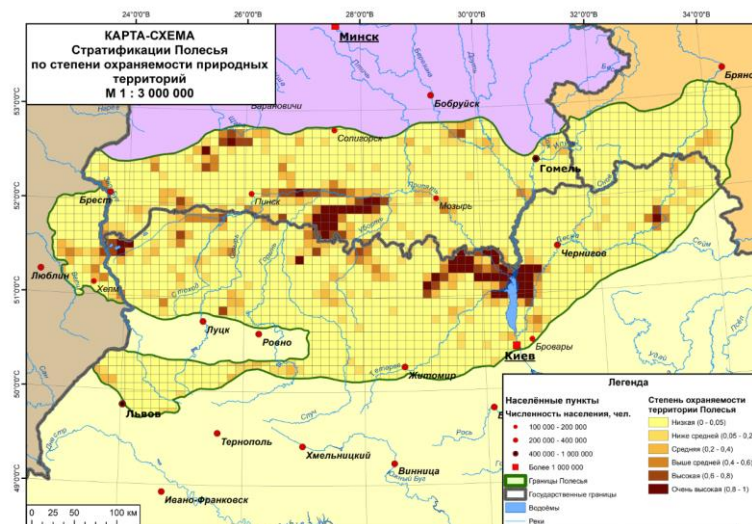


Рис. 3. Стратификация Полесья по уровню охраны природных территорий (составлено автором)

Основываясь на данных о местоположении ООПТ была составлена сетка с квадратами площадью в  $10 \text{ км}^2$ , и высчитана доля вошедших объектов по каждому квадрату. Выделены следующие *hot-spots* – Северная часть Киевского водохранилища, включая Чернобыльскую зону, Припятское Полесье и Шацкие озёра.

### Библиографические ссылки

1. Географія / Г.Д. Довгань, О.Г. Стадник. – Харків, 2021. – С. 157.
2. Интерактивный атлас природно-заповідного фонду України [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pzf.land.kiev.ua>.
3. ООПТ Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by>.
4. ООПТ России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oort.aari.ru>.
5. Физико-географическое районирование Беларуси в европейской десятичной системе районирования / Марцинкевич Г.И. и др. – Минск: Вестник Белорусского государственного университета. – 2001. – № 1. – С. 85-90.
6. Emerald Network [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.emeraldnetwork.info>.
7. IBA [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.birdlife.org>.
8. *Kondracki, J. Geografia regionalna Polski*. – Warszawa: Naukowe PWN, Wyd 3, 2002. – 440 s.
9. Mapa obszarów chronionych Polski [Electronic resource]. – Mode of access: <https://mapa.wirtualneszlaki.pl>.
10. Natura 2000 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ec.europa.eu>.
11. Ramsar convention [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ramsar.org>.

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА КАРТОГРАММЫ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ПЛОТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ БЕЛАРУСИ

**О. А. Розжаловец**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*oljadatovna@gmail.com;*

*науч. рук. – В. М. Храмов, ст. преп.*

В статье рассмотрено картографирование плотности населения способом картограммы. Изучены особенности применения данного способа, его достоинства и недостатки, выявлены причины его популярности. Рассмотрено создание различных вариантов картограмм плотности населения Беларуси. Сделаны выводы о возможности улучшения географической достоверности данного способа при показе плотности населения.

**Ключевые слова:** способ картограммы, плотность населения, картографирование населения, способы изображения.

Плотность населения – один из основных показателей населения, отражающим густоту заселения территории. Данные карты являются неотъемлемой частью любого социально-экономического или комплексного атласа, используются в школах, учреждениях высшего образования, а также в научных исследованиях.

Наиболее распространенным способом изображения при картографировании плотности населения Беларуси являются картограммы. Популярность данного способа можно объяснить минимальными требованиями к масштабу, географической основе, детальности статистических данных, а также простота построения картограмм. Основным недостатком способа считается затушевывание реального распределения по территории картографируемого явления.

Проблема недостаточной географичности способа заключается в применении картограмм только по крупным административно-территориальным единицам (областям, районам). Широкое распространение в Беларуси данных картограмм обусловлено ведением статистического учета по соответствующим административным единицам, доступностью этих данных, простотой и легкостью составления карт. Их недостаток заключается в том, что скрывается реальное размещение, поскольку если население внутри района рассредоточено, то такая карта даст ложное представление о его равномерном распространении.

Развитие современных технологий позволило достаточно просто и быстро создавать картограммы, которые могут отобразить

неравномерное распределение плотности населения внутри районов. К ним относятся картограммы, составляемые по административным единицам низшего ранга (сельским советам), регулярным сетям (по квадратам, тетра- или гексагональным полигонам) или уточненные картограммы по границам ареалов расселения. Но следует отметить, что данные картограммы требуют подробных статистических данных по каждому населенному пункту.

Для сравнения географичности различных картограмм создано несколько карт плотности сельского населения Беларуси: по районам, которая включала в себя две переписи населения за 2009 и 2019 гг. [1] (рисунок 1), по сельским советам (рисунок 2) и по геометрической сети (30 км<sup>2</sup>)(рисунок 3).

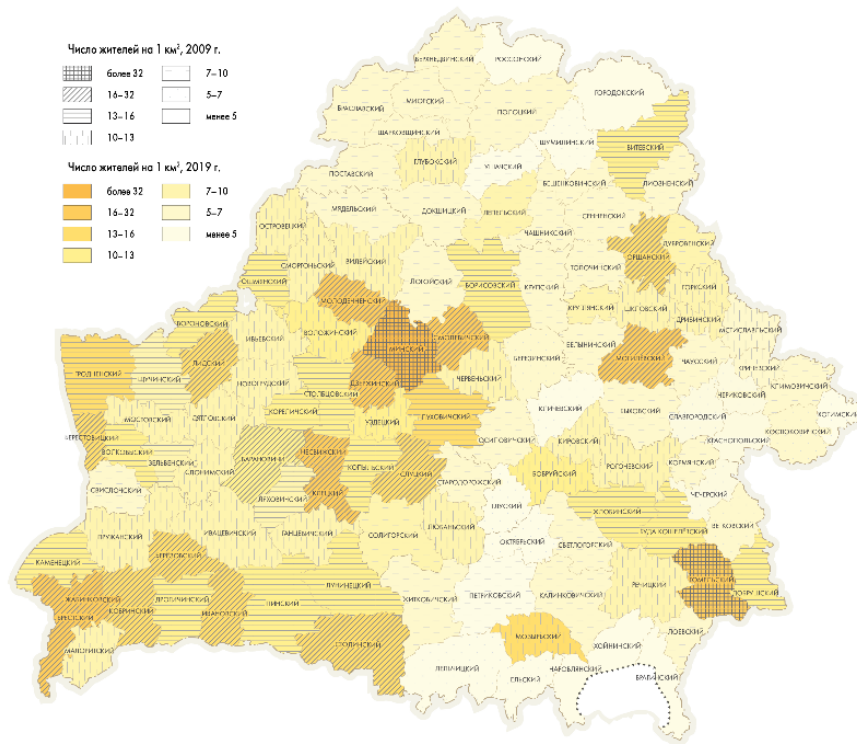
Кратко процесс создания картограмм может быть представлен следующим образом:

- Шаг 1. Определение детальности статистических данных и в соответствии с этим выбор территориальных единиц для картографирования. На данном этапе обосновывается выбор той или иной картограммы, ее масштаб, назначение. Происходит подготовка и, если необходимо, построение территориальных границ.

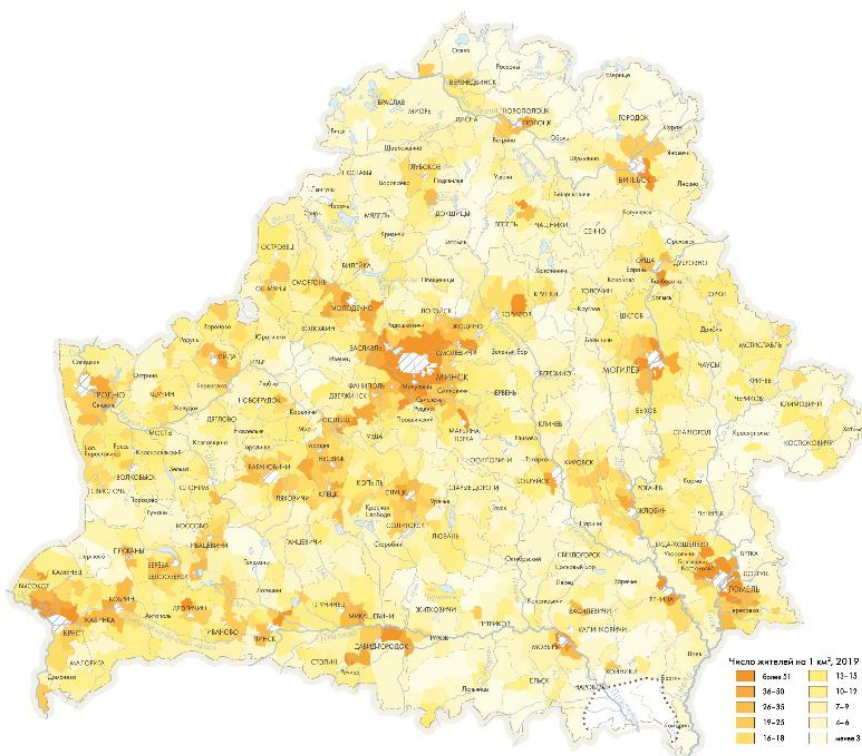
- Шаг 2. Обработка статистического материала: расчет плотности населения каждой территориальной единицы на 1 км<sup>2</sup>. Для районов используются обобщенные данные о численности, которые далее делились на соответствующие им по площади районы. Для сельских советов и геометрической сети работа происходит непосредственно с переписью населения, которая включает информацию о численности каждого населенного пункта. С помощью ArcMap определялось отношение каждого населенного пункта к границам, высчитывалась их суммарная численность, а после делилась на их площадь.

- Шаг 3. Классификация значений. Развитие технологий упростило данный процесс. Исходя из величин плотности населения в ArcMap можно легко разбить данные на классы: равных, кратных или произвольных интервалов. Необходимо только указать поле, которое необходимо классифицировать и количество классов.

- Шаг 4. Разработка цветовой шкалы и штриховки. Для отображения плотности населения выбрана цветовая гамма, переходящая от желто-оранжевых оттенков к коричневым. Усиление цвета или штриховки происходит по мере того, как увеличиваются показатели плотности населения [2, с. 75]. В картограмме по районам данные на 2019 год отображены цветом, а на 2009 г. – штриховкой (рисунок 1).



*Рис. 1. Картограмма плотности населения Беларуси по административным районам (2009, 2019)*



*Рис. 2. Картограмма плотности населения Беларуси по сельским советам (2019)*

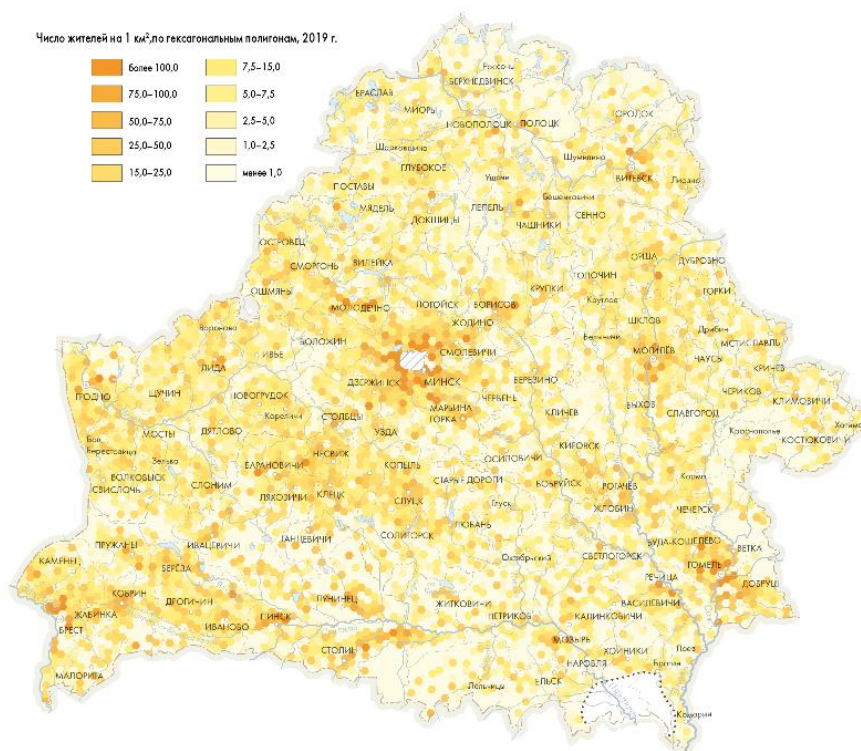


Рис. 3. Картограмма плотности населения Беларуси по гексагональным полигонам (2019).

Географическая достоверность полученных картограмм можно оценить на примере одного района (Гродненского), представленного на рисунке 4. Главный вывод можно сформулировать следующим образом: чем дробнее территориальное деление, тем точнее картограмма передает географические особенности размещения населения.



Рис. 4. Сравнение различных видов картограмм:  
а) по районам, б) по сельским советам, в) по геометрической сети

Таким образом, картограммы неспроста являются самым распространенным способом отображения плотности населения. К

достоинствам картограмм относится простота построения и восприятия, автоматизированность, минимальные требования к географической основе, хорошее сочетание с другими способами картографического изображения, различные вариации. Из недостатков стоит отметить затушевывание географических особенностей явления и тем самым создание представление о равномерном распределении значений в пределах территориальной единицы. Однако данная проблема решается переходом от районов к сельским советам, регулярной сети или уточнению границ по средствам ареалов расселения (уточненная картограмма). Сочетание дробного деления и подробных статистических данных дадут карту плотности населения, которая для средне- и мелкомасштабного картографирования не будет уступать по географической достоверности способу псевдоизолиний или количественному фону.

#### **Библиографические ссылки**

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 12.05.2021.
2. *Баранский, Н.Н.* Экономическая картография : учеб. пособие / Н. Н. Баранский, А. И. Преображенский. – М. : Географгиз, 1962. – 286 с.

# ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЛЕСОПАРКА «МЕДВЕЖИНО» ФРУНЗЕНСКОГО РАЙОНА г. МИНСКА

У. А. Рондак

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
ulyana333@inbox.ru;  
науч. рук. – И.И. Счастливая, канд. географ. наук, доц.*

Изучено экологическое состояние зеленых насаждений лесопарка «Медвежино» и дана его оценка. В процессе полевых исследований обследовано 136 деревьев в рамках 4 площадок (южной, центральной, западной, северной) древостоя. Для последующей оценки использован метод расчёта индексов состояния древостоя на каждой площадке. Оценка показала, что большинство (50 %) древостоев являются ослабленными (западная и центральная площадки), 28 % насаждений (северная площадка) – здоровые с признаками ослабления и небольшая их часть (22 %) в рамках южной площадки – поврежденные.

**Ключевые слова:** зелёные насаждения, экологическое состояние насаждений, экологическая оценка насаждений, экологический мониторинг.

Городские озеленённые территории можно назвать одним из самых необходимых элементов урбанизированной среды. Значимость зелёных насаждений заключается в выполнении ими незаменимых для городской территории функций. Растительность существенно улучшает санитарно-гигиенические условия города и формирует рекреационные территории города. Способность эффективного выполнения этих функций зависит от жизненного состояния насаждений, которое ухудшается под влиянием условий городской среды.

Структура озеленённых территорий Фрунзенского района г. Минска включает в себя насаждения общего, ограниченного и специального пользования [1]. При этом в число зелёных насаждений общего пользования входит крупная озеленённая территория – лесопарк «Медвежино». Лесопарк расположен в юго-западной части района, занимая площадь 53,7 га [2]. Экологическое состояние растительности лесопарка в первую очередь связано с влиянием автомобильных дорог и рекреационной нагрузкой.

Исследование на территории лесопарка «Медвежино» проводилось в зимний период 2022 г., при этом были осмотрены исключительно хвойные виды: ель европейская и голубая, а также сосна обыкновенная. Обследованная выборка деревьев состоит из 136 растений, среди которых 112 елей и 24 сосны. При этом объективная оценка экологического состояния насаждений возможна только при объединении осмотренных древесных растений в древостой, т.е.



совокупности деревьев. Поэтому на территории лесопарка заложено 4 площадки с приблизительно одинаковым количеством произвольно отобранных деревьев (от 30 до 37): южная, северная, западная и центральная. Площадки примерно равны по площади и выделены в рамках дорожно-тропиночной сети лесопарка. Южная площадка заложена в непосредственной близости к автомобильной дороге с самым интенсивным движением. Центральные и западные площадки активно посещаются местными жителями вследствие непосредственной их близости к жилой застройке. Северная же площадка также расположена в непосредственной близости от автомобильной дороги, но отличается небольшой рекреационной нагрузкой (рисунок 1).

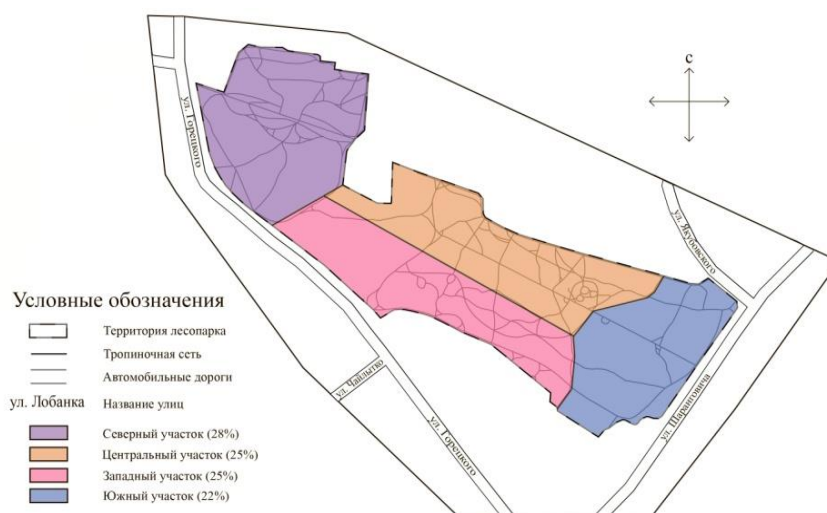


Рис. 1. Участки исследования зеленых насаждений лесопарка «Медвежино»

Полевые исследования в рамках площадок заключаются в изучении экологического состояния насаждений посредством анализа таких показателей, как степень изреженности кроны (количество просветов в процентах), цвет хвои, наличие усыхания хвои и ветвей, механических повреждений (рисунок 2). Характеристики определены в соответствии со шкалой категорий состояния деревьев В. А. Алексеева [3].

В результате полевых исследований выявлено, что на южной площадке присутствуют 9 здоровых деревьев, 17 ослабленных, 7 сильно ослабленных и 4 усыхающих. На северной площадке отмечено: здоровых деревьев – 16, ослабленных – 15, сильно ослабленных – 4. На западной площадке зафиксировано: здоровых деревьев – 13, ослабленных – 15, сильно ослабленных – 6. На центральной площадке выявлено 10 здоровых деревьев, 16 ослабленных, 3 сильно ослабленных и 1 усыхающее.

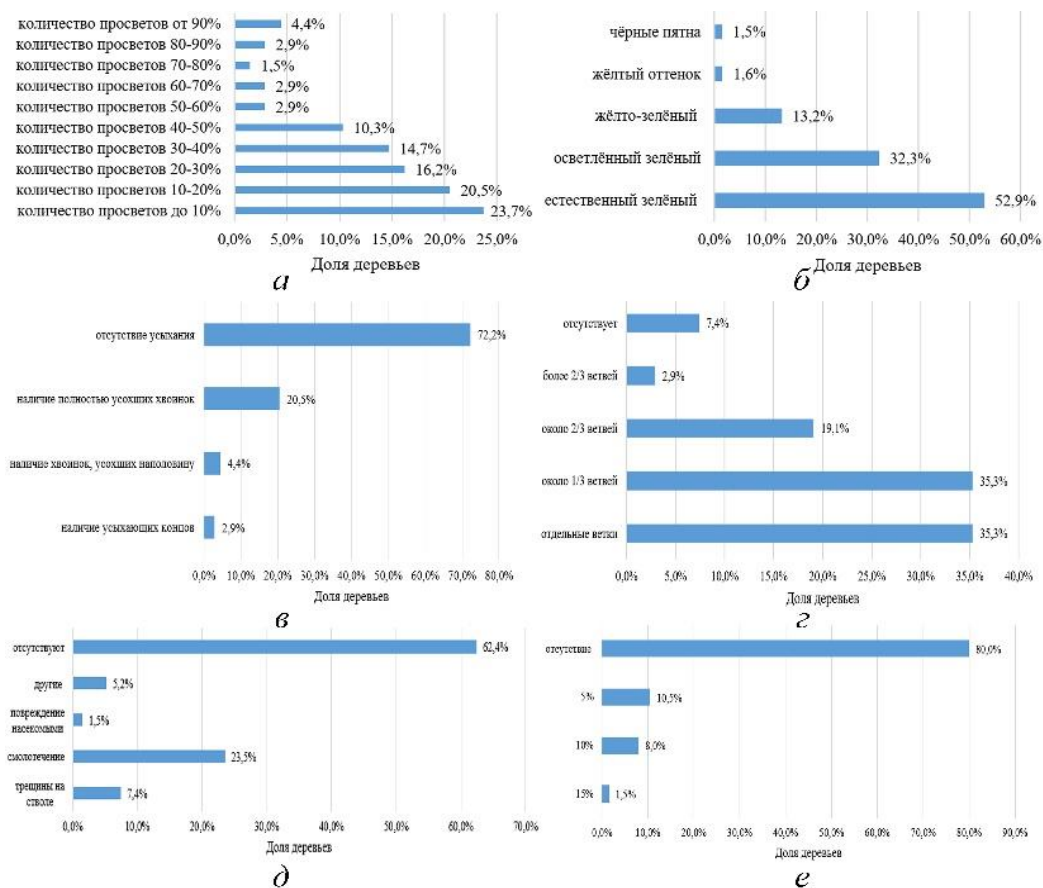


Рис. 2. Дендрометрические показатели обследованных деревьев на территории лесопарка «Медвежино»: а – изреженность кроны; б – цвет хвои; в – усыхание хвои; г – усыхание ветвей; д – механические повреждения; е – окорение ствола

Оценка экологического состояния зеленых насаждений основывается на расчёте индекса состояния древостоя (ИСД), который производится по формуле [3, стр. 54]:

$$Ln = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N, (1)$$

где  $Ln$  –жизненное состояние древостоя;  $n_1$  – количество здоровых (без признаков ослабления) деревьев,  $n_2$  – ослабленных,  $n_3$  – сильно ослабленных,  $n_4$  – усыхающих;  $N$  – общее количество деревьев.

Полученные результаты расчетов экологического состояния зеленых насаждений в рамках площадок лесопарка соотнесены со шкалой их жизненного состояния В. А. Алексеева. В соответствии с ней древостои с индексом состояния 90-100 % относятся к категории здоровые, 80-89 % – здоровые с признаками ослабления, 70-79 % – ослабленные, 50-69 % – поврежденные, 20-49 % – сильно поврежденные, менее 20 % – разрушенные [3]. состояние насаждений на разных его площадках.

Выявлено, что на южной площадке лесопарка индекс состояния насаждений равен 65 %, что соответствует категории «древостой повреждённый». На северной площадке ИСД 80 %, что соответствует категории «древостой здоровый с признаками ослабления». На западной и центральной площадках ИСД 76 % и 75 %, что позволяет отнести их насаждения к категории «древостой ослабленный» (рисунок 3).

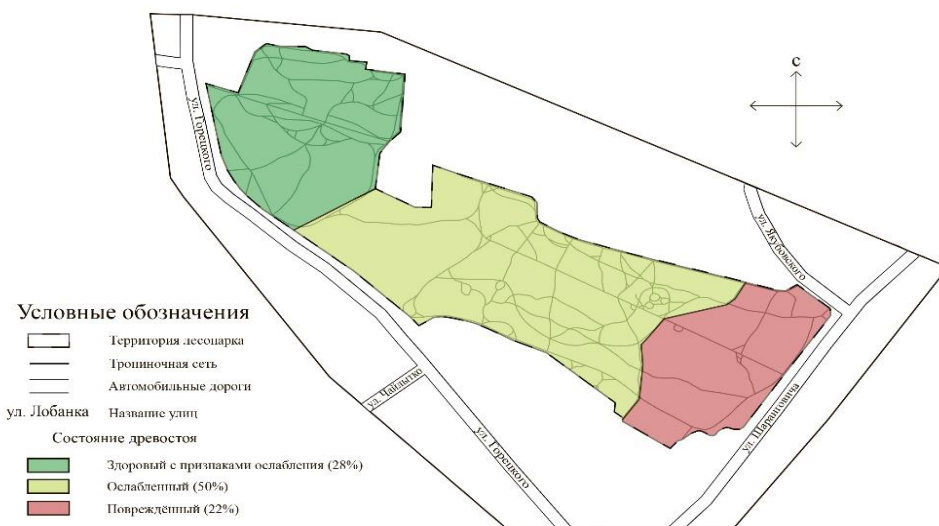


Рис. 3. Оценка экологического состояния древостоя лесопарка «Медвежино»

По результатам оценки видно, что в целом состояние зелёных насаждений лесопарка «Медвежино» оценивается как удовлетворительное, ведь большинство (78 %) древостоев являются здоровыми с признаками ослабления (северная площадка) или ослабленными (западная и центральная площадки) и только небольшая их часть (22 %) в рамках южной площадки – поврежденными.

Для поддержания и улучшения экологического состояния зеленых насаждений лесопарка необходимо проводить регулярный экологический мониторинг и своевременно осуществлять комплекс санитарно-защитных мероприятий.

#### Библиографические ссылки

1. ТКП 45-3.01-116-2008. Градостроительство. Населённые пункты. Нормы планировки и застройки. Минск, 2018.
2. Схема озелененных территорий общего пользования г. Минска. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [minsk.gor.by](http://minsk.gor.by).
3. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение – 1989. – № 4 – С. 51-57.

# ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ АЛЛЮВИАЛЬНОГО ЛИТОГЕНЕЗА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

О. В. Силицкая

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
silitckaya@yandex.by;  
науч. рук. – О. В. Лукашёв, канд. геол.-минер. наук, доц.*

Представлены основные черты геохимии аллювиального литогенеза на территории Беларуси. Рассмотрены геохимические обстановки и их распределение в долинных комплексах рек Беларуси. Охарактеризованы группы гипергенных минералов, образующихся при геохимических процессах аллювиального литогенеза. Рассмотрены литогеохимические фации, выделенные по особенностям процессов и среды гипергенного литогенеза, и формы (состояния) нахождения химических элементов.

**Ключевые слова:** аллювиальный литогенез, макро- и микроэлементы, гипергенное минералообразование, фации аллювия, формы нахождения.

По условиям миграции химических элементов в долинных комплексах рек выделяются следующие геохимические обстановки: элювиальная, супераквальная и субаквальная [1].

*Элювиальная обстановка* выделяется на повышенных формах рельефа, свойственна преимущественно террасам. Для неё характерно глубокое залегание уровня грунтовых вод. Поступление химических элементов совершается исключительно с атмосферными осадками и пылью.

*Супераквальная (надводная) обстановка* формируется на понижениях рельефа, свойственна пойме. Здесь грунтовые воды подходят близко к поверхности и по капиллярам могут подниматься до корневого слоя. Кроме поступления из атмосферы характерен приток химических элементов с твёрдым и жидким стоком из элювиальной обстановки.

*Субаквальная обстановка* формируется на различных по составу подводных отложениях рек и озёр. Происходит снос материала из элювиальной и субаквальной обстановок. После чего химические элементы привносятся с жидким и твёрдым стоком в обстановку.

В зависимости от миграции вод субаквальная обстановка подразделяется на трансаквальную – с проточной водой (проточные озёра и реки) и аквальную – с непроточной водой (непроточные озёра и водоёмы) [2].

В долинных комплексах рек Беларуси распределение геохимических обстановок подвержено некоторым закономерностям. Например, вниз по течению в долинных комплексах субаквальные обстановки

сменяются супераквальными. В субаквальных обстановках влияние на литогенез накопления обломочного материала уменьшается, а биогенного и хемогенного возрастает от стрежени к пойме и вниз по течению. Биогеохимические процессы и накопление органического вещества усиливаются с развитием старичных и болотных водоёмов. Вследствие зарастания стариц субаквальная обстановка сменяется супераквальной. В супераквальных обстановках накопление обломочного материала ослабевает, а биогенное и хемогенное усиливается от приречной к центральной и притеррасовой частям поймы.

При геохимических процессах в аллювии долинного комплекса р. Днепр образуются 6 групп гипергенных минералов [1]: 1) окислы и гидроокислы *Fe*, *Mn*, *Ti*, *Si*; 2) карбонаты *Ca*, *Mg*, *Fe*, *Mn*; 3) фосфаты; 4) сульфиды *Fe*; 5) сульфаты *Ca*; 6) алюмосиликаты.

*Гидроокислы Fe* представлены налётами и корками, сгустками, примазками на обломках, конкреционными стяжениями, ортзандами и ортштейновыми горизонтами, болотными рудами, псевдоморфозами по корням растений. Сложены гидротитом, коллоидными гидроокислами, лимонитом и др. В русле р. Днепр отмечаются плёнки и разводы окислов *Fe* на поверхности вод и прибрежных участках.

*Гидроокислы Mn* образуют смеси с окислами *Fe*. Иногда отмечаются самостоятельные выделения псиломелана в виде примазок и порошковатых налётов.

*Гидроокислы Ti* представлены повышенными содержаниями лейкоксена в ассоциации тяжёлых минералов донных отложений долинных комплексов рек Днепра, Припяти и других рек Беларуси. Встречаются в виде зёрен, плёнок и налётов на ильмените и биотите.

*Гидроокислы Si* в виде новообразований опала, развивающихся по растительным остаткам, отмечены в русловом и пойменном аллювии бассейна р. Припять.

*Карбонаты* в донных отложениях долинного комплекса р. Днепр встречаются в виде порошковатых налётов, примазок, конкреций и самостоятельных горизонтов, образующихся как в современных пойменных и старичных условиях, так и древних аллювиальных свитах. Представлены кальцитом, реже – доломитом, сидеритом.

*Фосфаты* в донных отложениях бассейна р. Днепр встречаются в старицах, на заболоченных поймах и на первых надпойменных террасах; реже отмечаются в русловом аллювии (рек Припять, Горынь, Птичь и др.). Представлены порошковатыми, плёночными и комковатыми образованиями вивианита, бераунита и др.

*Сульфиды Fe* в донных отложениях встречаются редко. Пирит и марказит отмечены в старичных, реже пойменных осадках. Иногда присутствует гидротроилит и мельниковит.

*Сульфаты Ca* (гипс) не являются типоморфными для донных отложений рек Беларуси. Редкие проявления встречены в пойменных отложениях муравинского возраста в долине р. Припять.

*Алюмосиликаты* формируются преимущественно за счёт выветривания полевых шпатов и слюд – гидрослюда, монтмориллонит и др.

По особенностям процессов и среды гипергенного литогенеза выделяются следующие литогеохимические фации [1]: литогенная; сиаллитно-глинистая; сиаллитно-ферритная; сиаллитно-карбонатная; биогенная.

*Литогенная фация* характеризуется накоплением обломочного, в основном песчаного материала; максимальными концентрациями *Si*, минимальными *Al*, *Ca*, *Mg*, *K*, *Na* и микроэлементов; слабощелочной слабокислой средой. Фация соответствует русловым и прибрежно-пойменным обстановкам.

С собственно пойменными и старичными отложениями связана *сиаллитно-глинистая фация*, выделяющаяся аккумуляцией преимущественно глинистого и илистого материала, повышенными содержаниями *Al*, активной миграцией основных компонентов, усилением коагуляции, сорбции, гидрогенного и биогенного накопления элементов, сопровождающихся вторичным минералообразованием окислов железа, карбонатов; среда преимущественно слабокислая.

В пойме в обстановке резких изменений окислительно-восстановительной среды и интенсивных геохимических реакций выделяются фации *сиаллитно-ферритных* и *сиаллитно-карбонатных* продуктов.

*Биогенная фация* связана с накоплением органического вещества, соединений Fe, Ca, K и микроэлементов, кислой средой, господством биогеохимических процессов миграции и концентрации элементов с формированием гипергенных окислов железа, вивианита, опала, карбонатов и различных органических соединений. Приурочена к собственно старичным и болотным условиям.

Особенности миграции и концентрации элементов в различных фациальных условиях влияют на их распределение. В ряду аллювиальных литогеохимических фаций литогенная – сиаллитно-глинистая – биогенная происходит закономерное уменьшение содержания *Si* и увеличение *Al*, *Ca*, *Mg*, *K*, *Na*, *Ni*, *Cr*, *V*, *Cu*, *Ba*, *Ti* и т. д. Геохимическая специфика среды проявляется в составе осадков даже

одного литологического типа, формирующихся в различных фациальных обстановках [1].

В естественных условиях Беларуси для химических элементов в донных отложениях характерно нахождение преимущественно в прочносвязанной форме в кристаллической решётке тех или иных минералов [3].

В осадках водохранилища «Минское море» в условиях техногенного воздействия содержание  $Zn$  в кристаллической структуре минералов составляет 60 % от общего содержания  $Zn$ , в 2 км ниже плотины Чижовского водохранилища этот показатель составляет 14 %, тогда как в устье канала Минской станции аэрации – 3 %, и далее, вниз по течению – 7 %. С другой стороны, в указанном направлении соответственно содержание  $Zn$  в адсорбированной и гидроксидной формах составляет от 8 до 34–41 % и с 18 до 28–40 %. В осадках водохранилища «Минское море» содержание  $Cu$  в гидроксидной форме составляет 74 % от общего содержания элемента. В устье канала Минской станции аэрации содержание  $Cu$  в органической форме составляет 70 % от общего содержания элемента, содержание  $Cd$  в адсорбированной форме – 61 % [4].

При изучении закономерностей распределения металлов-загрязнителей по отдельным фракциям гранулометрического спектра, согласно данным [5], в техногеохимических обстановках наблюдается преимущественный рост содержания  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Zn$  в пелитовой и мелкодисперсной фракциях, что связано с резким естественным увеличением содержания в этих фракциях реагирующего с металлами органического вещества. Изучение металлов в мелких гранулометрических фракциях позволяет проследивать техногенные аномалии в осадках на значительно бóльших удалениях от источников загрязнения, чем при работе с осадком в целом (например, с фракцией менее 1 мм).

Таким образом, в естественных условиях Беларуси для химических элементов характерно нахождение преимущественно в прочносвязанной форме в кристаллической решётке тех или иных минералов. В зависимости от особенностей протекания процессов техногенного загрязнения и геохимических свойств элементов наблюдается различная степень их перераспределения между указанными формами. Определение форм позволяет судить об интенсивности протекания техногенных процессов и вовлечённости химических элементов в геохимическую миграцию.

### Библиографические ссылки

1. *Кузнецов, В. А.* Геохимия аллювиального литогенеза / В. А. Кузнецов. – Минск: Наука и техника, 1973. – 280 с.
2. *Чертко, Н. К.* Геохимия: пособие / Н. К. Чертко. – Минск: БГУ, 2016. – 295 с.
3. *Кузнецов, В. А.* Метод постадийных вытяжек при геохимических исследованиях / В. А. Кузнецов, Г. А. Шимко. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 88 с.
4. *Савченко, В. В.* Техногенный поток рассеяния р. Свислочь / В. В. Савченко // Докл. АН Беларуси. – Минск, 1992. – Т. 36, № 1. – С. 67–71.
5. *Савченко, В. В.* Трансформация донных осадков рек при техногенном воздействии / В. В. Савченко, С. Л. Шиманович, Л. И. Мурашко, Т. Е. Колосова // Докл. АН Беларуси. – Минск, 1993. – Т. 37, № 6. – С. 99–103.



## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ Г. МИНСКА ЗА ПЕРИОД 2020-2021 ГГ. ПО НАЗЕМНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

**Е. А. Чумаков, Е. А. Прокопчик, Г. Д. Бурченко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*zhenya.chumakov.02@mail.ru, ogurchikop7@gmail.com,*

*heorhiburchanka2001@gmail.com;*

*науч. рук. – Т. В. Шлендер, преп.*

В работе представлено микроклиматическое описание г. Минска на примере приземной температуры воздуха по данным автоматических метеостанций и дорожных измерительных станций за период 2020-2021 гг. Впервые построены карты распределения приземной температуры воздуха за продолжительный период в г. Минске по наземным наблюдениям автоматических метеостанций. Полученные карты температур воздуха для г. Минска за период 2020-2021 гг. за весь двухлетний период и в отдельные месяцы года построены в программе ГИС ArcGIS и Python. Особое внимание уделено сравнению мощности городского острова тепла г. Минска и пригорода в различные сезоны года.

**Ключевые слова:** микроклимат города, городской остров тепла, автоматические метеостанции, температура воздуха.

Климат – многолетний режим погоды для данной местности, которая зависит от солнечной радиации, подстилающей поверхности, рельефа и циркуляции атмосферы [1, с. 15]. Городской климат отличается тем, что, помимо выше перечисленного, дополнительными, а зачастую и основными факторами являются состав и свойства подстилающей поверхности (альbedo, геометрия зданий, улиц), степень застройки (этажность, плотность) и антропогенные выбросы (газовые и тепловые) автотранспорта и промышленных предприятий [2, с. 3]. Одним из активно развивающихся направлений в современной климатологии становится изучение климата городов. Это изучение является важной частью исследований более общей проблемы — «антропогенного воздействия на климат», поскольку эффекты непреднамеренных воздействий такого рода наиболее очевидны именно в городах. Другой проблемой городской метеорологии являются эффекты, возникающие в атмосфере городов – такие как «городской остров тепла» (ГОТ), «городские каньоны» и пр. [3, 4].

Без учета климатических особенностей невозможно правильное планирование и ведение городского хозяйства. Крупный промышленный город, каким, в частности, является г. Минск, в климатическом плане неоднороден. В нем выделяются отдельные районы, различающиеся, в

первую очередь, температурным режимом. В рамках каждого района существуют свои микроклиматические особенности.

Были использованы доступные данные со всех автоматических метеостанций (АМС) города, расположенные на ул. Шаранговича, Тимирязева, Богдановича, Независимости, Уручье, Радиальная, Корженевского. Для пригородных показаний температуры воздуха были использованы данные метеостанций Аэропорта М-2 и пос. Самохваловичи. Данные с дорожных измерительных станций (ДИС) были использованы для станций Цна, Кунцещина, Чижовка (все в районе МКАД), пос. Хатежино, пос. Слобода, пос. Привольный, пос. Раубичи и Горошки.

АМС и ДИС удобны тем, что позволяют получать метеоданные с труднодоступных точек города на постоянной основе. Все ДИС установлены на дорожных трассах, где тепловой нагрев большой по отношению к прилегающим территориям. Некоторые АМС установлены на территории или возле промышленных зон, такие как АМС на ул. Корженевского, ул. Радиальная и ул. Тимирязева, а некоторые в частном секторе как АМС на ул. Богдановича, или в хорошо продуваемом ветром месте, как АМС на ул. Бобруйская. Таким образом, все показатели приземной температуры зависят от типа подстилающей поверхности и точки расположения станции, что может повлиять на особенности распределения температуры воздуха в г. Минске.

На рисунке 1 представлена климатическая характеристика температуры воздуха для г. Минска за период 2020-2021 гг. Наибольшие значения (8,7-8,9 °С) температуры воздуха характерны для северо-западной и центральной и юго-восточной части города. Прохладные (7,1-7,4 °С) зоны наблюдаются на севере, северо-востоке и юго-западе. В целом, учитывая то, что интерполяция методом сплайн не фиксирует свойства поверхности города, данное распределение соответствует данным поверхностной температуры г. Минска по снимкам спутника Landsat-8 [5], где лесопарковым зонам соответствуют более низкие температуры, а городской застройке и промышленным зонам – более высокие значения.

На рисунке 2 представлены кривые температур воздуха для различных АМС в пригороде и в городе. С южной стороны г. Минска это АМС в пос. Самохваловичи, с северо-западной – АМС в Аэропорт М-2, в центре города – АМС на ул. Бобруйская и ул. Независимости. Самая прохладная станция – это АМС в Аэропорте М-2, практически во все сезоны года там температура воздуха ниже всех остальных АМС, но отчетливо проявляется различие летом, где разница с АМС ул. Бобруйская почти на 2 °С в июле. Более теплая, за счет южной стороны

пригорода, по сравнению с АМС в Аэропорте М-2 является АМС в пос. Самохваловичи, где мощность ГОТ составляет около 1,5 °С в июле. В зимний и весенний период амплитуда между пригородом и городом сокращается до 1 °С. Осенью – до 1-2 °С в зависимости от месяца.

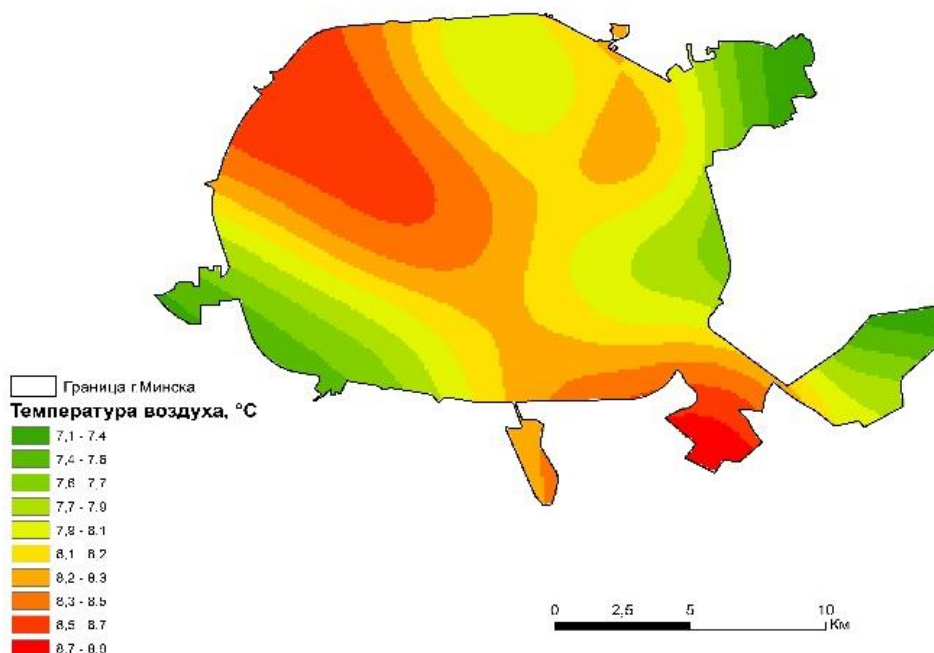


Рис. 1. Распределение средней приземной температуры воздуха (°С) г. Минска за период 2020-2021 гг.

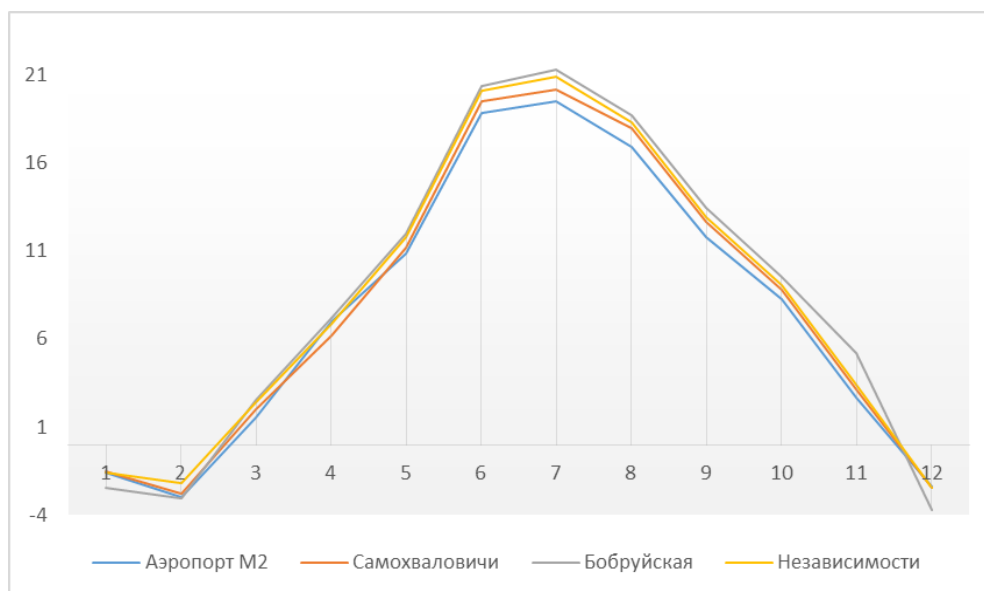


Рис. 2. Кривые распределения среднемесячной приземной температуры воздуха (°С) для АМС г. Минска и пригорода за период 2020-2021 гг.

В итоге, наиболее теплые районы г. Минска по данным АМС относительно схожи с данными спутниковых снимков поверхностной

температуры, так как не учитывают свойства подстилающей поверхности. Теплые зоны – центр города и промышленные территории. Наименее теплые – север города, лесопарковые территории и водные объекты. Амплитуда разницы температуры воздуха пригорода и центра города достигает 2 °С летом, и 1 °С – зимой. Таким образом, дальнейшие экспериментальные измерения температуры воздуха в городских условиях помогут повысить степень изученности данной проблемы в Беларуси.

#### **Библиографические ссылки**

1. Дроздов О.А. и др. Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
2. Оке Т.Р. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, 1976, n.14, p. 268-277.
3. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 248 с.
4. Гольберг М. А. Климат Минска. Мн.: Выш. шк., 1976. – 288 с.
5. Шлендер Т.В. и др. Изучение теплового загрязнения г. Минска в летнее и зимнее время года по данным спутника Landsat-8 // Сборник материалов 21 международной научной конференции «Сахаровские чтения 2021: экологические проблемы XXI века», Минск, Беларусь, 20-21 мая 2021 года. – Минск, 2021. – С. 375-378.

# МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ЭКРАНА С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

А. А. Александрова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*mmf.aleksandAA@bsu.by;*

*науч. рук. – О. А. Лаврова, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Объектом исследования является задача об экранировании внешнего однородного магнитного поля слоем магнитной жидкости, покрывающим сферическую область, с учетом влияния диффузии магнитных частиц на структуру магнитного поля. Математическая модель представлена уравнениями Максвелла для магнитного поля внутри магнитожидкостного слоя и в окружающей воздушной среде, а также уравнением диффузии магнитных частиц внутри магнитной жидкости. Алгоритм метода конечных элементов для нелинейной задачи магнитостатики реализован средствами PDE Toolbox в MATLAB с учетом осевой симметрии геометрии задачи. Для расчета концентрации магнитных частиц внутри магнитной жидкости разработан алгоритм метода Ньютона, согласованный с сеткой и решением метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость; сферический экран; уравнение магнитостатики; диффузия; метод конечных элементов; метод Ньютона; MATLAB.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель представляет собой безразмерные уравнения Максвелла, сформулированные с помощью магнитостатического потенциала  $u$ . За основу взята математическая модель, построенная в [1], и скорректирована с учетом зависимости намагниченности магнитной жидкости от концентрации магнитных частиц:

$$-\nabla \cdot (\mu_i(C, |\nabla u_i|) \nabla u_i) = 0 \quad \text{в } \Omega_i, \quad i = \overline{1,3} \quad (1)$$

$$\mu_1 = 1, \quad \mu_2(C, |\nabla u_2|) = 1 + \frac{M(C, |\nabla u_2|)}{H_0 |\nabla u_2|}, \quad \mu_3 = 1,$$

где  $C$  – функция концентрации;  $\Omega_i$  – двумерные меридиональные области в цилиндрических координатах  $(r, z)$ . Область  $\Omega_2$  соответствует

магнитожидкостному экрану, сферическая область  $\Omega_1$  и внешняя область  $\Omega_3$  заполнены воздухом. Напряженность магнитного поля  $H$  связана с магнитоэстатическим потенциалом  $u$  соотношением  $H = |\nabla u|$  как внутри магнитной жидкости, так и вне ее. Параметр  $H_0$  определяет интенсивность приложенного на бесконечности магнитного поля, направленного вдоль оси  $Oz$ . Закон намагничивания  $M$  для среднеконцентрированных магнитных жидкостей с учетом зависимости от концентрации магнитных частиц имеет вид:

$$M(C, H) = M_s \frac{c}{c_0} L\left(\gamma H + \chi_L \frac{c}{c_0} L(\gamma H)\right), L(\xi) = \coth(\xi) - \frac{1}{\xi}, \gamma = \frac{3\chi_L H_0}{M_s},$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения магнитной жидкости;  $C_0$  – среднее значение концентрации частиц в объеме;  $\chi_L$  – начальная восприимчивость Ланжевена. Функция  $\mu_2$  с учетом приведенного закона намагничивания принимает следующий вид:

$$\mu_2(C, H) = 1 + 3\chi_L \frac{c}{c_0} L\left(\gamma H + \chi_L \frac{c}{c_0} L(\gamma H)\right) / (\gamma H). \quad (2)$$

Обозначим через  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  внутреннюю и внешнюю границы области экрана  $\Omega_2$ , соответственно. Условия перехода, граничные условия симметрии относительно оси  $z$  и плоскости  $z = 0$  и условие на бесконечности записываются в виде, см. [1],

$$u_1 = u_2, \frac{\partial u_1}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial n} \text{ на } \gamma_1; \quad u_2 = u_3, \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial n} = \frac{\partial u_3}{\partial n} \text{ на } \gamma_2; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial n} = 0, i = \overline{1,3} \text{ для } r = 0; \quad u_i = 0, i = \overline{1,3} \text{ для } z = 0; \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u_3 = z. \quad (5)$$

Задача (1)–(5) решается для магнитоэстатического потенциала  $u$  внутри и вне магнитной жидкости в предположении, что функция концентрации магнитных частиц  $C$  является известной, при заданных значениях безразмерного приложенного магнитного поля  $\gamma$  и параметров  $\chi_L, C_0$ .

Нахождение концентрации магнитных частиц внутри магнитной жидкости осуществляется в предположении, что существует функциональная зависимость между напряженностью  $H$  и

концентрацией  $C$  вида  $\Phi(C, H) = C_C$ , где  $\Phi$  – заданная функция,  $C_C$  – неизвестная константа. Функциональная зависимость построена в [2], где

$$\Phi(C, H) = C e^{R(C)} H_{(2)}(C, H) / \sinh(H_{(2)}(C, H)) \quad (6)$$

и функция  $R(C)$  является заданной. Дополнительно должно выполняться условие сохранения массы частиц в области магнитной жидкости  $\Omega_2$ :

$$\int_{\Omega_2} C(r, z) r dr dz = C_0 \int_{\Omega_2} r dr dz.$$

Используя зависимость  $\Phi(C, H) = C_C$  и условие сохранения массы частиц построим систему из  $m + 1$  алгебраических уравнений

$$\Phi(C_i, H_i) = C_C, \quad i = \overline{1, m}; \quad \sum_{i=1}^m \omega_i C_i = C_0 \sum_{i=1}^m \omega_i, \quad (7)$$

где  $\omega_i = \int_{T_i} r dr dz$ ,  $T_i$  – элементы сетки, полученные в результате триангуляции области  $\Omega_2$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Система (7) будет использоваться для нахождения сеточных значений концентрации  $C_i$  и константы  $C_C$  по заданным значениям  $H_i$  и  $\omega_i$  на элементах сетки.

#### АЛГОРИТМ МЕТОДА НЬЮТОНА

Для системы нелинейных алгебраических уравнений (7) построим уравнения метода Ньютона на  $(k + 1)$ -ой итерации относительно неизвестных значений  $C_1, C_2, \dots, C_m, C_C$ :

$$\frac{\partial \Phi(C_i^k, H_i)}{\partial C_i^k} (C_i^{k+1} - C_i^k) - C_C^{k+1} + C_C^k = -\Phi(C_i^k, H_i) + C_C^k, \quad i = \overline{1, m}; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i (C_i^{k+1} - C_i^k) = C_0 \sum_{i=1}^m \omega_i - \sum_{i=1}^m \omega_i C_i^k. \quad (9)$$

После преобразования уравнений (8) и (9) получаем формулу для вычисления коэффициента  $C_C$  на  $(k + 1)$ -ой итерации метода Ньютона

$$C_C^{k+1} = \left( \sum_{i=1}^m \omega_i g(C_i^k, H_i) \right) / \left( \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{\psi(C_i^k, H_i)} \right), \quad (10)$$

где  $g(C, H) = \frac{\Phi(C, H)}{\Psi(C, H)} + C_0 - C$ ,  $\Psi(C, H) = \frac{\partial \Phi(C, H)}{\partial C}$ , функция  $\Phi(C, H)$  определена соотношением (6). Затем вычисляются значения концентрации на  $(k + 1)$ -ой итерации по формуле

$$C_i^{k+1} = \frac{C_C^{k+1} - \Phi(C_i^k, H_i)}{\Psi(C_i^k, H_i)} + C_i^k, \quad i = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Критерием выхода из алгоритма является выполнение условий

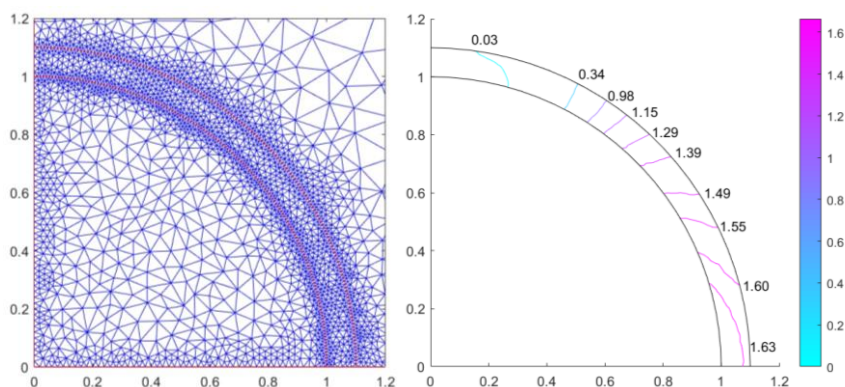
$$\frac{\|C^k - C^{k+1}\|}{C_0} < \varepsilon, \quad \frac{\|C_C^k - C_C^{k+1}\|}{C_C^k} < \varepsilon, \quad \text{где } \varepsilon = 10^{-6}.$$

Алгоритм метода Ньютона реализуется в MATLAB. На вход алгоритма подаются начальные приближения для неизвестных значений концентрации  $C_i$  на каждом элементе сетки и для неизвестного значения константы  $C_C$ . Также на вход алгоритма подаются значения напряженности  $H_i$ , значения  $\omega_i$  для каждого элемента сетки  $T_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  и константы  $\chi_L, \gamma$  и  $C_0$ , необходимые для построения алгебраических уравнений (7).

### ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Задача магнитостатики (1)–(5) решается в ограниченной области  $\overline{\Omega}_1 \cup \overline{\Omega}_2 \cup \overline{\Omega}_3 = [0, 5] \times [0, 5]$  методом конечных элементов средствами библиотеки PDE Toolbox в MATLAB для значений параметров  $\gamma = 10$ ,  $\chi_L = 4.06$ ,  $C_0 = 0.25$ . В результате итерационного решения нелинейных уравнений строится кусочно-линейная аппроксимация для магнитостатического потенциала на априорно адаптированной сетке, см. рис. 1 (слева). По численному решению задачи (1)–(5) вычисляются значения напряженности  $H_i$  на каждом элементе сетки, а также значения  $\omega_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Далее реализуется алгоритм метода Ньютона, описанный в предыдущем разделе. Изолинии концентрации на рис. 1 (справа) представляют решение алгоритма метода Ньютона, соответствующее решению задачи магнитостатики (1)–(5) на адаптивной сетке при  $C = C_0$ .





Триангуляция расчетной области (слева) и изолинии концентрации (справа) для расчетов со значениями параметров  $\gamma = 10$ ,  $\chi_L = 4.06$ ,  $C_0 = 0.25$

Изолинии концентрации в слое магнитной жидкости и ее значения, нормированные по  $C_0$ , представлены на рис. 1 (справа). Изолинии распределены по слою равномерно, соответствующие им значения увеличиваются при движении в слое по часовой стрелке от оси ординат к оси абсцисс, рис. 1 (справа). Аналогичное качественное распределение концентрации в слое магнитной жидкости было численно получено для цилиндрического магнитожидкостного экрана в [2]. Физическое объяснение того, что концентрация вблизи оси  $Ox$  больше, чем вблизи оси  $Oz$ , связано с условиями перехода (3) для магнитного поля на внутренней и внешней границах области экрана  $\gamma_1, \gamma_2$  и приводится в [2].

#### Библиографические ссылки

1. *Александрова А.А. (науч. рук. Лаврова О. А.) Численное моделирование сферического магнитожидкостного экрана // 78-я научная конференция студентов и аспирантов БГУ, Минск, 10–21 мая 2021 г., БГУ. Минск: БГУ, 2021. Ч. 1. С. 455–458.*
2. *Lavrova O. Polevikov V. Numerical Study of the Shielding Properties of a Ferrofluid Taking into Account Magnetophoresis and Particle Interaction // Mathematical Modeling and Analysis. 2022. Vol. 27, no. 1. P. 161–178. DOI: 10.3846/mma.2022.14660.*

# НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ И ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ МОДЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ В ГЕНЕРИРУЕМЫХ 2D И 3D СИМУЛЯЦИЯХ ДОРОЖНОГО ОКРУЖЕНИЯ

**К. В. Клименко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
klimenko.kirill.01@gmail.com;  
науч. рук. – А. Э. Малевич, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье описывается реализованный проект по созданию эффективных и реалистичных моделей беспилотных автомобилей и их испытанию в симуляциях дорожного окружения и парковочной зоны. Для обучения моделей использовались знания и методы Искусственного Интеллекта: машинное зрение, машинное обучение, анализ данных.

**Ключевые слова:** нейронные сети, компьютерная математика, 2D- и 3D-моделирование, беспилотные системы, компьютерная симуляция, машинное обучение.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Беспилотные автомобили представляют собой интеграцию множества технологий, включающих: высокоточные датчики и высокочувствительные сенсоры, обеспечивающие локализацию транспортного средства и восприятие окружающей среды в реальном времени, алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта, используемые для планирования сложных многоуровневых сценариев вождения и построения индивидуальных решений на их основе, а также клиентские, аппаратные и облачные платформы, выполняющие функции обработки и хранения распределённых данных и объединяющие все технические составляющие беспилотника для удовлетворения требований бесперебойного функционирования и производительности, высокоуровневой безопасности и надёжности.

На сегодняшний день представлено множество моделей беспилотных автомобилей (см. рис. 1) и связанных с ними технологий от разных компаний, некоторые модели пока находятся в стадии проектирования или тестирования. Тем не менее, многие сопутствующие технологии пока недостаточно доступны производителям и потребителям. Решение этой проблемы требует времени и работы по совершенствованию методов автоматизации.

Многочисленные технологии принятия поведенческих решений строятся на основе методологий глубокого обучения и искусственного интеллекта: CNN, RNN, DRL и нейроэволюционных алгоритмов.

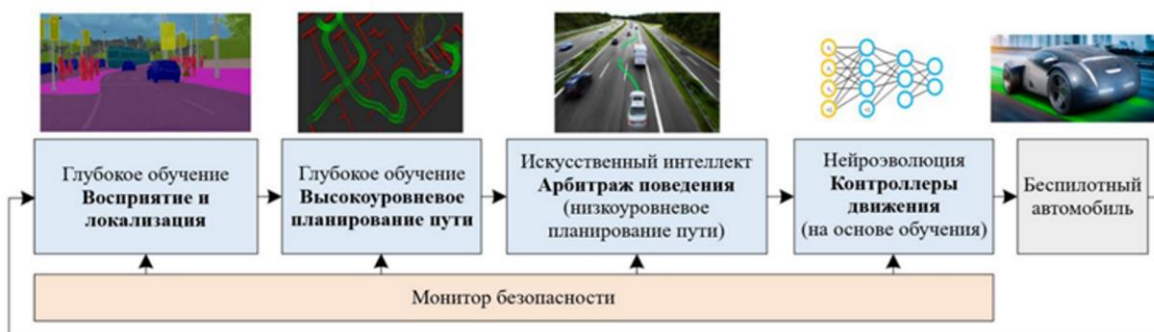


Рис. 1. Алгоритмические модули беспилотного автомобиля

## ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

Автором реализован проект «Car-Autopilot», в котором представлены методы обучения моделей автономного вождения с использованием нейроэволюционных алгоритмов, методов глубокого обучения и дополненной реальности, а также их реализация в двух- и трёхмерных симуляциях. Полная документация и реализация проекта доступна в публичном GitHub-репозитории [1] под открытым лицензированием GNU GPL v3.0.

Проект условно можно подразделить на четыре части:

1. Обзор, в котором изложены результаты теоретических исследований: развитие, технологии беспилотных автомобилей и методы глубокого обучения, подходящие для их обучения.

2. Беспилотное вождение. Обучение беспилотных моделей транспортных средств с использованием нейроэволюционных алгоритмов на случайно сгенерированных круговых магистралях с непрерывным движением в 2D-симуляциях дорожного окружения.

3. Беспилотная парковка. Обучение беспилотных моделей транспортных средств с использованием нейроэволюционных алгоритмов на случайно сгенерированных перпендикулярных одноуровневых паркингах в 2D-симуляциях дорожного окружения.

4. 3D-автопилот. Обучение беспилотных моделей транспортных средств с использованием методологий поведенческого клонирования в 3D-симуляциях дорожного окружения Udacity [2].

## БЕСПИЛОТНЫЕ ВОЖДЕНИЕ И ПАРКОВКА

В этой части рассмотрены практические применения нейроэволюции на примере метода NEAT (англ. *NeuroEvolution of Augmenting Topologies*) [3] к беспилотным транспортным средствам в генерируемых 2D-симуляциях дорожного окружения: круговой магистрали с непрерывным движением и перпендикулярного одноуровневого паркинга. Построена кинематическая 2D-модель транспортного средства, представляющая собой полноприводный четырёхколёсный автомобиль с рулевым управлением Аккермана для наиболее точного отражения динамики управления реального автомобиля в симуляции. Для обучения модели автомобиля автоматическому вождению и парковке (см. рис. 2) спроектированы генерируемые 2D-симуляции дорожного окружения: круговая магистраль с непрерывным движением и перпендикулярный одноуровневый паркинг. Полная реализация на языке Python рассматриваемой кинематической модели автомобиля и рассматриваемых симуляций представлена в GitHub-репозитории автора [1].



Рис. 2. Заполненный перпендикулярный одноуровневый паркинг

## АВТОПИЛОТ В 3D-СИМУЛЯЦИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ДОРОЖНЫХ ТРАСС

В этой части рассмотрено практическое применение глубокого обучения свёрточных нейронных сетей на примере метода

поведенческого клонирования к беспилотным транспортным средствам в различных генерируемых 3D-симуляциях дорожного окружения.

Для воспроизведения поведения и риторики вождения автономных автомобилей в симуляторе дорожного окружения Udacity [2] была описана и обучена упрощённая и оптимизированная нейросетевая модель на основе многослойной нейронной архитектуры Nvidia [4], которая в заданных окружающих условиях показала наилучшие результаты по всем критериям беспилотного вождения, включая уверенное и плавное следование дорожной полосе, а также точное маневрирование на поворотах.

Несмотря на то, что обученная модель нейронной сети управляет исключительно углом поворота рулевой колодки, её функционал также можно расширить до управления ускорением и торможением, и даже научить реагировать на внезапные дорожные инциденты и безопасно избегать их — возможности машинного обучения и искусственного интеллекта в применении к беспилотным транспортным средствам на данный момент ограничиваются исключительно стеком технологий, вычислительными мощностями и идеями инженеров-математиков.

Полная реализация генерации и обработки тренировочных и тестовых наборов данных, интеграция модели глубокой свёрточной нейронной сети в 3D-симуляцию дорожного окружения, а также видеодемонстрации результатов обучения беспилотных моделей автомобилей самостоятельному вождению на различного рода трассах представлены в GitHub-репозитории автора [1].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из результатов тренировок в различных симуляциях можно сделать вывод, что нейроэволюционный алгоритм является очень эффективным методом обучения с подкреплением в случае самостоятельного вождения, избегания препятствий, быстрого реагирования и адаптации к различного вида изменениям условий дорожного окружения.

В случае с самостоятельной парковкой, алгоритму для достижения приемлемых результатов требуется более тысячи поколений, а также дополнительные параметры навигации по парковочной местности и локализации целевого парковочного места.

Описанная и обученная нейросетевая модель поведения и риторики вождения автономных автомобилей в заданных окружающих условиях показала наилучшие результаты по всем критериям беспилотного вождения. Функционал созданной модели можно расширять,

совершенствуя кинематическую систему и визуализацию движения автомобиля.

#### **Библиографические ссылки**

1. Клименко К. Car-Autopilot / GitHub, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://github.com/Defaultin/car-autopilot> – Дата доступа: 06.06.2022.
2. Udacity's Self-Driving Car Simulator / GitHub, 2017. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://github.com/udacity/self-driving-car-sim> – Дата доступа: 06.06.2022.
3. Stanley K. O. Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies / Kenneth O. Stanley, Risto Miikkulainen // Evolutionary Computation 10(2), June 2002. – P. 99-127. – DOI: 10.1162/106365602320169811.
4. Bojarski M. End to End Learning for Self-Driving Cars / M. Bojarski [et al.] // arXiv, 2016. – 9 p. – DOI: 10.48550/arXiv.1604.07316.

# ОБ АКТИВНОЙ ОЦЕНКЕ КАК О СОВРЕМЕННОЙ СТРАТЕГИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В СРЕДНИХ И ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

Б. А. Бадак

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*badak.bazhena@bk.ru;*

*науч. рук. – О.Б. Долгополова: канд. физ.-мат. наук, доц.*

В данной статье дано определение понятию «активная оценка» (АО), приведены основные элементы активной оценки, а также пример использования АО в образовательном процессе в средних и в высших учебных учреждениях; обоснована эффективность и результаты педагогического эксперимента по применению АО.

**Ключевые слова:** образовательный процесс; активная оценка; самообучение; взаимообучение; SMART-цель.

Одна из задач современной средней и высшей школы заключается в обучении каждого учащегося и студента сознательно и творчески управлять своей учебной деятельностью, ориентироваться в стремительном потоке познавательной информации, выступающей непрременной предпосылкой, средством и результатом его деятельности.

На современном этапе обучения для молодого преподавателя актуальны следующие проблемы:

- ✓ Как пробудить интерес учащихся и студентов к познанию?
- ✓ Что нужно сделать, чтобы учащиеся знали и любили его предмет?
- ✓ Какие подобрать методы для активизации познавательного интереса к учебной деятельности учащихся и студентов?
- ✓ Может ли быть обучение личностно ориентированным, если в приоритете рейтинговая система?
- ✓ Всегда ли мы можем говорить о качестве знаний и их прочности, если эти показатели обозначаются баллом в системе рейтинга?
- ✓ Можем ли мы говорить о полноценном развитии личности ученика, если постоянно сравниваем его успехи с успехами других?

Данные проблемы, по мнению автора, обусловлены **дефицитом** средств оценки, которые проверяли бы не только общие навыки учащихся и студентов, но и также были бы средством активизации их учебной деятельности. **Целью** педагогического эксперимента, проводимого в профильных классах лицеев и среди студентов-первокурсников БНТУ является повышение познавательной активности учащихся и студентов посредством использования активной оценки в процессе учебной деятельности при изучении математики.

**Активная оценка (АО)** – технология обучения, в рамках которой учащиеся и студенты имеют возможность постоянно видеть и понимать свои успехи (и радоваться им), неудачи и исправлять пробелы); овладевать процедурами оценки, управлять своим обучением; в этой технологии родители также являются субъектами оценочной деятельности [1, с. 89]. К основным элементам АО отнесём следующие: *осознанную постановку целей, критерии выполнения задания; качественную оценку в виде обратной связи, ключевые вопросы, самооценку, взаимооценку, взаимообучение.* Общий принцип работы компонентов АО представлен на рис.



Общий принцип работы компонентов АО

Приведём примеры ключевых вопросов по выбору основных соединений в разделе «Комбинаторика»:

- ✓ Используются ли все данные элементы в наборе?
- ✓ Важен ли порядок следования элементов в наборе?
- ✓ Изменяется ли состав элементов в наборе?

Отметим, что по результатам педагогического эксперимента, проводимого среди 96 человек лица БНТУ, первое место занимают ключевые вопросы (88%), второе – постановка осознанных целей и



критерий «НаШтоБузу» (67%). Лидирующую позицию среди всех элементов АО в высшем учебном заведении занимает самооценка (93 %).

В ходе педагогического эксперимента было установлено, что активная оценка эффективно готовит молодых людей учиться на протяжении всей жизни, брать ответственность за свое обучение, мотивирует, стимулирует и активизирует учебно-познавательную деятельность учащихся и студентов. Данная технология используется во многих странах и, согласно исследованиям, занимает первое место среди всех методик, которые повышают эффективность обучения. В отличие от отметки активная оценка – это интерактивный способ оценивания деятельности и результатов работы учеников.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Запрудский, Н. И.* Контрольно-оценочная деятельность учителя и учащихся. Минск: Сэр-Вит, 2012. – 160 с.

# ГРАДУИРОВАННАЯ ТОПОЛОГИЯ НА АЛГЕБРАХ НОВЫХ ОБОБЩЕННЫХ ФУНКЦИЙ

М. Д. Ёжикова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
maya.yo1989banan@gmail.com;  
науч. рук. – А.Б. Антонецвич, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В работе изучается новая топологическая структура на векторном пространстве, названная градуированной топологией. Продемонстрированы отличия свойств пространств с такой структурой от топологических векторных пространств и приведены примеры конкретных задач, решение которых может быть получено с использованием градуированной топологии. Одной из мотивировок для введения такой структуры послужило исследование пространств новых обобщенных функций (мнемофункций), позволяющих придать смысл понятию решения для дифференциальных уравнений с сингулярными коэффициентами. В работе рассмотрено построение sharp и градуированной топологических структур на пространствах формальных рядов, бесконечно дифференцируемых функций, периодических распределений; построен аналог принципа сжимающих отображений для пространства рядов, названный градуированным; сформулирована задача о нахождении разложения обратного для возмущённого оператора, решить которую без использования градуированной топологии можно только в конечномерном случае - для возмущённой матрицы.

**Ключевые слова:** алгебра новых обобщённых функций; пространство периодических распределений; неархимедова метрика; sharp-топология; градуированная топология; асимптотическая сходимость; полином тейлора; пространство бесконечно малых; градуированный принцип сжимающих отображений; обобщённый оператор; возмущённая матрица; явление резонанса для матриц-функций.

## ВВЕДЕНИЕ SHARP И ГРАДУИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПРОСТРАНСТВЕ ФОРМАЛЬНЫХ РЯДОВ

Рассматриваем пространство  $E^*$  формальных рядов по степеням  $\varepsilon$  с коэффициентами из заданного банахова пространства  $E$ . Элемент этого пространства имеет вид  $x = \sum_{k=m}^{\infty} a_k \varepsilon^k$  подпространством  $E_m$  считаем множество рядов, начинающихся с номера  $m$ . Имеем последовательность вложенных подпространств: для каждого  $m$   $E_{m+1} \subset E_m$ .

Sharp-топология [1] на этом пространстве определяется следующим образом. Определяем порядок элемента:  $\nu(x) = \inf\{m : x \in E_m\}$ . Затем вводим нормирование  $\|x\| = e^{\nu(x)}$ . Порождённая таким нормированием

метрика удовлетворяет сильному неравенству треугольника:  $\forall x, y, z \in E^* \rho(x, z) \leq \max\{\rho(x, y), \rho(y, z)\}$ , т.е. является неархимедовой. С помощью такой метрики задаётся sharp-топология.

Сходимость последовательности в данной топологии является очень сильным условием: последовательность элементов  $x_n$  сходится к элементу  $x$ , если для любого заданного  $N$  найдётся номер  $n$ , начиная с которого разность  $x_n - x$  лежит в подпространстве  $X_N$ .

Основная проблема, связанная с введённой структурой, возникает при исследовании элементов, близких с точки зрения фактор-пространств

вида  $E_n/E_{n-1}$ . Если рассмотреть элемент  $x = \sum_{k=m}^{\infty} a_k \varepsilon^k$  и построить

последовательность  $x^n = \sum_{k=m}^{\infty} a_k^n \varepsilon^k$ , где  $a_m^n \neq a_m$ , то в sharp-топологии эта последовательность не сходится к  $x$ .

Однако на пространстве  $E$  задана своя норма, и при близком расстоянии коэффициентов  $a_m^n$  и  $a_m$ , т.е.  $\|a_m^n - a_m\| \rightarrow 0$ , есть смысл считать исходные элементы близкими, и таким образом по построенной последовательности найти коэффициент  $a_m$ . Далее аналогичным образом можно построить все последующие коэффициенты разложения.

**Определение 1.** Будем говорить, что на пространстве  $E^*$  задана градуированная топология [2], если:

- 1) в пространстве  $E^*$  задана последовательность вложенных подпространств  $E_m$ ;
- 2) на каждом  $E_m$  задана локально выпуклая топология  $\tau_m$  и выполнено свойство: если  $V$  – окрестность нуля в  $\tau_m$  и  $n > m$ , то  $E_n \subset V$ .

Данную структуру на  $E^*$  можно задать с помощью полунорм вида  $p_m(x) = \sup \varepsilon^{-m} \|a_m\|_E$  на каждом из подпространств  $E_m$ .

## ДРУГИЕ ПРИМЕРЫ ПРОСТРАНСТВ С ОПИСАННЫМИ СТРУКТУРАМИ

Аналогичные структуры могут быть введены и в других пространствах, используемых в анализе. Рассмотрим пространство функций  $L = C^\infty(\square)$ . Пусть подпространство  $L_n$  состоит из функций вида  $g(x) = o((x - x_0)^n)$ , где  $x_0 \in \square$ . Имеем:  $L_{n+1} \subset L_n$  для каждого  $n$ .

Каждая из функций данного пространства может быть представлена в виде разложения Тейлора:  $f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{[k]}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + r_n(x)$ . Рассмотрим 2

различных варианта формы остатка  $r_n(x)$  – форму Пеано:  $r_n(x) = o((x-x_0)^n)$  и форму Лагранжа:  $r_n(x) = \frac{f^{[n+1]}(\xi)}{(n+1)!}(x-x_0)^{n+1}$ .

Сходимость полиномов Тейлора  $T_n(x, x_0, f) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{[k]}(x_0)}{k!}(x-x_0)^k$  к функции  $f$  в случае остатка в форме Пеано – асимптотическая, что эквивалентно:  $T_n - f \in L_n$ , т.е. сходимости в sharp-топологии на  $L$ . В случае формы Лагранжа имеем сходимость коэффициента при  $(x-x_0)^{n+1}$  остатка  $r_n(x)$ , что эквивалентно сходимости в градуированной топологии.

### ГРАДУИРОВАННЫЙ ПРИНЦИП СЖИМАЮЩИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрим аналог принципа сжимающих отображений на пространстве формальных рядов  $E^*$ . Задача состоит в нахождении решения уравнения вида  $u = Au + v$  или неподвижной точки отображения  $F: E^* \rightarrow E^*$ ,  $F(u) = Au + v$ , где  $A$  – линейный непрерывный оператор на  $E^*$ . Будем считать, что  $A$  действует в пространстве  $E_0$ .

В случае sharp-топологии на  $E^*$  условие сжимаемости  $A$  эквивалентно тому, что соответствующая матрица является верхнетреугольной, и при этом все элементы главной диагонали нулевые. В случае градуированной топологии условие можно ослабить следующим образом: элементы главной диагонали не нулевые, но при этом для них выполнено  $\|a_{ii}\|_E < 1$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \dots \\ \vdots & a_{11} & \vdots \\ 0 & \dots & \ddots \end{pmatrix}, \|a_{ii}\|_E < 1.$$

В данном случае применим градуированный принцип сжимающих отображений, который заключается в следующем: при заданном начальном приближении  $x_0^0 \in E_0$  условие  $\|a_{00}\|_E < 1$  гарантирует сходимость первых коэффициентов последовательных приближений  $x_0^n$ , т.е. коэффициентов при  $\varepsilon^0$ , к соответствующему коэффициенту решения. Далее, аналогично выбирая приближение  $x_1^0 \in E_1$ , из условия  $\|a_{11}\|_E < 1$  получаем сходимость коэффициентов при  $\varepsilon^1$  и т.д.

## НАХОЖДЕНИЕ ОБРАТНОЙ ДЛЯ ВОЗМУЩЁННОЙ МАТРИЦЫ

Пусть  $D(\varepsilon)$  – матрица-функция, зависящая аналитически от малого параметра  $\varepsilon$ . При исследовании резольвент для конечномерных возмущений заданного оператора возникает необходимость нахождения условий для существования конечного предела и построения асимптотического разложения для обратных матриц семейства  $D^{-1}(\varepsilon)$ . Как можно заметить, основные методы решения задачи для конечномерного случая [3], используют такие понятия, как нормальная форма матрицы, определитель. Если сформулировать обобщение задачи на бесконечномерный случай, т.е. положить, что  $D(\varepsilon)$  является возмущённым линейным оператором, данные методы применить не получится. В таком случае для нахождения разложения необходимо строить итерационный процесс, использующий топологию фактор-пространств, т.е. на всём пространстве задать градуированную топологию.

## ЗАДАНИЕ ТОПОЛОГИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕ МНМОФУНКЦИЙ

Рассмотрим введение описанных топологических структур на примере пространстве периодических распределений (мнмофункций на окружности), построенное в [4]. Подпространства  $G_N$  определим как множества  $G_N(S^1)/J(S^1)$ , где  $G_N(S^1)$  состоит из семейств, аппроксимирующих распределения гладкими функциями на окружности, скорость роста которых ограничена степенью  $\varepsilon^{-N}$ ,  $J(S^1)$  – идеал, состоящий из семейств, убывающих быстрее любой степени  $\varepsilon$ . Имеем:  $G_N \subset G_{N+1} \forall N$ . Sharp-топология задаётся с помощью нормирования  $\|u\| = e^{\nu(u)}$ , где  $\nu(u) = \max\{N : u \in G_N\}$  – порядок элемента. Градуированная топология задаётся с помощью полунорм вида  $P_N(u) = \limsup_{\varepsilon_1 \rightarrow 0} \varepsilon^N p_N(u_{\varepsilon_1})$ , где  $p_N(u_{\varepsilon_1})$  –  $N$ -я норма на  $C^\infty(S^1)$ , на подпространствах  $G_N$ .

Другим примером пространства, встречающегося в приложениях, является пространство обобщённых операторов, введённое в [5]. В случае заданной на этом пространстве sharp-топологии аналог теоремы Банаха-Штейнгауза вырождается в тривиальное утверждение, однако он может быть построен в пространстве с градуированной топологией.

### Библиографические ссылки

1. *Delcroi A., Scarpalezos D.* Sharp Topologies on (C,E,P)-Algebras // Nonlinear Theory of Generalized Function, Chaptman&Hall, Research Notes of Mathematics. 1999. V. 401. P. 165–174.
2. *Antonevich A.* Graded sharp topology on spaces of new generalized functions // Nonlinear algebraic analysis and applications. Cambridge Scientific Publishers. 2004. P. 1–6.
3. *Антоневич А. Б., Романчук Т. А.* Уравнения с дельта-образными коэффициентами: метод конечномерных аппроксимаций. Саарбрюккен: LAP Lambert, 2012.
4. *Антоневич А. Б., Шагова Т. Г.* Умножение распределений и алгебры мнемофункций // Труды Крымской осенней математической школы-симпозиума. СМФН 65, № 3. Российский университет дружбы народов, М., 2019, С. 339–389.
5. *Гулецкая О. И., Радыно Н. Я.* К общей спектральной теории банаховых модулей // Докл. РАН. 1995. Т. 343, № 1. С. 7–9.

# ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ ТЕЛЕГРАФНОГО УРАВНЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПРИ УСЛОВИЯХ КОШИ НА КРИВОЙ В ПЛОСКОСТИ

А. Л. Кухарев

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
andrey.suxarev@yandex.by;  
науч. рук. – Ф. Е. Ломовцев, д-р физ.-мат. наук, проф.

Модификацией метода Римана выведена формула Римана классического решения задачи Коши для общего телеграфного уравнения с переменными коэффициентами при условиях Коши на нехарактеристической кривой плоскости.

**Ключевые слова:** общее телеграфное уравнение; обобщенная задача Коши; метод Римана; формула Римана; классическое решение; достаточная гладкость данных.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В плоскости  $\check{Y}^2$  решить задачу Коши для общего телеграфного уравнения с переменными коэффициентами и условиями Коши на нехарактеристической кривой  $l$ :

$$L u(x,t) \equiv u_{tt}(x,t) - a^2(x,t)u_{xx}(x,t) + b(x,t)u_t(x,t) + c(x,t)u_x(x,t) + q(x,t)u(x,t) = f(x,t), \quad (x,t) \in R^2 \setminus l, \quad (1)$$

$$u|_l = \varphi(x), \quad (\partial u / \partial \vec{n})|_l = \psi(x), \quad \vec{n} \perp l, \quad (2)$$

где коэффициенты уравнения  $a, b, c, q$  – вещественные функции и исходные данные задачи  $f, \varphi, \psi$  – заданные вещественные функции своих переменных  $x$  и  $t$ ,  $(\partial u / \partial \vec{n})|_l$  – производная по нормали  $\vec{n}$  к кривой  $l$  уравнения  $t = \chi(x)$ ,  $x \in \check{Y}^2$ .

Уравнение (1) даёт дифференциальные уравнения характеристик

$$dx = (-1)^i a(x,t) dt, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

которыми задаются в плоскости  $\check{Y}^2$  переменных  $x$  и  $t$  соответственно два различных семейства характеристик  $g_i(x,t) = C_i$ ,  $C_i \in \check{Y}^2$ ,  $i = 1, 2$ . Если коэффициент  $a(x,t) \geq a_0 > 0$ ,  $(x,t) \in \check{Y}^2$ , то характеристики  $g_1(x,t) = C_1$  строго убывают, а характеристики  $g_2(x,t) = C_2$  строго возрастают по

переменной  $x$ . Поэтому неявные функции  $y_i = g_i(x, t)$ ,  $x \geq 0, t \geq 0$ , имеют явные строго монотонные обратные функции  $x = h_i\{y_i, t\}$ ,  $t \geq 0$  и  $t = h^{(i)}[x, y_i]$ ,  $x \geq 0, i = 1, 2$ , для которых выполняются тождества обращения из статьи [1]:

$$g_i(h_i\{y_i, t\}, t) = y_i, \forall y_i, h_i\{g_i(x, t), t\} = x, x \geq 0, i = 1, 2, \quad (4)$$

$$g_i(x, h^{(i)}[x, y_i]) = y_i, \forall y_i, h^{(i)}[x, g_i(x, t)] = t, t \geq 0, i = 1, 2, \quad (5)$$

$$h_i\{y_i, h^{(i)}[x, y_i]\} = x, x \geq 0, h^{(i)}[h_i\{y_i, t\}, y_i] = t, t \geq 0, i = 1, 2. \quad (6)$$

Если функция  $a \in C^2(\check{Y}^2)$ , то функции  $g_i, h_i, h^{(i)} \in C^2\check{Y}^2$  по  $x, t, y_i, i = 1, 2$ , [1].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для однозначной разрешимости задачи Коши кривая  $l$  должна выражаться некоторой, по крайней мере, непрерывно дифференцируемой функцией на плоскости и удовлетворять требованию, чтобы каждая характеристика  $g_i(x, t) = C_i$ ,  $C_i \in \check{Y}^2$ ,  $i = 1, 2$ , уравнения (1) пересекала кривую  $l$  не более одного раза [2, с. 137].

Пусть  $C^k(\Omega)$  – множество  $k$  раз непрерывно дифференцируемых функций на подмножестве  $\Omega$  плоскости  $\check{Y}^2$ . Если носитель  $l$  данных Коши  $\varphi, \psi$  задаётся уравнением  $t = \chi(x)$ , где  $\chi \in C^2(\check{Y})$ , то формулу Римана классического решения этой задачи Коши содержит следующая

**Теорема.** Пусть в уравнении (1) коэффициенты  $a(x, t) \geq a_0 > 0$ ,  $(x, t) \in \check{Y}^2$ ,  $a \in C^2(\check{Y}^2)$ ,  $b, c, q \in C^1(\check{Y}^2)$ , и каждая из характеристик  $g_i(x, t) = C_i, i = 1, 2$ , пересекает кривую  $l$  гладкости  $\chi \in C^2(\check{Y})$  не более одного раза. Когда правая часть  $f \in C^1(\check{Y}^2)$  уравнения (1) и данные Коши  $\varphi \in C^2(\check{Y})$ ,  $\psi \in C^1(\check{Y})$  в условиях Коши (2), тогда задача Коши (1), (2) имеет единственное и устойчивое по  $f, \varphi, \psi$  классическое решение

$u \in C^2(\check{Y}^2)$  вида

$$u(x, t) = \frac{(auv)(s_1(x, t), \chi(s_1(x, t))) + (auv)(s_2(x, t), \chi(s_2(x, t)))}{2a(x, t)} +$$



$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2a(x,t)} \int_{s_2(x,t)}^{s_1(x,t)} \left\{ \left[ \psi(s)(1-\chi'^2(s)a^2(s,\chi(s))) + \chi'(s)\varphi'(s)(1+a^2(s,\chi(s))) \right] \frac{v(s,\chi(s))}{\sqrt{1+\chi'^2(s)}} - \right. \\
& \quad - \varphi(s) \left[ v_\tau(s,\tau) \Big|_{\tau=\chi(s)} - b(s,\chi(s))v(s,\chi(s)) + \right. \\
& \quad \left. \left. + \chi'(s) \left( (a^2(s,\tau)v(s,\tau)) \Big|_{\tau=\chi(s)} + c(s,\chi(s))v(s,\chi(s)) \right) \right] \right\} ds + \\
& \quad + \frac{1}{2a(x,t)} \int_{\Delta MPQ} f(s,\tau)v(s,\tau;x,t) ds d\tau, \quad (x,t) \in \square^2, \quad (7)
\end{aligned}$$

где  $u(s_i(x,t), \chi(s_i(x,t))) = \varphi(s_i(x,t))$ ,  $i=1, 2$ , в силу условий Коши (2),  $s_i(x, t) \in C^2(\check{Y}^2)$  – решения уравнений  $g_i(s_i, \chi(s_i)) = g_i(x, t)$ ,  $i=1, 2$ ,  $\Delta MPQ$  – криволинейный характеристический треугольник с вершиной  $M(x, t)$  и вершинами  $P(s_2(x, t), \chi(s_2(x, t)))$ ,  $Q(s_1(x, t), \chi(s_1(x, t)))$  его криволинейного основания  $PQ$ . Функция Римана  $v(s, \tau) = v(s, \tau; x, t)$  с параметрами  $(x, t)$  – это решение задачи Гурса (12), (13) на треугольниках  $\Delta MPQ \subset \check{Y}^2$ .

**Схема доказательства.** Вывод формулы Римана (7) формального решения задачи Коши (1), (2) осуществляется модификацией известного метода Римана. Во-первых, он состоит в применении следующего известного тождества для всех вещественных функций  $u, v \in C^2(\check{Y}^2)$  с дифференциальным оператором  $L$  общего телеграфного уравнения (1) и формально сопряженным к нему дифференциальным оператором  $M$  :

$$\begin{aligned}
& (L u(x, t))v(x, t) - u(x, t)(M v(x, t)) = \\
& = \frac{\partial H(u(x, t), v(x, t))}{\partial t} + \frac{\partial K(u(x, t), v(x, t))}{\partial x} \quad (8)
\end{aligned}$$

с дифференциальными квадратичными формами

$$H(u, v) = u_t v - uv_t + buv = (uv)_t - u[2v_t + bv],$$

$$K(u, v) = -u_x a^2 v + u(a^2 v)_x + cuv = -(a^2 uv)_x + u[2(a^2 v)_x + cv].$$

Во-вторых, метод Римана предполагает применение известной формулы Грина к двойному интегралу от тождества (8) в нашем случае по криволинейному характеристическому треугольнику  $MPQ$  в  $\check{Y}^2$  с

любой вершиной  $M(x, t) \in \check{Y}^2$  и соответствующими вершинами  $P(s_2(x, t), \chi(s_2(x, t)))$ ,  $Q(s_1(x, t), \chi(s_1(x, t)))$  его основания  $PQ$  на кривой  $l$ :

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta MPQ} (L u(s, \tau)) v(s, \tau) - u(s, \tau) (M v(s, \tau)) ds d\tau = \\ & = \int_{l^+} [K(u(s, \tau), v(s, \tau)) d\tau - H(u(s, \tau), v(s, \tau)) ds], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $l^+ = QM \cup MP \cup PQ$  – контур криволинейного треугольника  $MPQ$  с положительным направлением обхода, в силу левой ориентации плоскости  $Ost$ . Вычисляем криволинейный интеграл из правой части равенства (9) по кривой  $QM$  и приводим криволинейный интеграл второго типа к обыкновенному определенному интегралу

$$\begin{aligned} & \int_Q^M [K(u(s, \tau), v(s, \tau)) d\tau - H(u(s, \tau), v(s, \tau)) ds] = \\ & = (auv)(x, t) - (auv)(s_1(x, t), \chi(s_1(x, t))) - \\ & - \int_{\chi(s_1(x, t))}^t u(s, \tau) \{4a(s, \tau)v_\tau(s, \tau) - [a(s, \tau)b(s, \tau) - 4a_\tau(s, \tau) + c(s, \tau)]v(s, \tau)\} d\tau. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично вычисляется интеграл из равенства (9) по кривой  $MP$

$$\begin{aligned} & \int_M^P [K(u(s, \tau), v(s, \tau)) d\tau - H(u(s, \tau), v(s, \tau)) ds] = \\ & = (auv)(x, t) - (auv)(s_2(x, t), \chi(s_2(x, t))) - \\ & - \int_{\chi(s_2(x, t))}^t u(s, \tau) \{4a(s, \tau)v_\tau(s, \tau) - [a(s, \tau)b(s, \tau) - 4a_\tau(s, \tau) - c(s, \tau)]v(s, \tau)\} d\tau. \end{aligned} \quad (11)$$

В третьих, метод Римана привлекает функцию Римана  $v(s, \tau) = v(s, \tau; x, t)$ , которая является классическим решением однородного формально сопряжённого дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} & M v(x, t) \equiv v_{tt}(x, t) - (a^2(x, t)v(x, t))_{xx} - (b(x, t)v(x, t))_t - \\ & - (c(x, t)v(x, t))_x + q(x, t)v(x, t) = 0, \quad (x, t) \in \Delta MPQ, \end{aligned} \quad (12)$$

с двумя согласованными условиями Гурса

$$v(s, \tau) = \exp \left\{ \int_t^\tau k_i(h_i\{g_i(x, t), \rho\}, \rho) d\rho \right\}, \quad g_i(s, \tau) = g_i(x, t),$$

$$\tau \in [\chi(s_i(x, t)), t], \quad i = 1, 2, \quad (13)$$

где соответственно на кривых  $QM$  и  $MP$  характеристик функции равны

$$k_1(s, \tau) = \{a(s, \tau)b(s, \tau) - 4a_\tau(s, \tau) + c(s, \tau)\} / 4a(s, \tau),$$

$$k_2(s, \tau) = \{a(s, \tau)b(s, \tau) - 4a_\tau(s, \tau) - c(s, \tau)\} / 4a(s, \tau).$$

Модификация метода Римана заключается в использовании соотношений (3)–(6) для всех преобразований и доказательств из-за криволинейных и неявных характеристиках  $g_i(x, t) = C_i$ ,  $C_i \in \check{Y}^2$ ,  $i = 1, 2$ , телеграфного уравнения (1). Далее, применяя формулы (10), (11) и условия (12) и (13) на функцию Римана  $v(s, \tau) = v(s, \tau; x, t)$ , для которой  $v(x, t) = 1$  в точке  $M(x, t)$  и  $v(s, \tau) = 0$  на  $QM$  и  $MP$ , из равенства (9) находим выражение формального решения

$$u(x, t) = \frac{(auv)(s_1(x, t), \chi(s_1(x, t))) + (auv)(s_2(x, t), \chi(s_2(x, t)))}{2a(x, t)} +$$

$$+ \frac{1}{2a(x, t)} \int_P^Q [H(u(s, \tau), v(s, \tau)) ds - K(u(s, \tau), v(s, \tau)) d\tau] +$$

$$+ \frac{1}{2a(x, t)} \int_{\Delta MPQ} f(s, \tau) v(s, \tau; x, t) ds d\tau, \quad (x, t) \in \square^2. \quad (14)$$

Таким образом, остаётся только в формуле (14) с помощью условий Коши (2) вычислить криволинейный интеграл по дуге  $PQ$  кривой  $l$ .

Дважды непрерывная дифференцируемость на  $\check{Y}^2$  полученного формального решения (7) базируется на гладкости входных данных  $f, \phi, \psi$  задачи Коши из нашей теоремы и на дважды непрерывной дифференцируемости функции Римана  $v(s, \tau) = v(s, \tau; x, t)$  [2, с. 129–135].

Единственность классического решения (7) задачи Коши (1), (2) следует из общности тождества (8), т.е. его справедливости для всех

$u, v \in C^2(\check{Y}^2)$ , и однозначности решения задачи Гурса (12), (13) в  $\Delta MPQ$ .

Его устойчивость по  $f, \varphi, \psi$ , т.е. непрерывная зависимость решения  $u \in C^2(\check{Y}^2)$  в норме банахова пространства  $C^2(\check{Y}^2)$  от исходных данных  $f, \varphi, \psi$  задачи Коши в норме декартового произведения  $C^1(\check{Y}^2) \times C^2(\check{Y}^2) \times C^1(\check{Y})$  соответствующих банаховых пространств вытекает из явного вида (7) классического решения задачи Коши (1), (2) на  $\check{Y}^2$ .

**Замечание.** Случай формулы (7) при  $a(x,t) \equiv 1$  есть в [2, с. 139].

#### Библиографические ссылки

1. Ломовцев Ф. Е. Первая смешанная задача для общего телеграфного уравнения с переменными коэффициентами на полупрямой // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2021. № 1. С. 18–38.
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 2004. – 798 с.

# О КОЛИЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТ СВЯЗНОСТИ ВЕЕРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ НАКРЫТИЙ

А. Л. Кухарев

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*andrey.cuxarev@yandex.by;*

науч. рук. – С. М. Агеев, д-р физ.-мат. наук, проф.

Операция веерного (или послойного) произведения является обычным произведением объектов в категории отображений над фиксированным пространством. Веерные произведения играют важную роль в алгебраической топологии. Так, например, веерные произведения римановых поверхностей участвуют в топологическом доказательстве теоремы Абеля о разрешимости алгебраических уравнений в радикалах [1, с. 58]. В данной статье описывается действие слева фундаментальной группы базы накрытия на накрывающем пространстве и с его помощью выводится формула для вычисления количества компонент линейной связности накрывающего пространства. Полученные в данной статье формулы помогают устанавливать эйлерову характеристику и род поверхности, получающиеся при веерном произведении. Данный вопрос поднимается в статье [2], однако в данной статье рассматривается более общий метод нахождения компонент линейной связности веерного произведения накрытий.

**Ключевые слова:** алгебраическая топология; накрытия; веерные произведения; действие группы.

Рассмотрим конечнолистное накрытие  $p: E \rightarrow B$ . Пусть  $\pi_1(B, b_0)$ ,  $b_0 \in B$  – фундаментальная группа пространства  $B$ ,  $F = p^{-1}(b_0)$  – слой над точкой  $b_0$ , тогда для любого класса петель  $[\gamma] \in \pi_1(B, b_0)$  существует поднятие в накрывающее пространство [3, с. 166]. В силу сюръективности отображения  $p$ , прообраз пути  $\gamma$ , также называемый поднятием, в накрывающем пространстве не обязан определяться однозначно. Для того, чтобы избежать этого, необходимо выбирать точку из  $F$ , которая была бы началом поднятого пути  $\tilde{\gamma}$ . Тогда конец пути  $\tilde{\gamma}$  для каждой начальной точки определяется однозначно [3, с. 167] и лежит в  $F$ . Таким образом каждому классу петель из  $\pi_1(B, b_0)$  можно поставить в соответствие некоторую перестановку  $s$  элементов слоя  $F$ . Отображение, которое производит описанное действие  $\mu: \pi_1(B, b_0) \ni [\gamma] \rightarrow s \in G \subset S(F)$  называется отображением монодромии, где  $G = \mu(\pi_1(B, b_0))$  является подгруппой группы перестановок  $S(F)$ .

Далее рассмотрим действие конечной группы  $G$  в накрывающем пространстве  $E$  как левое действие группы:  $\cdot: G \times E \ni (g, x) \rightarrow g \cdot x \in E$ , оно переводит элемент  $x$  в элемент  $g \cdot x$ , получающийся после применения перестановки  $g$  к  $x$ .

Отметим, что если накрытие регулярно, то группа  $G$  определяется как факторгруппа  $\pi_1(B)/p_*(\pi_1(E))$ , где  $E, B$  – локально линейно связные пространства [3, с. 177].

В случае регулярного накрытия количество компонент связности накрываемого пространства можно найти используя следующее

**Предложение.** Пусть  $p : E \rightarrow B$  – регулярное накрытие,  $b_0 \in B$ , тогда если слой  $F = p^{-1}(b_0)$  – конечное множество, то количество компонент линейной связности  $k$  пространства  $E$  вычисляется по формуле  $k = \frac{|F|}{|G|}$ .

**Доказательство.** Пусть точки  $e, e' \in F$  лежат в одной компоненте связности пространства  $E$ , тогда существует путь  $\tilde{\gamma}$  их соединяющий, а значит, если  $\gamma = p(\tilde{\gamma})$ , то справедливо  $e' = \tilde{\gamma} \cdot e$ ,  $[\gamma] \in \pi_1(B, b_0)$ . И наоборот, если  $e, e' \in F$  и  $e' = \tilde{\gamma} \cdot e$ , для некоторого  $[\gamma] \in \pi_1(B, b_0)$ , то это значит, что  $e, e'$  лежат в одной компоненте связности.

С другой стороны, из выполнения равенства  $e' = \tilde{\gamma} \cdot e$  следует, что для класса  $[\gamma] \in \pi_1(B, b_0)$  можно рассмотреть перестановку  $g = \mu([\gamma]) \in G$ . Тогда, можно сказать, что  $e, e'$  лежат в одной орбите, например  $G \cdot e$ . Значит, найдя количество орбит, мы найдём количество компонент связности пространства  $E$ .

Согласно [4, с. 61] накрытие регулярно тогда и только тогда, когда никакая петля в  $X$  не является образом одновременно замкнутого и незамкнутого пути в  $E$ . Тогда прообраз петли, который переводил бы некоторую точку слоя  $F$  саму в себя должен являться петлёй для всех точек из  $F$ . Перестановка, которая соответствует такому пути – тождественная, а значит  $|G| = 1$  и количество компонент линейной связности ровно столько, сколько элементов в слое. Отметим, что любая другая перестановка, лежащая не во всех стабилизаторах точек из  $F$ , автоматически нарушает условие регулярности накрытия. То есть перестановки из  $G$  единственным образом определяют количество элементов, которые находятся в одной компоненте связности. Но тогда количество компонент связности пространства  $E$  вычисляется по формуле  $\frac{|F|}{|G|}$ .

Обобщим полученное предложение. Пусть теперь  $p : E \rightarrow B$  – нерегулярное накрытие, тогда число компонент связности по предыдущей формуле вычислить не удаётся, однако для такого случая справедлива следующая

**Теорема.** Пусть  $p : E \rightarrow B$  – накрытие,  $b_0 \in B$ , тогда если слой  $F = p^{-1}(b_0)$  – конечное множество, то количество компонент линейной связности  $k$  пространства  $E$  вычисляется по формуле  $k = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in F} |G_x|$ .

**Доказательство.** Пусть  $F_0 \subset F$  – множество точек, находящихся в одной компоненте связности. В орбите произвольного элемента  $x \in F$  будет  $|G \cdot x| = [G : G_x] = |G|/|G_x|$  точек из  $F_0$ . Перепишем эту формулу в следующем виде  $\frac{1}{|G \cdot x|} = \frac{|G_x|}{|G|}$ . Тогда, просуммировав её по всем точкам из  $F_0$ , получим  $\frac{1}{|G|} \sum_{x \in F_0} |G_x| = 1$ . А значит, если просуммировать  $\frac{1}{|G \cdot x|} = \frac{|G_x|}{|G|}$  по всем элементам множества  $F$ , то мы получим натуральное число  $k = \frac{1}{|G|} \sum_{x \in F} |G_x|$  равное числу компонент связности пространства  $E$ .

Покажем, как применить полученную в теореме формулу на случай веерного произведения конечного числа накрытий. Пусть  $p_1 : E_1 \rightarrow B, \dots, p_n : E_n \rightarrow B$  – конечнолистные накрытия, тогда веерное произведение этих накрытий это  $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) : p_i(x_i) = p_j(x_j) \forall i \neq j\}$  [5, с. 152]. Отметим, что отображение  $p = p_i(x_i) : E \rightarrow B$  это тоже накрытие. Для каждого накрытия  $p_i : E_i \rightarrow B$  можно рассмотреть отображение монодромии  $\mu_i : \pi_1(B, b_0) \rightarrow G_i \subset S(p^{-1}(b_0))$ . В случае веерного произведения, отображение монодромии  $\mu$ , соответствующее накрытию  $p$  определяется так:  $\mu = \mu_1 \times \dots \times \mu_n : \pi_1(B, b_0) \rightarrow G \subset S(F_1) \times \dots \times S(F_n)$ , где  $F_i = p_i^{-1}(b_0), i = \overline{1, n}$ . Теперь, зная, как устроено отображение монодромии, для подсчёта количества компонент линейной связности построенного веерного произведения можно применить доказанную выше формулу.

### Библиографические ссылки

1. Прасолов В. В., Шварцман О. В. Азбука римановых поверхностей. Москва : МЦНМО, 2015.
2. Hidalgo R. A., Reyes-Carocca S., Vega A. On the fiber product of Riemann surfaces //arXiv preprint arXiv:1611.07880. – 2016.
3. Масси У., Столлингс Дж. Алгебраическая топология. Москва : Мир, 1977.
4. Фоменко А. Т., Фукс Д. Б. Курс гомотопической топологии. Москва : Наука, 1989.
5. Александров П. С., Пасынков Б. А. Введение в теорию размерности: введение в теорию топологических пространств и общую теорию размерности. Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973.

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПОМ

**Ф. Р. Лемачко, В. А. Шабусов**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
mmf.lemachko@mail.ru, vladshabusov66@gmail.com;  
науч. рук. – А. А. Дерюшев, канд. техн. наук, доц.*

В данной статье нами была рассмотрена проблема вращения Земли во время астрономических наблюдений из телескопа, что приводит к корректировке телескопа каждые пару минут в среднем на один градус. Также, учитывая такие факты как облачность, световое загрязнение, возникают плохие условия визуального нахождения объекта на небесной полусфере, что также является проблемой доступности наблюдений. Поэтому была разработана система управления телескопом, которая бы смогла устранить данные проблемы при наблюдениях. На практике это поможет проводить астрофотографию, а также упростить пользование телескопом астроному-любителю.

**Ключевые слова:** система управления телескопом; астрономические наблюдения; автоматическое наведение; android приложение; Bluetooth соединение.

## ВВЕДЕНИЕ

На основе вышеописанной проблемы поставлена цель: разработать такую систему управления телескопом, которая могла бы в автоматическом режиме находить астрономические объекты на небесной полусфере.

Существует два основных вида монтировок: азимутальная и экваториальная [1]. Для обеих нужны разные подходы в изготовлении электронной системы управления. Рассмотрим данные монтировки на примерах. Примером азимутальной монтировки является: Sky-Watcher AZ-GTe SynScan GOTO с системой автоматического наведения SynScan AZ [2]. Монтировка самостоятельно находит объект на небосклоне и следит за ним в течение всего времени наблюдений. Команды отправляются через специальное мобильное приложение «SynScan», которое дает доступ к базе из нескольких десятков тысяч координат. Связь между приложением и монтировкой осуществляется через сеть Wi-Fi. Также возможна модификация с пультом управления, который позволяет наводить телескоп на выбранный объект. Что касается экваториальных монтировок, то плюсом всех экваториальных монтировок является тот факт, что из-за его конструкции достаточно лишь вращать одну ось. Meade LX85 – это экваториальная монтировка с системой автоматического наведения и слежения AudioStar [3]. Управляется с помощью пульта – вы нажимаете несколько кнопок на



пульте, и телескоп самостоятельно находит небесное тело. База компьютера включает 30 000 координат. К монтировке можно подключать автогид, электронный фокусер и адаптер Wi-Fi Meade для StellaAccess Planetarium, который позволяет отдавать команды монтировке со смартфона или планшета.

Изучив пару образцов аналогов системы, были обнаружены некоторые недостатки. С одной стороны, пользоваться таким телескопом очень просто, и телескоп «сам» находит объекты на небе. С другой стороны, все же требуется небольшая подготовительная работа – прежде всего телескоп необходимо правильно установить, в частности направить полярную ось экваториальной монтировки на Полюс Мира или ориентировать телескоп определенным образом в случае альтазимутальной монтировки, а также "привязать" его к местному звездному небу. Все эти действия занимают время, а также неподготовленному астроному-любителю затруднительно все сделать правильно. Основным источником ошибок являются неверные данные о времени и местоположении наблюдателя, а также – ошибочное наведение наблюдателем не на опорную звезду, а на соседнюю с ней. Т.е. обычному человеку будет нелегко справиться с таким оборудованием.

Учитывая все недостатки данных аналогов была разработана система управления с азимутальным устройством макета. Плюсом данной системы является управление через Bluetooth протокол, что позволяет производить наведение в районах далеких от мобильной связи. Принцип работы данной системы заключается в следующем: с управляющего устройства (в нашем случае телефон) отправляются координаты астрономического объекта в блок управления, в нем происходит пересчет координат в количество шагов двигателя, после чего, система наводит телескоп на объект. Предварительно необходимо отгоризонтировать всю систему, а также направить на север. Управление будет осуществляться с помощью android приложения для удобства, а также для возможности массового использования в перспективе.

## **БЛОК УПРАВЛЕНИЯ**

Разработка устройства началась с проектирования схемы. Подбор компонентов осуществлялся на основе поставленных задач. Блок управления (рис. 1) был построен на базе микроконтроллера (далее МК) Atmega32a, которые управляет всей системой. Также блок управления включает в себя следующие компоненты: шаговый двигатель (далее

ШД) 28BYJ-48, драйвер DRV8825, Bluetooth модуль HC-06. Весь блок работает по следующему принципу: Bluetooth модуль принимает данные и передает их по интерфейсу UART в МК, где происходит обработка данных, после чего, МК передает сигнал по количеству шагов, направлению, дроблению шага на драйверы, которые в свою очередь вращают ШД. В качестве элемента питания использовался блок питания на 9 В, т.к. напряжения питания драйверов ШД не менее 8.2 В. Напряжение питания микроконтроллера Atmega32A 5 В, следовательно, необходим стабилизатор с выходным напряжением на 5 В. Был выбран стабилизатор напряжения L7805ABV на 5В, 1.5А, с максимальным входным напряжением 35 В. В Bluetooth модуле HC-06 логика работает на 3.3 В, поэтому необходимо было установить также конвертер логических уровней. Запитывать данный модуль с одной стороны необходимо за 5 В, с другой 3.3 В. Поэтому был выбран фиксированный стабилизатор MIC5201-3.3YS с входным напряжением от 2.5 до 26 В и выходным 3.3 В и максимальным током 0.2 А. В схему было добавлена пара конденсаторов, чтобы убрать помехи, которые могут испортить модули.

Перед подключением ШД к плате необходимо настроить драйверы. Для этого надо выставить напряжение  $V_{ref} = 0,08$  В потенциометром на самом драйвере.

Программная часть под блок управления была написана на языке программирования С. Взаимодействие с Bluetooth модулем происходит по интерфейсу UART. После приема данных Bluetooth модуль передает их на микроконтроллер. Прием идет до стоп байта, записываются данные в массив однобайтовых переменных. Далее массив конвертируется в строку и с помощью функций преобразования конвертируется в вещественную переменную. После пересчитываются данные в шаги двигателя с учетом количества зубьев основных шестерен, а также учитывая, что полный оборот ШД происходит за 2048 шагов.



Рис. 1. Блок управления

## ANDROID ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ

Разработка приложения началась с постановки задач, которые приложение должно решать, а также проектирования экранов приложения. Для создания приложения был выбран язык программирования Java.

Главный экран приложения (Main Activity, рис. 2) предназначен для решения следующих задач: включение и выключение Bluetooth на смартфоне, просмотр списка сопряженных устройств, поиск близлежащих устройств. При выборе устройства из списка приложение пробует соединиться с ним, и, в случае успешного соединения, пользователю станет доступен экран, позволяющий выбрать режим управления телескопом, просмотреть информацию о приложении и отключиться от устройства.

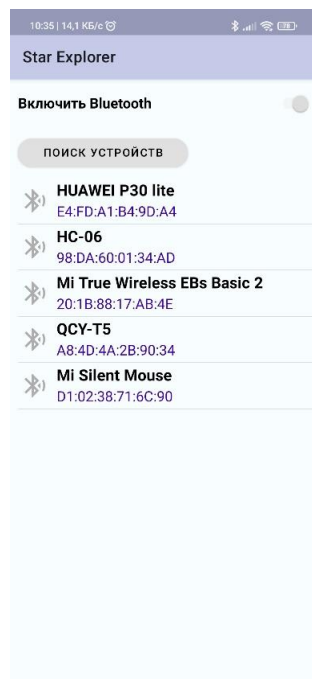


Рис. 2. Главный экран приложения

Проанализировав аналоги подобных пультов дистанционного управления телескопом, было решено реализовать два режима управления: ручное управление (далее РУ) и автоматическое наведение на звезду (далее АН) [1].

Режим РУ (рис. 3) позволяет вручную вращать телескоп в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для этого пользователю доступны четыре кнопки, позволяющие направлять телескоп в ту или иную сторону. При нажатии на одну из кнопок приложение отправляет в

блок управления преобразованную в массив байт текстовую строку, оканчивающуюся стоп символом. Блок управления, в свою очередь, обрабатывает эти данные и приводит в движение двигатели, вращающие телескоп.

Режим АН (рис. 4) позволяет выбрать звезду из имеющегося в базе данных списка звезд и навестись на нее. При выборе звезды из списка приложение отправляет в блок управления координаты звезды: прямое восхождение и склонение. Также дополнительно высчитывается и отправляется разница во времени между текущим временем и временем создания базы данных, так как координаты звезд меняются с течением времени.

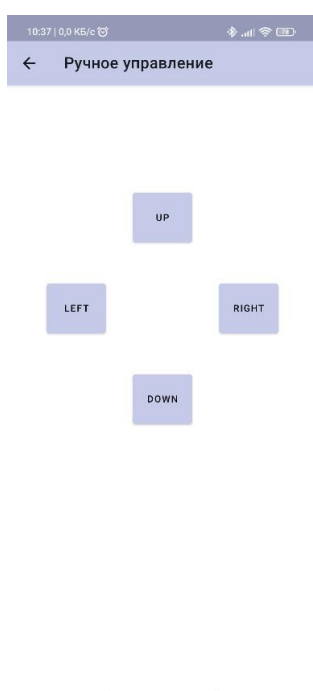


Рис. 3. Режим РУ



Рис. 4. Режим АН

### Библиографические ссылки

1. Телескопы с автонаведением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.4glaza.ru/articles/autoguiders/>. – Дата доступа: 05.05.2022.
2. Руководство по эксплуатации системы SynScan AZ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ftplvh.sky-watcher-russia.ru/products/materials/0/SW-AZGT-SynScan-Telescopes-UM-ru.pdf>. – Дата доступа: 16.05.2022.
3. Монтровка Meade LX85 с треногой и пультом AudioStar, экваториальная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://optizona.by/aksessuary-dlya-optiki/montirovka-meade-lx85-s-trenogoy-i-pultom-audiostar-ekvatorialnaya.html?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=smart-shopping&gclid=](https://optizona.by/aksessuary-dlya-optiki/montirovka-meade-lx85-s-trenogoy-i-pultom-audiostar-ekvatorialnaya.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=smart-shopping&gclid=) – Дата доступа: 25.05.2022.

# УСТРОЙСТВО ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОНАУШНИКОВ

**Ф. Р. Лемачко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*mmf.lemachko@mail.ru;*

*науч. рук. – А. А. Дерюшев, канд. техн. наук, доц.*

В настоящее время активно начало использоваться такое устройство как «микронаушник». На сегодняшний день это достаточно большая проблема учитывая, что визуально обнаружить данное устройство довольно сложно из-за его миниатюрности, его можно заглушить, однако это влечет за собой много минусов, которые мы также рассмотрим. Поэтому было разработано устройство по обнаружению микронаушников. На практике данное устройство поможет безопасно обнаруживать микронаушники с любым протоколом связи.

**Ключевые слова:** микронаушник; радиоулавливатель; устройство обнаружения микронаушников; Wi-Fi и Bluetooth глушитель; подавитель звука.

Вообще, встречается два вида микронаушников – капсульные и магнитные. Магнитные распространены больше так как имеют несколько существенных преимуществ над капсульными: визуально невозможно обнаружить, удобны в использовании, в то время как капсульные хорошо видны в ухе. Далее, для большего понимания, рассмотрим принцип работы обоих устройств [1].

**Магнитный микронаушник.** Магнитный микронаушник представляет собой магнитик размером 2x3 мм или диск диаметром 3 мм, который закидывается на барабанную перепонку с помощью специальной трубочки. За счет электромагнитной индукции звук передается с антенны на микронаушник. От создаваемого магнитного поля барабанная перепонка вибрирует, следовательно, слышен звук.

**Капсульный микронаушник.** Капсульный микронаушник представляет собой капсулу размером 10x5 мм или 4x6 мм которая устанавливается в ухо как затычка. В капсуле находится миниатюрный динамик и усилитель, для работы которого необходим элемент питания. Капсула сама преобразует магнитное поле в звук.

Для обоих устройств также нужен передатчик. Обычно это катушка, которая вешается на шею под одежду, к ней также требуется усилитель и источник сигнала в основном это телефон или иногда может быть рация. Для магнитного микронаушника также требуется усилитель.

Существует несколько видов борьбы с микронаушниками: глушитель микронаушника и радиоулавливатель. Глушителем называют электронные приборы, способные создавать помехи связи за счет генерируемого ими радиоэлектронного сигнала определенной частоты.

Существует несколько видов глушителей для микронаушника, рассмотрим пару из них:

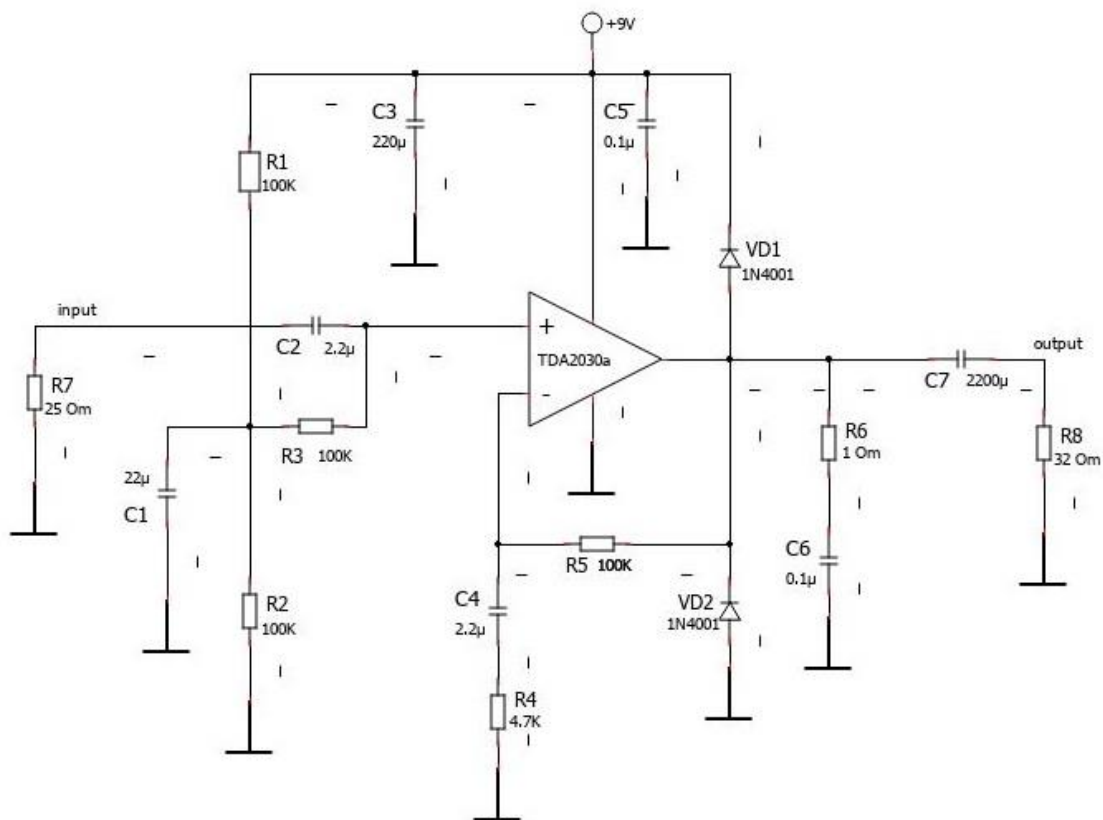
- Глушитель мобильной связи
- Глушитель Bluetooth соединения
- Глушитель Wi-Fi соединения

У данных видов есть множество минусов: дороговизна, у глушителей мобильной связи – законность применения, а глушители Wi-Fi соединения и рации легко можно обойти.

В свою очередь, я предлагаю решение данной проблемы в виде устройства по борьбе с микронаушником и его распознаванию. Это улавливатель волн исходящих от катушки, висящей на шее человека. Суть работы данного устройства кардинально отличается от работы глушителей. Если, используя глушитель, мы просто подавляем эти волны и не знаем кто использует микронаушник и сработал ли вообще глушитель, то используя улавливатель можно четко определить человека, использующего микронаушники. Радиоулавливатель полностью решает выше описанные минусы глушителей.

Разработка радиоулавливателя началась с подбора усилителя. Был выбран усилитель низкой частоты TDA2030A от компании ST Microelectronics, т.к. данный усилитель предназначен для получения высококачественного выходного звукового сигнала средней мощности, что отлично подходит для наших задач. Микросхема TDA2030A имеет 5 выводов и выполнена в корпусе «Pentawatt». Микросхема предназначена для усиления звуковых сигналов мощностью, которых составляет до 18 Вт. Пиковое значение выходного тока составляет 3,5 А. Для удешевления и упрощения задачи был выбран модуль усилителя TDA2030A. Так как имеет ряд удобств для использования самого усилителя, например для регулирования уровня громкости на плате имеется подстроечный резистор, а также для вывода сигнала имеется клемник для подключения динамика. Напряжение питания модуля от 6 до 12 В, что также удобно для использования стандартной батареи на 9 В, см. рисунок ниже. Методология разработки устройства была основана на базе все того же модуля усилителя TDA2030A [2]. В качестве динамика были подобраны обычные наушники от фирмы Xiaomi на 32 Ома, которые соответствуют характеристикам модуля усилителя. Наушники подключаются на выход модуля усилителя (на схеме «output»). Что касается катушки на вход, было рассмотрено несколько видов: с сердечником, без сердечника и с разным количеством витков, в итоге опытным путем была подобрана улавливающая катушка на 80 витков, которая подключается на вход модуля (на схеме «input»),

диаметром 100 мм и сопротивлением в 25 Ом. Для катушки использовался эмалированный провод сечением 0.2 мм.



Принципиальная схема радиоуправливателя

Протестировав устройства в разных условиях, результаты полностью оправдали выше сказанные ожидания от работы. В ходе испытаний на дальность действия, радиоуправливатель показал стабильные 2-3 метра с хорошим качеством звука, более 3 метров качество звука меньше, однако этого достаточно, чтобы обнаружить микронаушник. Конечно, это устройство можно заглушить, однако в таком случае и сам микронаушник будет не работоспособен. В общем, такая проблема как «микронаушник» просто решается данным устройством и имеет множество преимуществ по сравнению с другими видами борьбы с микронаушником. Например протативность и мобильность устройства. Установить другие виды борьбы в каждую аудиторию почти невозможно и не имеет смысла.

Что касается перспектив радиоуправливателя на будущее, так это добавить подключение к мобильному устройству, что еще более упростит и удешевит его использование.

### **Библиографические ссылки**

1. Глушители микронаушников: виды и как их обойти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nanonaushnik.by/glushiteli-mikronaushnikov-vidy-i-kak-ih-oboiti>. – Дата доступа: 05.03.2022.
2. TDA2030A Datasheet (PDF) - STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25044/STMICROELECTRONICS/TDA2030A.html>. – Дата доступа: 05.03.2022.



# ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРА

Д. А. Лицкевич

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*danila.litskevich@gmail.com;*

науч. рук. – О. А. Лаврова, к. физ.-мат. наук, доц.

В работе рассмотрены методы решения обратной задачи для нахождения неизвестных параметров обобщённой модели Лотки-Вольтерра по экспериментальным данным, а именно, метод на основе приближений Пикара и метод на основе построения разностной схемы. Численное определение неизвестных параметров модели осуществлялось при помощи пакета Mathematica.

**Ключевые слова:** обобщённая модель Лотки-Вольтерра; обратная задача; линейная регрессия; разностная схема; приближения Пикара.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_{N-1}$  известны значения функций  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ , которые будем называть исходными данными. Предполагая, что функции  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  удовлетворяют обобщённой системе Лотки-Вольтерра [1]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_1(a_{0,1} + a_{1,1}x_1 + a_{2,1}x_2 + a_{3,1}x_3), \\ \frac{dx_2}{dt} = x_2(a_{0,2} + a_{1,2}x_1 + a_{2,2}x_2 + a_{3,2}x_3), \\ \frac{dx_3}{dt} = x_3(a_{0,3} + a_{1,3}x_1 + a_{2,3}x_2 + a_{3,3}x_3), \end{cases} \quad (1)$$

где  $A = (a_{i,j})_{i=0,j=1}^3 \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ , сформулируем задачу: необходимо по исходным данным определить неизвестные параметры взаимодействия  $A$  для системы (1).

Обозначим  $x := (x_1, x_2, x_3)^T$ ,  $f := (f_1, f_2, f_3)^T$  – вектор-функция правой части системы (1).

## РАЗНОСТНАЯ СХЕМА

Для нахождения параметров системы (1) можно составить разностные схемы, применяя многошаговые разностные методы, методы Адамса,

разностные производные различных порядков. В работе рассмотрим явные и неявные линейные -шаговые разностные методы [2, 230 с.].

Для каждого дифференциального уравнения системы (1) можно составить разностное уравнение  $\forall n = \overline{m, N-1}$ :

$$\frac{c_0 x_i^{(n)} + c_1 x_i^{(n-1)} + \dots + c_m x_i^{(n-m)}}{t_n - t_{n-1}} = b_0 f_i^{(n)} + b_1 f_i^{(n-1)} + \dots + b_m f_i^{(n-m)}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где  $\forall j = \overline{0, m} : c_j, b_j \in \mathbb{R}; \forall k = \overline{0, N-1} : x_i^{(k)} := x_i(t_k)$  и  $f_i^{(k)} := f_i(t_k)$ . Далее уравнения (2) можно объединить в систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров  $A$ :

$$Y = XA, \quad (3)$$

где  $Y \in \mathbb{R}^{(N-m) \times 3}$ ,  $X \in \mathbb{R}^{(N-m) \times 4}$ . При этом

$$\begin{aligned} Y_{n-m+1, j} &:= \frac{c_0 \ln x_j^{(n)} + c_1 \ln x_j^{(n-1)} + \dots + c_m \ln x_j^{(n-m)}}{t_n - t_{n-1}}, & n = \overline{m, N-1}, \\ X_{n-m+1, 1} &:= 1, & j = \overline{1, 3}. \\ X_{n-m+1, j+1} &:= b_0 f_j^{(n)} + b_1 f_j^{(n-1)} + \dots + b_m f_j^{(n-m)}, \end{aligned}$$

Воспользовавшись методом наименьших квадратов и линейной регрессией [3], получим решения системы (3):

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

### ПРИБЛИЖЕНИЯ ПИКАРА

Суть метода на основе приближений Пикара [4] заключается в последовательном нахождении параметров  $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(k)}, \dots$ . Для этого требуется последовательно определять решения системы (1)  $\varphi^{(0)}(t), \varphi^{(1)}(t), \dots, \varphi^{(k)}(t), \dots$  по рекуррентным соотношениям:

$$\varphi^{(k)}(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(\varphi^{(k-1)}(\tau)) d\tau, \quad k \in \mathbb{N}, \quad (4)$$

где  $x_0 := (x_1^0, x_2^0, x_3^0)^T$  – начальное условие ( $x(t_0) = x_0$ ), а  $\varphi^{(0)}(t) := x_0$ .

Соотношение (4) можно привести к следующему виду:

$$\varphi_i^{(k)}(t) - x_i^0 = C_i^{(k)}(t) A_{\cdot,i}^{(k)}, \quad i = \overline{1,3},$$

где  $A_{\cdot,i}^{(k)}$  –  $i$ -ый столбец матрицы  $A^{(k)}$ ,

$$C_i^{(k)}(t) := (C_{i,0}^{(k)}(t), C_{i,1}^{(k)}(t), C_{i,2}^{(k)}(t), C_{i,3}^{(k)}(t)),$$

$$C_{i,0}^{(k)}(t) := \int_{t_0}^t \varphi_i^{(k-1)}(\tau) d\tau,$$

$$C_{i,j}^{(k)}(t) := \int_{t_0}^t \varphi_i^{(k-1)}(\tau) \varphi_j^{(k-1)}(\tau) d\tau, \quad j = \overline{1,3}.$$

Для каждого столбца  $A_{\cdot,i}^{(k)}$  составляем систему линейных алгебраических уравнений, учитывая исходные данные:

$$Y_i := L_i^{(k)} A_{\cdot,i}^{(k)}, \quad i = \overline{1,3}, \quad (5)$$

где  $Y_i \in \mathbb{R}^N$  и  $L_i^{(k)} \in \mathbb{R}^{N \times 4}$  определяются построчно:

$$(Y_i)_n := \varphi_i^{(k)}(t_{n-1}) - x_i^0, \\ (L_i^{(k)})_{n,\cdot} := (C_{i,0}^{(k)}(t_{n-1}), C_{i,1}^{(k)}(t_{n-1}), C_{i,2}^{(k)}(t_{n-1}), C_{i,3}^{(k)}(t_{n-1})), \quad n = \overline{1, N}.$$

Воспользовавшись методом наименьших квадратов и линейной регрессией [3], получим решения систем (3):

$$A_{:,i}^{(k)} = \left( L_i^{(k)T} L_i^{(k)} \right)^{-1} L_i^{(k)T} Y_i, \quad i = \overline{1,3}.$$

### ТЕСТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Ввиду того, что для обобщённой модели Лотки-Вольтерра в общем случае существует только численное решение, рассмотрим частный случай системы (1), когда удаётся построить аналитическое решение:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_1(1 + 0.02 x_2 - 0.1 x_3), \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2, \\ \frac{dx_3}{dt} = x_3(1 - 0.01 x_3). \end{cases} \quad (6)$$

Подстановкой можно удостовериться, что

$$s(t) = \left( \frac{(5.07 \times 10^{15}) e^{-1.6 e^{-t} + t}}{(19 + e^t)^{10}}, \quad 80 e^{-t}, \quad \frac{100 e^t}{19 + e^t} \right)^T$$

является решением системы (6) с начальными данными  $x_0 = (100, 80, 5)^T$ . Также  $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = (0, 0, 100)^T$  – предельное состояние системы (6), причём  $\forall t \geq 40 : s(t) \approx (0, 0, 100)^T$ .

В качестве исходных данных примем  $N = 12$  значений функций  $(1 + 0.05\xi_1) s_1(t)$ ,  $(1 + 0.05\xi_2) s_2(t)$ ,  $(1 + 0.05\xi_3) s_3(t)$  в узлах равномерной сетки по времени  $t_n = 0.17n$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , где  $\xi_1, \xi_2, \xi_3 \in U[-1, 1]$  – случайные величины, равномерно распределённые на  $[-1, 1]$ .

Для сравнения получаемых результатов будем использовать коэффициент детерминации  $R^2$  [3], вычисляемый по исходным данным, и относительную погрешность  $\varepsilon := \frac{1}{3M} \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{i=1}^3 \frac{(s_i(t_n) - x_i(t_n))^2}{1 + s_i^2(t_n)}$ , которая вычисляется в  $M = 800$  равноотстоящих точках отрезка  $[0, 40]$ .

Таблица 1

Результат применения  $m$ -шаговых разностных методов

$m$	$R^2$	$\varepsilon$	Предельное состояние	$m$	$R^2$	$\varepsilon$	Предельное состояние
1	0.87	0.05	(0,0,67.9)	1	0.99	0.188	(0,0,176)
2	0.96	6.72	(0,3100,+∞)	2	0.86	402	(0,46,126)
3	0.44	0.11	(0,0.0001,122)	<b>3</b>	<b>0.78</b>	<b>0.007</b>	<b>(0,0,95)</b>
4	0.97	0.08	(0,0,54.2)	4	0.95	0.065	(0,0,56)
5	0.83	41	(0,11.4,31.8)	5	0.82	0.185	(0,0,42)

(а) Явный метод

(б) Неявный метод

Наилучший результат получился для неявного трёхшагового метода (см. табл. 1 (б)). Коэффициент детерминации  $R^2$  в этом случае не наибольший, выбирать стоит по наименьшей относительной погрешности  $\varepsilon$ . Этому свидетельствует и соответствующее предельное состояние, крайне близкое к настоящему предельному состоянию системы (б).

Таблица 2

## Результат применения метода на основе приближений Пикара

Приближение	1	2	3	4	5	6	7
$R^2$	-1.54	-1.48	-96.7	0.985	<b>0.994</b>	0.994	0.994
$\varepsilon$	$+\infty$	3480	$+\infty$	0.0357	<b>0.0289</b>	0.0311	0.0308

Проводя аналогичные рассуждения, для метода, основанного на приближениях Пикара, получаем, что пятое приближение (см. табл. 2) приводит к наилучшему результату с предельным состоянием  $(0,0,71)^T$ , также близкому к настоящему предельному состоянию системы (б).

Заметим, что отрицательным значениям коэффициента детерминации  $R^2$  (см. табл. 2) соответствуют решения, плохо описывающие исходные данные. Однако при положительных значениях коэффициента детерминации  $R^2$  (см. табл. 2) оказывается, что значений  $R^2$  не достаточно для оценки качества найденных параметров.

## Библиографические ссылки

1. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976.
2. *Самарский А. А., Гулин А. В.* Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
3. *Devore Jay L.* Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, 2011.
4. *Амелькин В. В.* Дифференциальные уравнения: учеб. пособие. Минск: БГУ, 2012. 288 с. (Классическое университетское издание).

# ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ХАУСДОРФА ГРАФИКА НЕПРЕРЫВНОЙ ФУНКЦИИ

**М. М. Логиновская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
mary.loginovskaya@gmail.com;  
науч. рук. – В. Г. Кротов, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В данной работе рассмотрены понятия функциональной меры и размерности Хаусдорфа компактного множества в метрическом пространстве, а также функции Хаусдорфа. Получена оценка сверху функциональной размерности Хаусдорфа графика непрерывной функций, действующей из одного дублинг-пространства в другое. В частности, если задана непрерывная функция  $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ , то функция Хаусдорфа

$$h_{\omega}(t) = \frac{t^2}{\omega(t,f)},$$

где  $\omega$  — модуль непрерывности функции  $f$ , является верхней оценкой функциональной размерности её графика.

**Ключевые слова:** график функции; модуль непрерывности функции; дублинг-пространство; функция Хаусдорфа; функциональная мера Хаусдорфа; функциональная размерность Хаусдорфа.

Введем сначала термины, необходимые для формулировок.

Пусть  $(X, \rho)$  — метрическое пространство и  $A \subset X$  — компактное множество. Число

$$\text{diam } A = \sup\{\rho(x, y) : x, y \in A\}$$

называется диаметром множества  $A$ .

**Определение 1.** Модулем непрерывности ограниченной функции  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$  называется функция

$$\omega := \omega(t, f) = \sup\{|f(x_1) - f(x_2)| : \rho(x_1, x_2) < t, t \in (0, \text{diam}A)\}$$

[1, с. 83].

**Определение 2.** Функция  $h: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$  называется функцией Хаусдорфа, если она непрерывна, строго возрастает и  $h(+0) = 0$ .

Множество всех функций Хаусдорфа обозначим  $\mathcal{H}$ . С каждой функцией Хаусдорфа свяжем соответствующее понятие меры Хаусдорфа.

**Определение 3.** Пусть  $h \in \mathcal{H}$  — функция Хаусдорфа и  $A \subset X$  — компакт. Для  $t > 0$  введем

$$H_t^h(A) = \inf\{\sum_i h(\text{diam } A_i) : A \subset \cup_i A_i, \text{diam } A_i < t\}, \quad (1)$$

где точная нижняя грань берется по всем конечным или счетным покрытиям  $A_i$  множества  $A$ .

Число  $H_t^h(A)$  будем называть  $(h, t)$ -вместимостью Хаусдорфа множества  $A$ .

Функция  $t \mapsto H_t^h(A)$ ,  $t > 0$ , положительна и убывает (при большем  $t$  точная нижняя грань в (1) берется по более широкому множеству).

**Определение 4.** Предел  $\lim_{t \rightarrow +0} H_t^h(A) = H^h(A)$  называется  $h$ -мерой Хаусдорфа множества  $A$ .

Во множестве функций Хаусдорфа  $\mathcal{H}$  введем частичный порядок — для  $g, h \in \mathcal{H}$  будем писать, что  $g < h$ , если

$$\lim_{t \rightarrow +0} \frac{g(t)}{h(t)} = 0.$$

Ясно, конечно, что не любые две функции  $g, h \in \mathcal{H}$  сравнимы в таком смысле.

**Теорема 1.** Пусть  $A \subset X$  и функция Хаусдорфа  $h$  удовлетворяют условию

$$0 < H_h(A) < +\infty.$$

Тогда

- 1)  $H_g(A) = 0$  для любой функции  $g \in \mathcal{H}$ , что  $g < h$ ,
- 2)  $H_g(A) = +\infty$  для любой функции  $g \in \mathcal{H}$ , что  $h < g$ .

**Определение 5.** Функцию  $h \in \mathcal{H}$  будем называть функциональной размерностью Хаусдорфа множества  $A \subset X$ , если выполнено

$$0 < H_h(A) < +\infty. \quad [2, \text{с. } 37]$$

Рассмотрим понятие дублинг-пространства и некоторые его свойства, введенные в [3].

**Определение 6.** Метрическое пространство  $(X, \rho)$  называется дублинг-пространством, если существует такое число  $N \in \mathbb{N}$ , что любой шар можно покрыть не более, чем  $N$  шарами вдвое меньшего радиуса. Число  $N$  называется параметром дублинг-пространства.

Произвольный шар  $B(x, R) \subset X$ , где  $x \in X, R > 0$ , далее будем обозначать  $B(R)$ , поскольку нас будет интересовать только радиус  $u$  шара.

Графиком функции  $f : X \rightarrow Y$  называется множество

$$Gr(f) = \{(x, f(x)) \in X \times Y : x \in X\}.$$

Пусть  $f \in C(X, Y)$ , где  $X, Y$  — дублинг-пространства с параметрами  $N_X$  и  $N_Y$  соответственно, причем  $X$  является ограниченным множеством.

Найдем функцию Хаусдорфа  $h$ , которая будет являться верхней оценкой функциональной размерности графика функции  $f$ .

То есть для любой функции Хаусдорфа  $g \in H$  такой, что  $g < h_\omega$ , будет выполнено

$$H^g(Gr(f)) = 0.$$

**Лемма 1.** Любой шар  $B(R) \subset X$  можно покрыть шарами радиуса  $r$ , количество которых не превышает

$$N \left( \frac{R}{r} \right)^{\log_2 N},$$

где  $0 < r < R$ .

Эта лемма является техническим результатом, используемым при доказательстве нашего основного результата.

**Теорема 2.** Пусть  $f \in C(X, Y)$ . Тогда

$$H^{h_\omega}(Gr(f)) < \infty,$$



где функция  $h_\omega$  определяется равенством

$$h_\omega(t) = \frac{t^{\log_2 N_X N_Y}}{\omega(t, f)^{\log_2 N_Y}},$$

где  $\omega$  — модуль непрерывности функции  $f$ .

Поскольку теорема 2 носит очень общий характер, приведем ряд следствий из нее, которые носят более прозрачный характер.

Пусть  $X = [0, 1]^{d_0}$ ,  $Y = \mathbb{R}^{d_1}$ , тогда  $N_X = 2^{d_0}$  и  $N_Y = 2^{d_1}$ . Тогда из теоремы 2 вытекает следующее утверждение.

**Теорема 3.** Если  $f \in C([0, 1]^{d_0}, \mathbb{R}^{d_1})$ , то

$$H^{h_\omega}(Gr(f)) < \infty,$$

когда

$$h_\omega(t) = \frac{t^{d_0+d_1}}{\omega(t, f)^{d_1}}.$$

Положим  $d_0 = d_1 = 1$  в предыдущей теореме, в таком случае получаем результат, сформулированный в следующей теореме.

**Теорема 4.** Если  $f \in C([0, 1], \mathbb{R})$ , то

$$H^{h_\omega}(Gr(f)) < \infty,$$

когда

$$h_\omega(t) = \frac{t^2}{\omega(t, f)}.$$

Результат, приведенный в последней теореме, является точным, если ограничиться классами Гельдера  $\omega(t, f) = O(t^\alpha)$ ,  $0 < \alpha < 1$ . Это было доказано в сложной работе [4]. Вопрос о точности в общем случае теоремы 4 — хорошо известная нерешенная задача.

### Библиографические ссылки

1. Кротов В. Г. Математический анализ: учеб. пособие. Минск: БГУ, 2017.
2. Falconer K. Fractal Geometry. Mathematical foundations and applications. Chichester: Wiley, 2003.
3. Heinonen J. Lectures on analysis on metric spaces. New York-Berlin- Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
4. Besicovitch A.S., Ursell H.D. Sets of Fractional Dimensions (V) : on Dimensional Numbers of Some Continuous Curves // Journal of the London Mathematical Society. 1937. V. 1–12, No 1. P. 18–25.

# БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ С БАЛОЧНЫМ ПРОТЕЗОМ НА ИМПЛАНТАТАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Д. В. Назаренко

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*dm.nazarenko96@gmail.com;*

*науч. рук. – С. М. Босяков, д-р физ.-мат. наук, доц.*

В настоящей работе представлены результаты конечно-элементного моделирования функционирования нижней челюсти человека с установленным на сферических имплантатах балочным протезом. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния слизистой оболочки при действии двух групп жевательных мышц.

**Ключевые слова:** нижняя челюсть, балочный протез, сферический имплантат, слизистая оболочка, жевательные мышцы, конечно-элементное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Лечение полного отсутствия зубов нижней челюсти в большинстве случаев осуществляется с использованием съемного протеза с фиксацией на имплантатах на двух имплантатах с двумя шарообразными абатментами. Как правило, при определении напряженно-деформированного состояния «костная ткань – слизистая оболочка – имплантаты – протез» используется конечно-элементное моделирование. При этом на результаты расчетов существенное влияние оказывает величина силы, действующей на зуб ориентация мышечных сил, точки прикрепления мышц к кости нижней челюсти и биологические свойства материалов [1]. Целью настоящей работы является определение напряженно-деформированного состояния слизистой оболочки нижней челюсти человека с установленным на имплантатах протезом при действии различных групп мышц.

Конечно-элементная модель нижней челюсти с протезом разработана на основании томографических данных. Толщина слоя кортикальной костной ткани и слизистой оболочки составляет 3,4 мм и 3,0 мм соответственно. Длина имплантата, диаметр сферического элемента, высота соединения составили 10,0 мм, 4,2 мм и 9,4 мм соответственно. Предполагалось, что имплантаты полностью остеоинтегрированы в костную ткань и компоненты имплантатов корректно затянуты (между элементами модели задается контакт типа Bonded). Модели нижней челюсти и имплантата представлены на рисунке 1.

Прикладываемая к протезу нагрузка и граничные условия имитировали действие двух групп мышечных сил, соответствующие физиологической жевательной нагрузке [2–4].

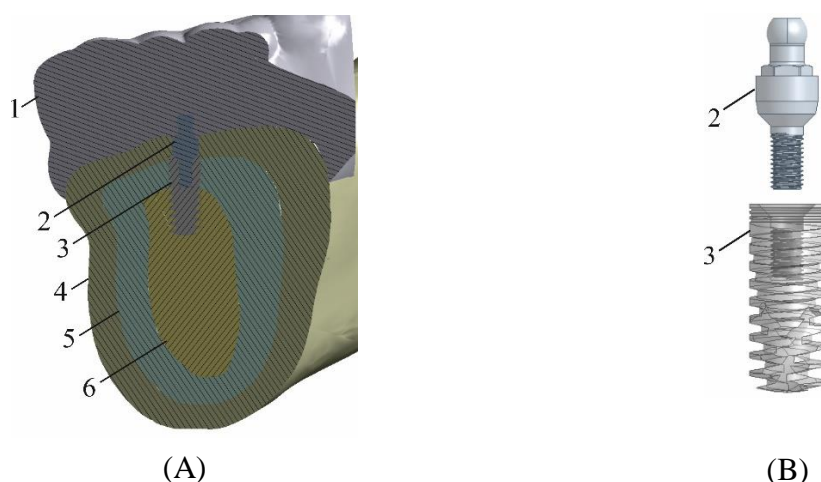


Рис. 1. Поперечное сечение модели верхней челюсти в области установки одного из имплантатов (А) и компоненты модели зубного имплантата (В):

1 – зубной протез, 2 – абатмент, 3 – имплантат, 4 – слизистая оболочка, 5 – кортикальная костная ткань, 6 – губчатая костная ткань

Физико-механические свойства для элементов модели в соответствии с данными работ [2, 5] представлены в таблице.

#### Физико-механические свойства материалов модели

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Губчатая костная ткань	1 370,0	0,30
Кортикальная костная ткань	13 700,0	0,30
Слизистая оболочка	19,6	0,30
Имплантат, абатмент	110 000,0	0,35
Протез (акрил)	8300,0	0,28

Предполагалось, что мышечные силы приложены к центру тяжести узлов элементов, соответствующих области прикрепления мышц. Направление мышечных сил определялось направляющими косинусами в соответствии с данными исследования [3]. Фиксация модели нижней челюсти осуществлялась по поверхностям височно-нижнечелюстных суставов. Также фиксировались узлы на поверхности модели протеза в области второго премоляра и первого моляра нижней челюсти в предположении, что в этой области располагаются продукты питания [3, 4]. Граничные условия для двух групп мышечных сил с обозначением их величин представлены на рисунках 2 и 3.

Для расчета напряженно-деформированного состояния биомеханической системы «нижняя челюсть – балочный протез» использован конечно-элементный пакет ANSYS Workbench (Ansys Corporate, Canonsburg, PA). Дискретизация конечно-элементной модели

выполнена в полуавтоматическом режиме. Максимальный размер ребра конечных

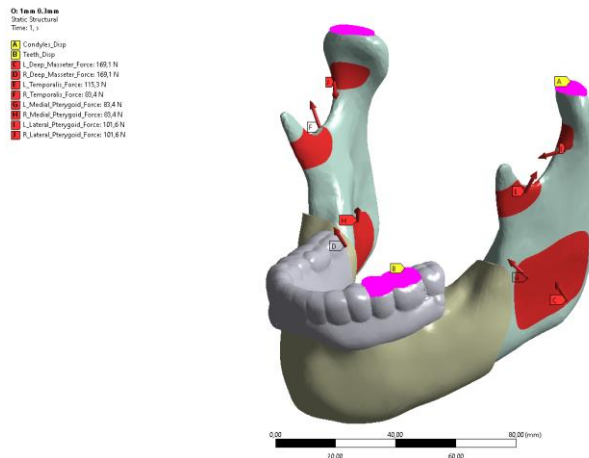


Рис. 2. Граничные условия для модели нижней челюсти с прикрепленным балочным протезом при действии первой группы мышц [3]: маркер А – зафиксированные узлы на поверхности второго премоляра и первого моляра; маркер В – зафиксированные узлы на поверхности височно-нижнечелюстных суставов; маркеры С и D – равнодействующие сил жевательных мышц; маркеры Е и F – равнодействующие сил височной мышцы; маркер G и H – равнодействующие сил медиальной крыловидной мышцы; маркеры J и I – равнодействующие сил боковых крыловидных мышц

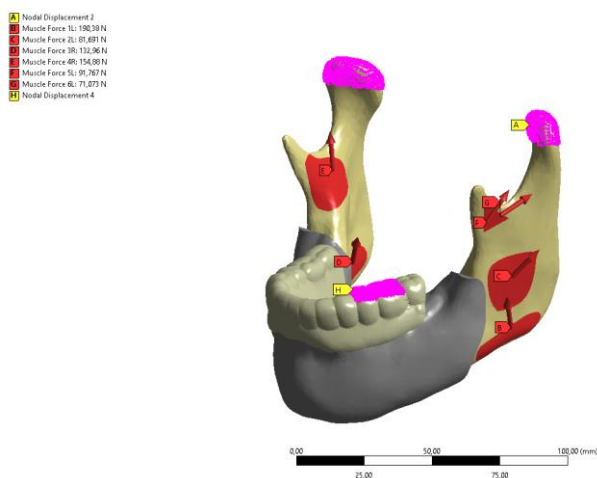


Рис. 3. Граничные условия для модели нижней челюсти с прикрепленным балочным протезом при действии первой группы мышц [4]: маркер А – зафиксированные узлы на поверхности второго премоляра и первого моляра маркер В – равнодействующая сил поверхностных жевательных мышц; маркер С – равнодействующая сил глубоких жевательных мышц; маркер D – равнодействующая сил медиальных крыловидных мышц; маркер Е – равнодействующая сил передних височных мышц; F – равнодействующая сил средних височных мышц; G – равнодействующая сил задних височных мышц

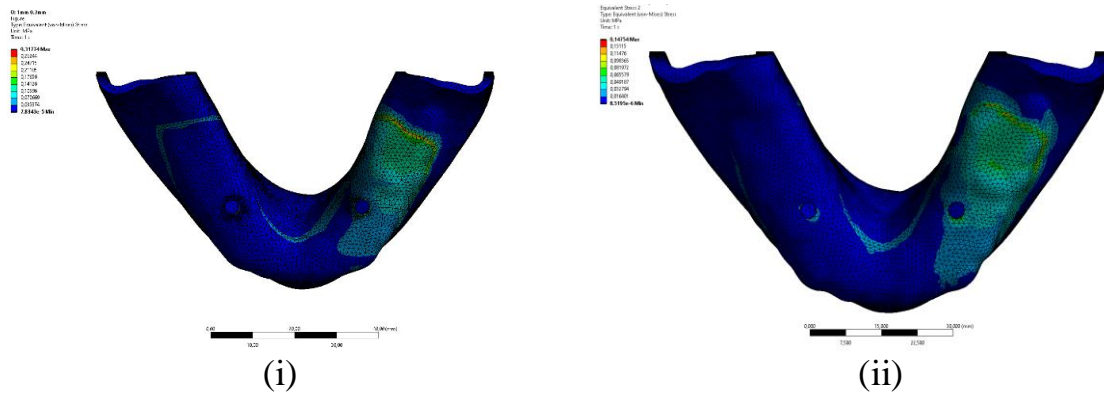


Рис. 4. Распределение напряжений в слизистой оболочке нижней челюсти при действии первой (i) и второй (ii) групп мышц

элементов для нижней челюсти и протеза составляет 1,0 мм; максимальная длина ребра конечного элемента для имплантата равна 0,3 мм. При генерации конечно-элементной модели использованы трехмерные четырехузловые тетраэдрические элементы.

Из рисунка 4 видно, что наибольшие эквивалентные напряжения возникают по контуру балочного протеза независимо от того, какая группа мышц действует на нижнюю челюсть. В то же время величины максимальных напряжений существенно отличаются для рассматриваемых двух групп мышц ( $\approx 0,32$  МПа и 0,15 МПа соответственно). Также следует отметить, что при действии второй группы мышц наблюдается напряженное состояние в окрестности имплантата, расположенного со стороны, на которой отсутствуют продукты питания.

Работа выполнена в рамках задания 1.7.1.4 ГПНИ Конвергенция.

#### Библиографические ссылки

1. *Stansfield E., Parker J., O'Higgins P.* A sensitivity study of human mandibular biting simulations using finite element analysis // *J. Archaeologic. Sci.: Rep.* 2018. Vol. 22. P. 420-432. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.04.026>.
2. *Moldoveanu S.A.B., Munteanu F., Forna N.C.* Impact of implant-retained mandibular overdenture on oral mucosa - a finite element analysis // *Rom. J. Oral Rehabilitat.* 2020. Vol. 12, No. 1. P. 6–12.
3. *Daas M., Dubois G., Bonnet A.S., Lipinski P., Rignon-Bret C.* A complete finite element model of a mandibular implant-retained overdenture with two implants: Comparison between rigid and resilient attachment configurations // *Med. Eng. Phys.* 2008. Vol. 30. P. 218–225.
4. *Lin P.-J., Su K.-Ch.* Biomechanical design application on the effect of different occlusion conditions on dental implants with different positions – a finite element analysis // *Applied Sciences.* 2020. Vol. 10, 5826; doi:10.3390/app10175826
5. *Darbar U.R., Huggett R., Harrison A., Williams K.* Finite element analysis of stress distribution at the toothdenture base interface of acrylic resin teeth debonding from the denture base // *J. Prosthet. Dent.* 1995. Vol. 74. P. 591-594.

# РАСПОЗНАВАНИЕ ПНЕВМОНИИ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ СНИМКУ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Л. А. Таборов**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*lev.taborov@icloud.com;*

*науч.рук. – Голубева Л.Л., канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе рассмотрены рентгенологические методы диагностики пневмонии, возможность применения искусственных нейронных сетей для обнаружения характерных рентгенологических синдромов. Построена модель для диагностирования и локализации отклонений от нормы на рентгеновских снимках грудной клетки, ассоциированных с пневмонией. Актуальность темы связана с повсеместным использованием рентгенографии для скрининга населения и обнаружения заболеваний легких.

**Ключевые слова:** пневмония; заболевания легких; рентгенография; обнаружение объектов на изображениях; сверточные нейронные сети; R-CNN.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительные успехи мирового сообщества по противодействию пандемии коронавируса, начавшейся в 2019 году, на врачей взвалилась огромная работа и ответственность за жизнь и здоровье миллионов людей. Кроме того, мероприятия скрининга населения продолжают по сей день. Применение алгоритмов искусственного интеллекта может упростить, ускорить и удешевить диагностику заболеваний легких, повысить вероятность их обнаружения на ранних стадиях.

## ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пневмония – патологический процесс в легких, воспаление легочной ткани. Существует большое множество возбудителей пневмонии: различные вирусы, бактерии, грибки. Вследствие воспалительного процесса и ответной иммунной реакции нарушается нормальная работа легких. Из-за нарушенного газообмена угнетается общее состояние организма, что может привести к смерти.

Особую опасность представляет так называемая атипичная пневмония, при которой типичные симптомы выражены в гораздо меньшей степени, преобладает второстепенная симптоматика – боли в горле, мышцах, головная боль, общая слабость. Именно атипичная пневмония, чьим возбудителем является коронавирус SARS-CoV-2,

являлась основной причиной смертности людей во время глобальной пандемии, начавшейся в 2019 году.

На первом этапе диагностики заболеваний органов дыхания врачу необходимо решить задачу разграничения «нормы» и «патологии». Для этого пациент проходит лучевую диагностику, и задача решается, прежде всего, на основе данных, полученных при рентгенографии.

Рентгенологические проявления патологических процессов в легких разнообразны, но они могут быть сгруппированы в следующие девять рентгенологических синдромов, показанных на рис. 1:

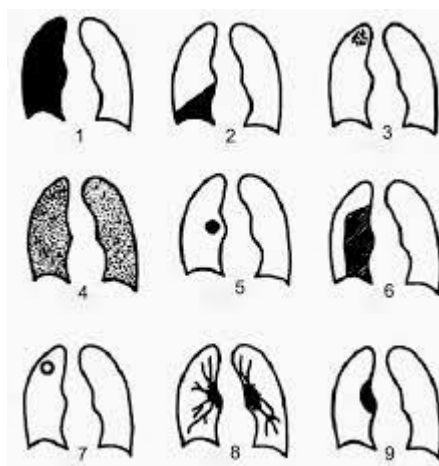


Рис.1. Рентгенологические синдромы заболеваний легких

1. обширное затемнение легочного поля,
2. ограниченное затемнение,
3. очаги и ограниченная очагов диссеминация,
4. обширная очаговая диссеминация,
5. круглая тень,
6. просветление легочного поля,
7. кольцевидная тень,
8. изменение легочного рисунка,
9. изменение корней легких.

На рентгеновском снимке пневмония чаще всего проявляется синдромом ограниченного затемнения легочного поля. Затемнение происходит из-за того, что альвеолы наполнены не воздухом, а жидкостью, что снижает проницаемость легочной ткани для рентгеновского излучения.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Все задачи компьютерного зрения сводятся к анализу изображения или видеопотока, на котором требуется, прежде всего, выделить фрагмент, содержащий необходимую информацию. Для выделения



обычно используют прямоугольную область, которая ограничивает исходный фрагмент, или маску, которая выделяет пиксели, принадлежащие объекту.

В компьютерном зрении различают несколько задач распознавания объектов на изображении:

- Классификация изображений (image classification) – отнесение всего изображения к какому-либо классу.
- Локализация объектов на изображении (object localization) – нейросеть возвращает координаты ограничивающих объекты рамок.
- Обнаружение объектов (object detection) – вместе с ограничивающими объект рамками алгоритм возвращает класс объекта и вероятность его принадлежности этому классу.
- Сегментация изображений или объектов (image segmentation) – выделение отдельных частей изображения или объектов.

В основе моделей для обработки изображений лежат сверточные нейронные сети (CNN, Convolutional Neural Network), принцип действия которых основывается на операции свертки.

Для решения задач обнаружения и локализации объектов используют более сложное семейство сверточных нейронных сетей R-CNN (Regional Based CNN), 2014 г. [1]. В это семейство входят модели R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN. Архитектура R-CNN состоит из трех модулей:

- Первый модуль генерирует алгоритмом выборочного поиска (selective search [2]) регионы интереса (region proposal) – потенциальные ограничивающие рамки для объектов.
- Второй модуль – сверточные слои, которые для каждого региона, предложенного первым модулем, создают карту признаков.
- Последний модуль – классификатор. В модели 2014 года использовалась линейная машина опорных векторов.

Модель Faster R-CNN была представлена в 2016 году [3]. Изменения коснулись способа получения регионов интереса: вместо алгоритма selective search, авторы предложили использовать обучаемую нейронную сеть RPN (Region Proposal Network) для поиска этих регионов.

Существует надстройка над Faster R-CNN, позволяющая более точно определять границы объектов. Mask R-CNN [4] использует сигнал сети Faster R-CNN, полученный после пулинга, и подает его на вход еще одной сверточной нейронной сети, которая возвращает маски объектов.

## **ТРАНСФЕРНОЕ ОБУЧЕНИЕ**

Трансферное обучение (Transfer Learning) предполагает использование моделей, предварительно обученных на больших наборах данных, таких как MNIST, CIFAR-10 ImageNet, COCO и др. Чтобы

приспособить уже обученную модель решать конкретную задачу, выполняются замена встроенного в модель классификатора (обычно это несколько последних полносвязных слоев) новым, соответствующим классам целевой задачи, и дообучение (fine tuning) модели на исходных данных. Существует три способа адаптации предобученной модели к решению частной задачи:

- Обучение всей модели с обновлением всех коэффициентов исходной модели в соответствии с целевым набором изображений.
- Обучение нескольких сверточных слоев с замораживанием (сохранением) весов начальных слоев нейросети, соответствующих общим признакам изображений, независимых от задачи, и обновлением весов слоев более высоких уровней.
- Обучение классификатора на исходном наборе данных с замораживанием весов всей сверточной части сети.

Трансферное обучение и предобученные сети позволяют не тратить ресурсы и время на настройку весов скрытых слоев, а лишь обучить выходные слои для решения конкретной задачи.

## **МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ MASK R-CNN**

В практической части работы рассмотрена задача диагностирования и локализации отклонений от нормы на рентгеновских снимках грудной клетки, ассоциированных с пневмонией. Задача и необходимые данные были предложены к соревнованию по машинному обучению на платформе Kaggle Обществом радиологии Северной Америки (RSNA, Radiological Society of North America).

Для хранения снимков с медицинскими изображениями (в нашем случае рентгенограммами) и их метаданных использовался формат файлов DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

Для решения задачи построена, обучена и протестирована модель на основе нейронной сети Mask R-CNN с использованием трансферного обучения. Использовалась сеть, предобученная на наборе данных COCO, который часто используют для обучения моделей компьютерного зрения.

При решении этой задачи можно выделить следующие этапы:

1. загрузка модели на основе нейронной сети Mask R-CNN и загрузка предобученных весов из репозитория;
2. конфигурирование модели с использованием сверточной нейронной сети ResNet50 для получения карты признаков;
3. загрузка данных из файлов в формате DICOM и доступ к информации об изображениях;

4. создание объекта модели Mask R-CNN с предобученными весами, обучение полносвязных слоев на загруженном наборе данных;
5. дообучение модели целиком.

Результаты работы обученной модели можно видеть на рис. 2.

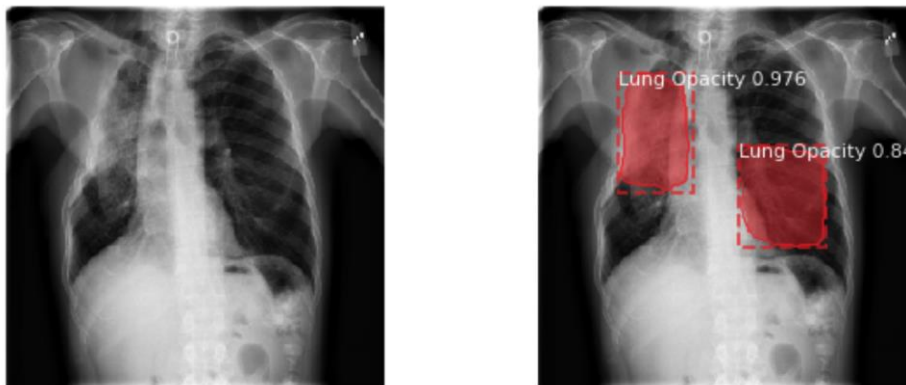


Рис.2. Оригинальное изображение (слева) и ограничивающие рамки и маски (справа)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на успехи машинного обучения, здравоохранение остается достаточно специфичной сферой для успешного внедрения технологий, способных заменить врачей. На сегодняшний день такая ситуация невозможна. Но вполне вероятно создание своеобразных «помощников», которые будут автономно просматривать скрининговые снимки пациентов, составлять предварительные отчеты и уведомлять врачей о необходимости дальнейшего обследования.

## Библиографические ссылки

1. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / R. Girshick [et al.] // arXiv [Электронный ресурс]. – 2013. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1311.2524.pdf>
2. Selective Search for Object Detection | R-CNN // Geeks for geeks [Электронный ресурс]. – 2021. Режим доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/selective-search-for-object-detection-r-cnn/>
3. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / S. Ren [et al.] // arXiv [Электронный ресурс]. – 2016. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>
4. Mask R-CNN / K. He [et al.] // arXiv [Электронный ресурс]. – 2018. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870.pdf>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПУКЛОСТИ $f$ -ПОТЕНЦИАЛА

Н. А. Царёв

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
colya.tsarew2015@yandex.by;  
науч. рук. – В. И. Бахтин, доктор физ.-мат. наук, проф.

В данной заметке обобщается понятие спектрального потенциала и исследуется его выпуклость. Результаты могут быть применены в теории вероятностей и функциональном анализе.

**Ключевые слова:** выпуклость; спектральный потенциал;  $f$ -потенциал.

## ВВЕДЕНИЕ

Существует такое понятие как спектральный потенциал. Пример его использования в приложениях можно найти в статье [1]. В ней активно используется свойство выпуклости спектрального потенциала. В следующем примере мы формально определим спектральный потенциал и исследуем его выпуклость.

**Пример 1.** Спектральным потенциалом будем называть функционал вида:

$$\lambda(\varphi) = \ln\left(\int_{\Omega} e^{\varphi} d\mu\right), \text{ где } \varphi \in L^{\infty}(\Omega, \mu).$$

Докажем выпуклость спектрального потенциала.

Пусть  $\varphi, \psi \in L^{\infty}(\Omega, \mu)$ . Тогда

$$\frac{d\lambda(\varphi + t\psi)}{dt} = \frac{\int_{\Omega} e^{\varphi + t\psi} \psi d\mu}{\int_{\Omega} e^{\varphi + t\psi} d\mu}$$
$$\frac{d^2\lambda(\varphi + t\psi)}{dt^2} \Big|_{t=0} = \frac{\int_{\Omega} e^{\varphi} \psi^2 d\mu \int_{\Omega} e^{\varphi} d\mu - \left(\int_{\Omega} e^{\varphi} \psi d\mu\right)^2}{\left(\int_{\Omega} e^{\varphi} d\mu\right)^2}.$$

Достаточно проверить, что последнее выражение неотрицательно. Это равносильно тому, что

$$\int_{\Omega} e^{\varphi} \psi^2 d\mu \int_{\Omega} e^{\varphi} d\mu \geq \left( \int_{\Omega} e^{\varphi} \psi d\mu \right)^2.$$

Последнее неравенство — это неравенство Коши — Буняковского для функций  $f = e^{\varphi/2} \psi$  и  $g = e^{\varphi/2}$ . Поэтому оно выполняется. Значит функционал  $\lambda(\varphi)$  выпуклый.  $\square$

Помимо спектрального потенциала существуют другие функционалы подобной структуры, которые также являются выпуклыми.

**Пример 2.** Рассмотрим функционал

$$\lambda(\varphi) = \left( \int_{\Omega} \varphi^p d\mu \right)^{1/p}, \quad p > 1,$$

на множестве

$$X = \left\{ \varphi \in L^{\infty}(\Omega, \mu) \mid \text{ess inf } \varphi > 0 \right\}.$$

Пусть  $\varphi \in X$  и  $\psi \in L^{\infty}(\Omega, \mu)$ . Тогда

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda(\varphi + t\psi)}{dt} &= \left( \int_{\Omega} (\varphi + t\psi)^p d\mu \right)^{1/p-1} \int_{\Omega} (\varphi + t\psi)^{p-1} \psi d\mu, \\ \frac{d^2\lambda(\varphi + t\psi)}{dt^2} \Big|_{t=0} &= (1-p) \left( \int_{\Omega} \varphi^p d\mu \right)^{1/p-2} \left( \int_{\Omega} \varphi^{p-1} \psi d\mu \right)^2 + \\ &+ (p-1) \left( \int_{\Omega} \varphi^p d\mu \right)^{1/p-1} \int_{\Omega} \varphi^{p-2} \psi^2 d\mu. \end{aligned}$$

Проверим, что последнее выражение неотрицательно. Это равносильно тому, что

$$\int_{\Omega} \varphi^{p-2} \psi^2 d\mu \int_{\Omega} \varphi^p d\mu \geq \left( \int_{\Omega} \varphi^{p-1} \psi d\mu \right)^2.$$

Последнее неравенство — это неравенство Коши — Буняковского для функций  $f = \varphi^{p/2-1}\psi$  и  $g = \varphi^{p/2}$ . Поэтому оно выполняется.

Значит функционал  $\lambda(\varphi)$  выпуклый.  $\square$

При рассмотрении указанных выше примеров возникает вопрос: при каких ограничениях на функцию, порождающую подобные по построению спектральному потенциалу функционалы будут выпуклы?

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть  $\mu$  — вероятностная мера на множестве  $\Omega$ ,  $I$  — открытое связное подмножество в  $\mathbb{R}^2$ . Рассмотрим пространство существенно ограниченных вещественнозначных функций  $L^\infty(\Omega, \mu)$  и выделим из него подмножество  $X$ , в которое включим функции вида  $\varphi : \Omega \rightarrow I$ . Заметим, что множество  $X$  — выпукло. Пусть  $f: I \rightarrow \mathbb{R}^2$  — непрерывная строго возрастающая функция.

Тогда  $f$ -потенциалом будем называть функционал вида

$$\lambda_f(\varphi) = f^{-1}\left(\int_{\Omega} f(\varphi)d\mu\right), \text{ где } \varphi \in X.$$

**Замечание.** Разумно предположить, что множество  $\Omega$  представимо в виде дизъюнктного объединения двух множеств ненулевой меры, потому что в противном случае  $f$ -потенциал вырождается. Далее будем считать, что указанное условие выполняется.

Исследуем вопрос выпуклости  $f$ -потенциала, т. е. при каких условиях на  $f$  для любого  $\tau \in (0,1)$  для любых  $\varphi, \psi \in X$  выполняется неравенство

$$\lambda_f(\tau\varphi + (1-\tau)\psi) \leq \tau\lambda_f(\varphi) + (1-\tau)\lambda_f(\psi).$$

### ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Предположим, что  $f$  дважды дифференцируема. Определим функцию  $h$  из следующего выражения:

$$h(f(x)) = \frac{f'(x)^2}{f''(x)}.$$

Будем считать, что если  $f''(x)$  принимает нулевое значение в точке  $x_0$ , то  $h(f(x_0)) = +\infty$ . Также, если  $h$  тождественно равна  $+\infty$  будем считать, что  $h$  вогнута.

**Теорема 1.** Пусть  $f: I \rightarrow \mathbb{Y}^2$  — дважды дифференцируемая строго возрастающая функция. Функционал  $\lambda_f$  является выпуклым тогда и только тогда, когда  $f$  выпукла и  $h$  вогнута.

### ПРИМЕРЫ

**Пример 3.** Построим функционал  $\lambda_{\text{ch}}$  с параметрами  $f(x) = \text{ch } x, I = (0, +\infty)$ . Тогда

$$f'(x) = \text{sh } x > 0,$$

$$f''(x) = \text{ch } x > 0,$$

$$h(\text{ch}(x)) = \frac{(\text{sh } x)^2}{\text{ch } x} = \frac{\text{ch}^2 x - 1}{\text{ch } x} > 0,$$

$$h(t) = \frac{t^2 - 1}{t},$$

$$h'(t) = \frac{t^2 + 1}{t^2},$$

$$h''(t) = \frac{-2}{t^3}.$$

Очевидно, что  $h$  — вогнутая и, в силу теоремы 1 функционал  $\lambda_{\text{ch}}$  выпуклый.  $\square$

**Пример 4.** Построим функционал  $\lambda_{\text{sh}}$  с параметрами  $f(x) = \text{sh } x, I = (0, +\infty)$ . Тогда

$$f'(x) = \text{ch } x > 0,$$

$$f''(x) = \text{sh } x > 0,$$

$$h(\text{sh}(x)) = \frac{(\text{ch } x)^2}{\text{sh } x} = \frac{\text{sh}^2(x) + 1}{\text{sh } x} > 0,$$

$$h(t) = \frac{t^2 + 1}{t},$$

$$h'(t) = \frac{t^2 - 1}{t^2},$$

$$h''(t) = \frac{2}{t^3}.$$

Очевидно, что  $h$  не вогнутая и в силу теоремы 1 функционал  $\lambda_{\text{sh}}$  не является выпуклым.

#### Библиографические ссылки

1. В. И. Бахтин, “Спектральный потенциал, действие Кульбака и большие отклонения эмпирических мер на измеримых пространствах”, Теория вероятн. и ее примен., 59:4 (2014), 625–638; Theory Probab. Appl., 59:4 (2015), 535–544



# КРИТЕРИИ КОМПАКТНОСТИ В ПРОСТРАНСТВАХ СУММИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ

К. В. Хурсик

Белорусский государственный университет, Минск;

*k.khursik@gmail.com*;

науч. рук. – В. Г. Кротов, д-р физ.-мат. наук, проф.

В работе приводится новый критерий компактности множеств в пространствах суммируемых функций  $L^p(X)$ ,  $0 < p < \infty$ , где  $X$  – метрическое пространство с мерой, удовлетворяющей условию удвоения. Этот критерий аналогичен известному критерию А.Н. Колмогорова, однако, вместо средних Стеклова мы используем постоянные наилучшего приближения в  $L^p(X)$ .

**Ключевые слова:** компактность; наилучшие приближения постоянными; метрические пространства с мерой; пространства  $L^p$ ; максимальные функции.

Мы будем рассматривать вопрос о условиях полной ограниченности для пространств  $L^p(X)$ ,  $0 < p < \infty$ , где  $(X, d, \mu)$  – ограниченное метрическое пространство с метрикой  $d$  и борелевской мерой  $\mu$ .

На протяжении всей работы систематически используются следующие обозначения

$$B(x, r) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$$

для шара с центром в точке  $x \in X$  радиуса  $r > 0$  и

$$f_B = \frac{1}{\mu(B)} \int_B f \, d\mu$$

для среднего значения функции  $f \in L^1(B)$  по шару  $B \subset X$ . Для любого шара  $B \subset X$  радиус  $B$  будем обозначать  $r_B$ .

Кроме того,  $L^0(X)$  обозначает множество (классов эквивалентности) измеримых функций на  $X$  с топологией сходимости по мере.

Хорошо известен критерий компактности А.Н. Колмогорова [2]: множество  $S \subset L^p(X)$ ,  $p > 1$ , вполне ограничено тогда и только тогда, когда оно ограничено и

$$\lim_{r \rightarrow +0} \sup_{f \in S} \int_X \left| f(x) - \frac{1}{\mu(B(x, r))} \int_{B(x, r)} f \, d\mu \right|^p d\mu(x) = 0.$$

Здесь  $X$  – ограниченное измеримое подмножество в  $\mathbb{R}^n$  и все функции считаются продолженными нулем вне  $X$ . Отметим работу [3], в которой обсуждаются критерии компактности М. Рисса и А.Н. Колмогорова.

Этот критерий нельзя применять для пространств  $L^p$  при  $0 < p < 1$ , так как средние Стеклова в этой ситуации не существуют, вообще говоря. В работе [1] доказан ряд критериев для полной шкалы пространств  $L^p(X)$ ,  $0 < p < \infty$ .

В.Г. Кротов предложил использовать вместо средних Стеклова постоянные наилучшего приближения в  $L^p(B)$ , определяемые следующим образом: при  $p > 0$  для любого шара  $B \subset X$  существует такое число  $I_B^{(p)} f \in \mathbb{R}$ , что

$$\inf_{I \in \mathbb{R}} \int_B |f(y) - I|^p d\mu(y) = \int_B |f(y) - I_B^{(p)} f|^p d\mu(y).$$

Число  $I_B^{(p)} f \in \mathbb{R}$  определяется неоднозначно, если  $0 < p \leq 1$ . Можно использовать любое из них.

При доказательствах мы опираемся на следующий общий критерий полной ограниченности, который приведен, например, в [1].

**Теорема 1.**  $X$  – множество конечной меры,  $0 < p < \infty$ . Множество  $S \subset L^p(X)$  вполне ограничено тогда и только тогда, когда выполнены следующие условия:

- а)  $S$  вполне ограничено в  $L^0(X)$ ;
- б) множество интегралов функций  $\{|f|^p : f \in S\}$  равномерно абсолютно непрерывно, т. е.
- с)

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad \forall f \in S, \quad E \subset X, \quad \mu(E) < \delta \Rightarrow \int_E |f|^p d\mu < \varepsilon.$$

Следующая теорема даёт необходимое условие для полной ограниченности множества  $S \subset L^p(X)$ .

**Теорема 2.** Пусть  $0 < q < p < \infty$ . Если множество  $S \subset L^p(X)$  вполне ограничено, то

$$\lim_{r \rightarrow +0} \sup_{f \in S} \int_X |f(x) - I_{B(x,r)}^{(q)} f|^p d\mu(x) = 0$$

Идея доказательства теоремы 2 состоит в применении теоремы Лебега о мажорируемой сходимости для каждой функции  $f \in L^p(X)$  и её

наилучшего приближения  $I_{B(x,r)}^{(q)}f$ , а затем в обобщении этого свойства сразу для всех функций из множества  $S$ .

**Теорема 3.** Пусть  $0 < q < p < \infty$ . Если множество  $S \subset L^p(X)$  вполне ограничено в  $L^0(X)$  и

$$\lim_{r \rightarrow +0} \sup_{f \in S} \int_X \left| f(x) - I_{B(x,r)}^{(q)}f \right|^p d\mu(x) = 0,$$

то  $S$  вполне ограничено в  $L^p(X)$ .

Теперь останется доказать, что из условия теоремы 3 следует условие равномерной абсолютной непрерывности множества интегралов из теоремы 1. Это проверяется непосредственно.

Следствием теорем 2 и 3 является следующий критерий.

**Следствие 1.**  $X$  – множество конечной меры,  $0 < q < p < \infty$ . Множество  $S \subset L^p(X)$  вполне ограничено в  $L^p(X)$  тогда и только тогда, когда оно вполне ограничено в  $L^0(X)$  и

$$\lim_{r \rightarrow +0} \sup_{f \in S} \int_X \left| f(x) - I_{B(x,r)}^{(q)}f \right|^p d\mu(x) = 0.$$

Необходимость условия полной ограниченности множества в  $L^0(X)$  для полной ограниченности в  $L^p(X)$  хорошо известна (см, например, [1, теорема 9]).

#### Библиографические ссылки

1. Krotov V. G. // Sb. Math. 2012. V. 203, No. 7. P. 1045–1064. (Zbl 1271.46023); translation from Mat. Sb. 2012. V. 203, No. 7. P. 129–148.
2. Kolmogoroff A. // Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. 1931. P. 60–63. (Zbl 0002.38501)
3. Hanche-Olsen H. and Holden H. // Expo. Math. 2010. V. 28, No. 4. P. 38–394. (Zbl 1208.46027)

# ОБНАРУЖЕНИЕ СООБЩЕСТВ АЛГОРИТМОМ ЛЕЙДЕНА

А. О. Яблонская

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
anna.yablonskaya2002@yandex.ru;  
науч. рук. – А. Э. Малевич, канд. физ.-мат. наук, доц.

В статье рассматриваются методы обнаружения сообществ в графах. Подробно исследован алгоритм Лейдена разбиения графа на сообщества. Описаны примеры применения алгоритма Лейдена: рекомендательная система фильмов, взаимосвязи героев романа Виктора Гюго «Отверженные», игры по американскому футболу между различными колледжами.

**Ключевые слова:** графы; кластеризация; обнаружение сообществ; алгоритм Лейдена; приложения алгоритма Лейдена.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных характеристик графов, представляющих реальные системы, является разбиение на сообщества, т. е. организация вершин графа в подгруппы таким образом, чтобы вершины внутри каждой группы соединялись множеством рёбер, но сравнительно мало рёбер соединяли вершины из разных групп. Обнаружение сообществ имеет большое значение в социологии, биологии и компьютерных науках.

Множество вершин графа называется сообществом, если связь вершин в данном множестве лучше, чем связь между вершинами множества и вершинами вне него. На рис. 1 вершины, выделенные одним цветом, составляют сообщества.

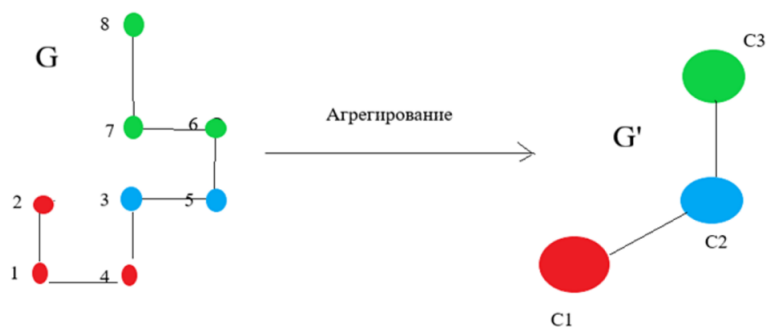


Рис. 1. Разбиение графа

Разбиение графа  $\mathcal{P} = \{C_1, \dots, C_r\}$  состоит из  $r = |\mathcal{P}|$  сообществ, где каждое сообщество  $C_i \subseteq \mathcal{P}$  состоит из множества узлов  $V = \bigcup_i C_i$ ,  $C_i \cap C_j = \emptyset$  для любых  $i \neq j$ .

Одним из способов нахождения сообществ является учёт модульности. Использование этого понятия позволяет максимизировать

разницу между фактическим и ожидаем количеством рёбер в сообществе  $C$ . Существуют различные виды модульности, однако для данного подхода интересна лишь константная модель Поттса. Согласно этой модели функцию качества  $\mathcal{H}(G, \mathcal{P})$  или кратко  $\mathcal{H}(\mathcal{P})$  разбиения  $\mathcal{P}$  на сообщества графа  $G$  запишем в виде

$$\mathcal{H}(\mathcal{P}) = -\sum_c e_c - \gamma n_c^2,$$

где каждое сообщество  $C \in \mathcal{P}$  состоит из  $e_c$  ребер и  $n_c$  вершин, а  $\gamma$  – это параметр разрешения, существенно влияющий на качество разбиения графа на сообщества.

### АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СООБЩЕСТВ

Существуют различные алгоритмы обнаружения сообществ. Наиболее популярными являются алгоритм Лувена и алгоритм Лейдена [1]. Оба этих алгоритма основаны на модульности и рассматриваются как методы быстрого обнаружения сообществ в сети. Алгоритм Лувена имеет несколько недостатков. Во-первых, данный алгоритм может находить «плохо» связанные сообщества, т.е. сообщества, которые не связаны внутренне. Во-вторых, данный алгоритм даёт лишь одну гарантию: разбиения на сообщества, вершины которых невозможно объединить в другие сообщества. Другими словами, он гарантирует, что сообщества хорошо разделены. Все данные недостатки были устранены в алгоритме Лейдена.

Данный алгоритм состоит из трех фаз (см. рис. 2):

5. Быстрое локальное перемещение узлов. В отличие от алгоритма Лувена, данный алгоритм не посещает все узлы до тех пор, пока они не перестанут перемещаться, тем самым посещая и те узлы, которые нельзя перемещать. В процедуре быстрого локального перемещения посещаются только узлы, окрестности которых изменились.

6. Уточнение разделения. На данном этапе алгоритм находит разбиение  $\mathcal{P}_{refined}$ , которое является уточнением разбиения  $\mathcal{P}$ , полученного на первом этапе алгоритма. В процессе уточнения происходит перемещение некоторых вершин, при этом целевое сообщество выбирается случайным образом из списка подходящих сообществ-кандидатов. Степень случайности выбора сообщества определяется параметром  $\theta > 0$ . Затем сообщества из  $\mathcal{P}$  могут быть разделены на подсообщества.

7. Агрегация сети. На этом этапе происходит агрегация графа с учётом уточнённого разбиения.

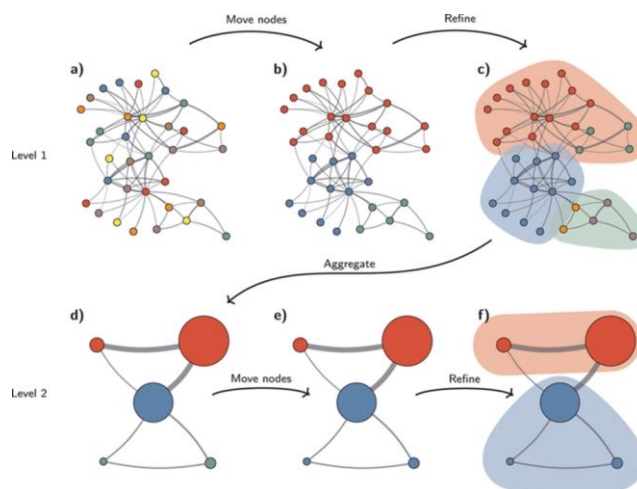


Рис. 2. Алгоритм Лейдена [1]

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА

Алгоритм был протестирован на нескольких данных. Первые данные, на которых был опробован алгоритм, представляют собой рекомендательную систему фильмов [2]. Здесь поиск сообществ играет огромную роль, поскольку он даёт возможность определить интересы пользователей, а также объединить фильмы в группы по каким-либо признакам, что позволяет в свою очередь подбирать правильные рекомендации.

Второй набор данных, на котором был использован алгоритм, содержат в себе взвешенную сеть взаимосвязей героев романа Виктора Гюго «Отверженные» [3]. Этот граф является примером простого социального взаимодействия людей, что является одной из самых популярных задач, где применяется алгоритм.

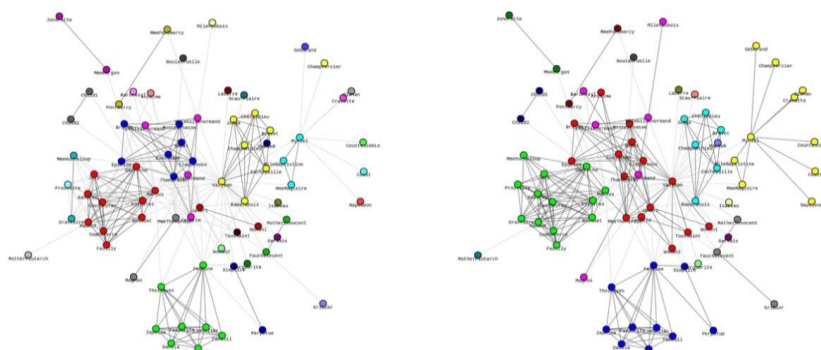


Рис. 3. Два варианта разбиения графа «Отверженные» на сообщества

Третий набор данных содержит сеть игр по американскому футболу между различными колледжами [3]. Его также можно рассматривать как граф социального взаимодействия.

Зависимость функции качества от параметра разрешения и степени случайности для всех трёх рассмотренных наборов данных представлена в таблице.

**Зависимость функции качества от параметра разрешения**

Фильмы		«Отверженные»			Футбол		
Параметр разрешения	Значение функции качества	Параметр разрешения	Степень случайности	Значение функции качества	Параметр разрешения	Степень случайности	Значение функции качества
1.0000	0.418	0.800	6	0.378	0.800	20	0.437
0.5000	0.598	0.800	5	0.396	0.800	5	0.412
0.0500	0.831	0.200	3	0.481	0.100	42	0.604
0.0100	0.891	0.200	7	0.489	0.400	7	0.571
0.0010	0.929	0.150	7	0.493	0.090	1	0.604
0.0005	0.936	0.110	1	0.526	0.020	42	0.400
0.0001	0.940	0.108	1	0.514	0.010	1	0.000

В результате тестирования были выявлены зависимости значений функции качества от параметра разрешения и степени случайности для разобранных примеров. Чем ниже параметр разрешения, тем выше качество разбиения. Было обнаружено также, что степень случайности незначительно влияет на качество разбиения.

#### Библиографические ссылки

1. *Traag V. A.* From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities / V. A. Traag, L. Waltman, N. j. van Eck // *Sci Rep* 9, 5233 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z.
2. Парсинг базы фильмов из IMDB. Сбор информации о фильмах и рекомендаций к ним / 2019. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://a-parser.com/resources/268/> – Дата доступа: 06.06.2022.
3. *Newman M.* Network data / 2013. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www-personal.umich.edu/~mejn/netdata/> — Дата доступа: 06.06.2022.

MEASUREMENT OF LIQUID COEFFICIENT OF VISCOSITY USING LIQUID SURFACE WAVE

Wei Heiyi

*Dalian University of Technology;*

*yuening@dlut.edu.cn;*

*supervisor – Zhao Yulin, PhD, associate professor*

**Abstract:** Surface waves are generated at the micron scale using disturbances of appropriate size. When the laser beam irradiates the liquid surface waves with different amplitudes, the optical effects of diffraction and reflection are observed respectively. On this basis, two methods, laser diffraction method and laser slope method, are proposed to measure the viscosity coefficient of liquid. This experiment takes water as an example. For the laser diffraction method, the relationship between the liquid viscosity coefficient and the liquid surface wave attenuation coefficient and wave number is theoretically derived. The experimental setup is given, and high visible diffraction patterns are observed on the screen. The attenuation curve of liquid surface wave is obtained by the relationship between diffraction fringes and surface wave. By studying the diffraction phenomenon of laser oblique incident surface wave, the viscosity coefficient of water is measured. For the laser slope method, the liquid viscosity coefficient is measured by studying the reflection of liquid surface wave with larger amplitude. Compared with capillary method and ball drop method, these two methods are real-time and non-contact for measuring low viscosity coefficient of liquid.

**Key words:** liquid Coefficient of Viscosity ; liquid Surface Wave ; light diffraction ; reflection of light ; attenuation coefficient

**INTRODUCTION**

Liquid viscosity coefficient is an important parameter to characterize the anti deformation ability of liquid. It has important applications in the fields of production, life, engineering and medicine. When the fluid flows under external force, there is shear stress between the fluid layers. The traditional measurement methods of viscosity coefficient include ball drop method and capillary method. However, because they are all contact measurement, the instrument is difficult to clean and restore. Therefore, the design idea of this experiment is to use a disturbance of appropriate size to make the liquid move, and then excite the surface wave of the liquid. As the surface wave propagates forward, the amplitude of the surface wave becomes weaker and weaker due to viscous resistance. The attenuation of liquid surface wave is studied by optical method, and the viscosity coefficient is obtained. On this basis, we pro-



pose two methods to measure the viscosity coefficient  $\eta$ . Key parameters in expressions  $\alpha$  and  $K$ : laser diffraction method and laser slope method. The relationship between the liquid viscosity coefficient and the optical effect on the liquid surface wave is systematically studied, and the measurement method and results are given. These two methods have the characteristics of real-time and non-contact.

## METHOD

### 2.1 Laser Diffraction Method

For liquid with small viscosity coefficient, when surface wave propagates, the change of surface wave frequency caused by hysteresis is small. For amplitude, as the distance increases, the amplitude of surface wave is:

$$A = A_0 e^{-\frac{2k^2\eta}{\rho v}x} \cos(\omega t - Kx), \text{ where } \alpha = \frac{2K^2\eta}{\rho \cdot v}$$

Note:  $A$  is amplitude,  $\eta$  is Coefficient of Viscosity,  $\alpha$  is the attenuation coefficient.

According to the dispersion relation of surface wave, the expression of liquid viscosity coefficient is derived.

$$\eta = \frac{\alpha \rho}{2K^2} \cdot \frac{g + \frac{3\sigma K^2}{\rho}}{2 \cdot (gK + \frac{\sigma K^3}{\rho})^{\frac{1}{2}}}$$

The intensity distribution of diffraction fringe is obtained by Fourier optics is

$$I(x') = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n^2(4\pi A \cos\theta / \lambda) \delta\left(\frac{x'}{\lambda z} - \frac{n}{\Lambda \cos\theta}\right)$$

For a given incident Angle  $\theta$  and laser wavelength  $\lambda$ , the intensity is  $A$  function of the surface wave amplitude  $A$ . The surface wave amplitude  $A$  can be calculated by the light intensity ratio of any first-order diffraction fringe to

zero-order diffraction spot .Since Delta function,the interval between adjacent diffraction fringes is  $d = z\lambda / \Lambda \cos \theta$  .

Finally, the key parameters will be calculated  $\alpha$  And K, the viscosity coefficient can be obtained.

The experiment set up is shown in JPG.1 Under the control of computer, the vibration source device generates vibration of specific frequency such as 140hz, which makes the water surface stir up stable concentric surface waves. The water tank and laser are placed on the shockproof platform . The tank is lined with black paper. Turn on the laser, obliquely incident the laser beam(He -- Ne laser,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) onto the liquid surface , and the incident point is a certain distance from the center of the vibration source. The incident angle is 1.436rad. Measure the distance between the incident light point and the observation screen to be 8.215m. Adjust the frequency and size of the vibration until a clear diffraction pattern appears on the screen. The intensity of each diffraction point is measured with a light intensity meter controlled by a single chip microcomputer. Change the position of the vibration source for many times, and repeat the above steps.

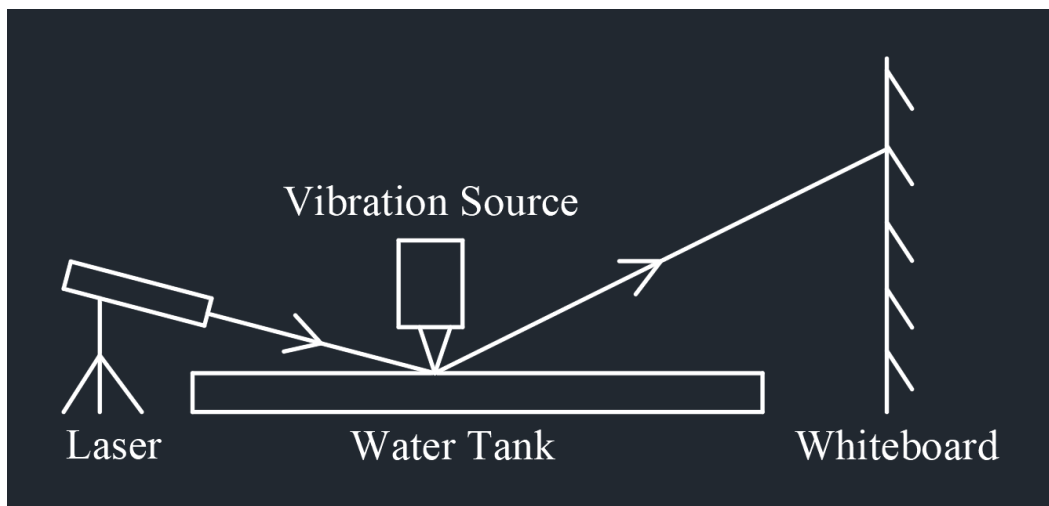


Fig. 1. The experiment set up of Laser Diffraction Method

## 2.2 Laser Slope Method

The amplitude expression for the surface wave specified displacement:

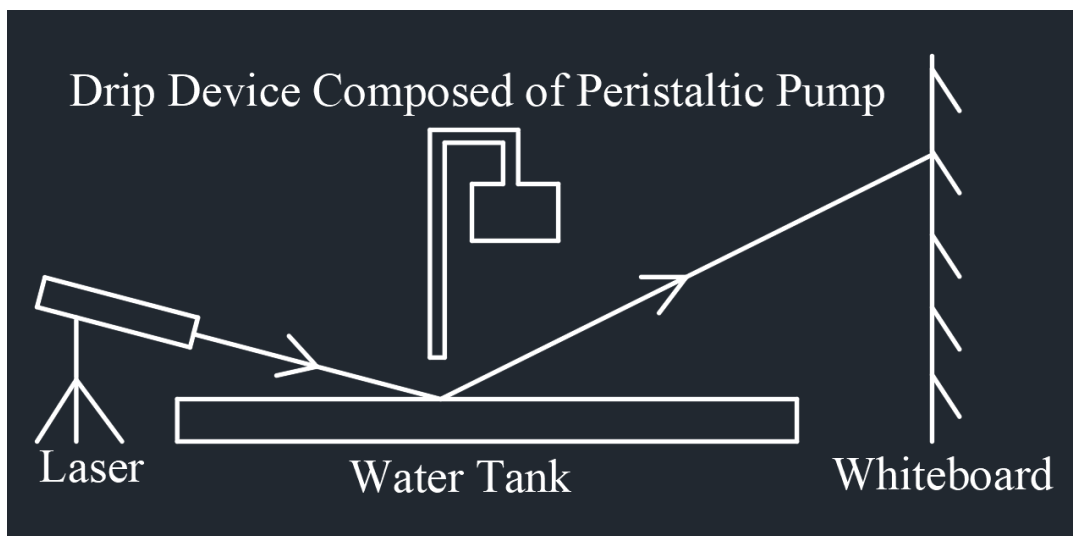
$$A = A_0 e^{-\frac{2K^2 \eta}{\rho v} x} \sin(Kx)$$

Taking the derivative with respect to A, we can get the slope at specified point :

$$A' = A_0(x_{Specify}) K \cos(Kx_{Specify})$$

When the surface wave amplitude is maximum at the incident point (maximum slope), slope is  $A_0K$ , which corresponds to the highest point of spot movement on the observation screen. In summary, the amplitude of the specified position was calculated, and the attenuation coefficient  $\alpha$  was obtained by the attenuation relationship between amplitude and displacement. Finally, the attenuation coefficient and wave vector are substituted into the formula of  $\eta$  to calculate the liquid viscosity coefficient.

The experiment set up is shown in *JPG.2*. The dripping device is controlled by a peristaltic pump, which arouses a series of concentric circles of micro-amplitude water surface waves. Turn on the laser and irradiate laser beam on the liquid surface, so that the reflected light spot is projected on the distant optical screen. Observe the phenomenon of light spot moving up and down with surface wave propagation. A long exposure camera is used to capture the moving track of the light spot, and the highest position of the light spot and the distance  $D$  between the incident point and the light screen are recorded to calculate the slope of the reflected light, so as to further obtain the viscosity coefficient.



*Fig. 2.* The experiment set up of Laser Slope Method

## RESULTS

### 3.1 Laser Diffraction Method

The spot intensity and fringe spacing of diffraction images obtained by laser diffraction method are shown in Table 1.

Table 1

the distance D Units: mm	Light Intensity Units:lx	$I_{-2}$	$I_{-1}$	$I_0$	$I_{+1}$	$I_{+2}$	The distance between the stripes Units:cm
25.0		315	750	407	735	30	2.00
30.0		81	620	968	640	99	2.00
35.0			364	$\frac{125}{1}$	371		2.00
40.0			124	$\frac{154}{7}$	151		2.00
45.0			78	$\frac{187}{9}$	57		2.00

Table1.The spot intensity and fringe spacing of diffraction image obtained by Laser Diffraction Method.

In this experiment, the distance between incident spot and observation screen is 8.2150m.The coefficient of viscosity is  $0.432 \times 10^{(-3)} \text{N*s/m}^2$ .

### 3.2 Laser Slope Method

The The horizontal distance between the vibration source and the light screen and the vertical distance between the highest point of the reflected light spot and the incident point obtained by laser diffraction method are shown in Table 2. In this experiment, the distance between incident spot and observation screen is 8.2150m.The coefficient of viscosity is  $1.414 \times 10^{(-3)} \text{N*s/m}^2$ .

Table2.The spot intensity and fringe spacing of diffraction image obtained by Laser Diffraction Method.

Table 2

Spot Spacing of Vibration Source	the Peak	Slope
70mm	130.60cm	0.0153
75mm	127.66cm	0.0135
80mm	124.66cm	0.0117
85mm	123.00cm	0.0107
90mm	122.00cm	0.0101

## CONCLUSION

The experiment combines optics and utilizes laser collimation to measure the viscosity coefficient of liquid in the attenuation phenomenon of liquid surface wave. At the same time, the measurement of some parameters provides two different measurement schemes. The idea is novel, the principle is clear and reliable, the measurement method is simple and convenient, the measurement results are relatively accurate, the experimental cost is relatively low, and the experimental results can be obtained in real time and without contact.

## References

1. NI Hong-cheng , LIN Jin-da , WANG Si-hui , ZHOU Jin , ZHOU Hui-jun · The property of surface waves of water studied by diffraction of light · Department of Physics, 26 (10)
2. Ma Haiqian, Chen Buyun, Chen Xin, Liu Kangxin · Measurement of water wave velocity and investigation of dispersion caused by the change of water wave with depth, Shanghai Jiaotong University.

# **SURFACE WAVEGUIDE MODE RESONANCE TECHNOLOGY BASED ON OPTICAL FIBER**

**Feng Baozhang, Mao Xingyu, Du Yiyang**

*DUT-BSU Joint Institute Dalian University of Technology;*

*baozhang@dlut.edu.cn;*

*Zhang Yang, Doctor of Science, professor*

Surface waveguide resonance mode is a new form of surface optical waveguide-matter interaction that has emerged in recent years, with unique manipulable properties and extremely high sensitivity, which has very great potential for surface optical field manipulation and light-matter interaction analysis. Tilted fiber Bragg grating (TFBG), due to the introduction of a small inclination angle in the fiber, allows the forward transmitted core mode to be coupled with the reverse transmitted core mode, cladding mode and radiation mode, forming a complete resonant envelope with a narrow spectral bandwidth, high sensitivity and high resolution. Surface plasmon resonance (SPR) and lossy mode resonance (LMR) are two unique physical mechanisms for the interaction of light with nanofilms of materials with different dielectric constants. Compared with SPR, lossy mode resonance (LMR) combines metal oxide and polymer films with optical fiber and has some remarkable features and advantages such as wide selection of materials, high sensitivity, and easy tuning. This project intends to coat different metal oxide films as well as polymer films on the surface of TFBG fiber based on tilted fiber grating to produce LMR phenomena on the surface of TFBG fiber as a basis for the design of various physical and chemical sensors.

**Key Words:** tilted fiber bragg gratings (TFBG); surface plasmon resonance (SPR); loss mode resonance (LMR); physical and chemical sensors.

## **INTRODUCTION**

Fiber Bragg grating (FBG) has only one strong resonance  $\lambda_B$  (Bragg resonance) with the longest wavelength. The single-core guided mode has the largest effective refractive index. While TFBG cladding mode resonance is enhanced, Bragg resonance is weakened [1]. The ghost mode is composed of the superposition of several lower cladding modes, which is closest to  $\lambda_B$  and usually stronger than its adjacent cladding mode on the short wavelength side, and has many characteristics of Bragg resonance. TFBG formed cladding mode envelope fault near 1530nm and changed from guiding cladding mode to leaking cladding mode. See Figure 1. The reason is that after the grating is tilted, light can be coupled from the fiber core to a large subset of fiber cladding guide modes and cladding leakage modes[2].

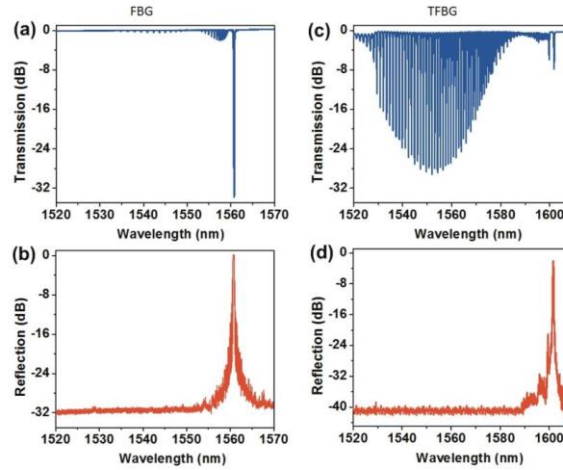


Fig. 1. Measured power transmission and reflection spectra for FBG and TFBG

- (a) FBG transmission (b) TFBG transmission  
(c) FBG reflection (d) TFBG reflection

For the lossy mode resonance, the loss mode is formed by destroying the total reflection of the interface through the high refractive index dielectric layer. When the propagation constant of the lossy-mode is equal to that of the waveguide mode for certain incident angles of some wavelengths, resonance will be formed, so that most of the energy enters the lossy-mode and cannot be transferred to the other end, and resonance valleys will be detected on the spectrum. The propagation constant of the loss mode is related to the refractive index of the object to be measured, so the resonance valley in the spectrum will move with the change of the object to be measured.

The real part of the dielectric constant of LMR coating is positive and much larger than its imaginary part and the real part of the external environment. This requires that the dielectric constant of the coating material have a fairly large real part and a fairly small (but not zero) imaginary part [3].

Compared to traditional SPR technology, LMR has the advantages of higher sensitivity, better resolution and easier control. And the coating material of LMR is metal oxide or polymer, compared with the coating material of SPR, metal, its cost is lower, more widely used.

## METHODS

### 2.1 Transmission matrix simulation

The transmission matrix is a method used to calculate the propagation of light in multilayer films. In this method, electromagnetic fields at different positions are linked by transmission matrix [4]. For LMR sensors, the reflectivity  $R(\theta, \lambda)$  of unpolarized light can be calculated by using n-layer reflection matrix method, and then the position of resonance absorption peak can be cal-

culated. Therefore, we can change the surrounding refractive index  $n$ , incident angle  $\theta$ , incident wavelength  $\lambda$ , film thickness  $d$  and other parameters to find the best parameters of the experimental design of spectral determination, and prepare for the subsequent experiments. We tried to generate the LMR resonance peak at 1550 nm communication band, reduce the width of the resonance peak of LMR, improve the sensitivity of LMR, and produce a higher sensitivity optical fiber sensing equipment. The transmission matrix structure is shown in Figure 2.

## 2.2 Spectroscopic experiment

According to the simulation results, the optimal band of LMR is between 1510nm and 1610nm. In order to simulate different detection environments, we first configured external solutions with different concentrations and made them have different refractive indexes (1.3350-1.3650). After that, the bare optical fiber was coated with ITO film by magnetron sputtering coater, which was welded together with ordinary optical fiber and connected with laser source, polarization controller and spectrometer. Then, the ITO coated optical fiber segment was immersed in the solution successively, and the polarization controller was adjusted to observe the influence of different refractive index on the different polarization states of the LMR phenomenon. The spectrum obtained are shown in Figure 3.

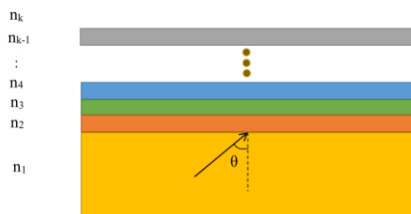


Fig. 2. The transmission matrix structure

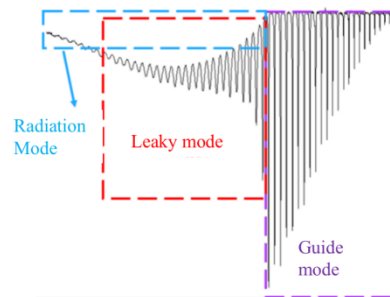


Fig. 3. The wave guide mode spectrum

## RESULTS

### 3.1 Transmission matrix stimulation

For three layer transmission structure, silicon dioxide as the fiber core, ITO film as cladding, film thickness of 400 nm, is simulated in the environment of water, as shown in Figure 4, red curve for the TM waves, blue curve for TE waves, TE a TM formant deeper, resonance wavelength is bigger, the first-order (wide absorption peak, The resonance wavelength is near 1365nm, and the TE and TM modes are close.



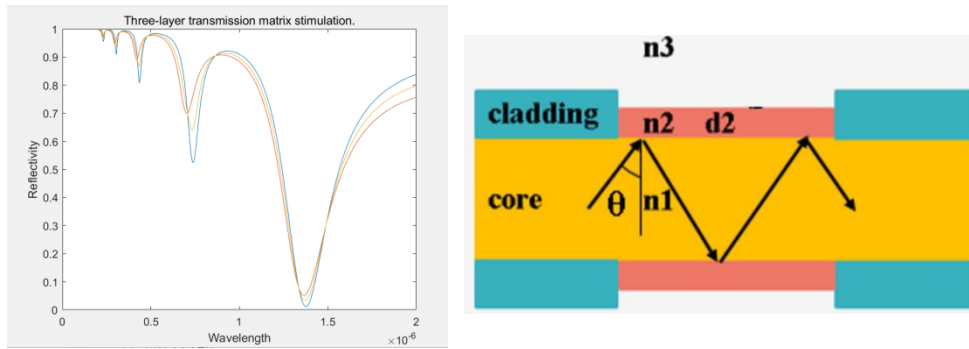


Fig. 4. The three-layer stimulation result and structure diagram

For four-layer structure, i.e. the double-film structure, we simulated the TiO<sub>2</sub>+ITO double-film structure and exchanged coating sequence of the inner and outer film material. We found that different sequence of coating generates different lossy mode.

### 3.2 Spectroscopic experiment

According to the situation, we measured the LMR phenomenon of optical fibers coated with ITO films of different thickness in different external solutions, and the refractive index change was 1.335-1.365, and the refractive index change was 0.005. Figure 5 shows the spectrum variation with refractive index when ITO thickness is 120nm.

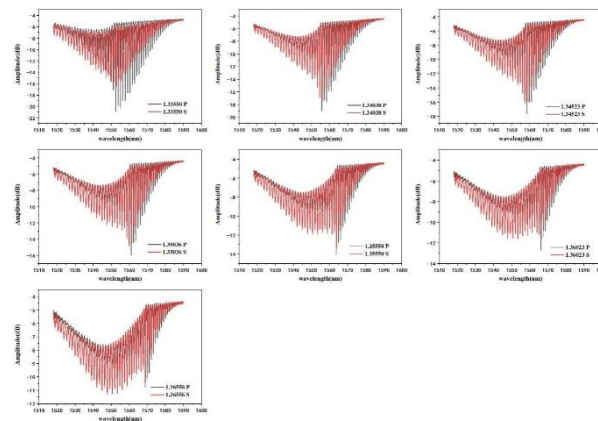


Fig. 5. Experimental spectra of refractive index variation at 120 nm thickness

According to the experimental data, as the external refractive index increases, the resonance peak gradually moves to the long wavelength direction, and the resonance spectral intensity of the guided mode part shows a compression trend. Since the corresponding solution of the radiation mode pair is a continuous solution, the concave envelope surface at the top of the spectrum is the resonance envelope formed by all the radiation modes. It can be ob-

served that with the increase of external refractive index, the resonance peak of the radiation mode also shows a trend of gradual increase. And the resonance intensity is also different for the LMR of different polarization states. The S-state LMR is generally stronger than the P-state LMR. It is also found that with the increase of refractive index, the LMR formant of the S-polarization state is enhanced, while the formant of the P-polarization state is almost unchanged, which makes the S-polarization state have higher sensitivity.

We also repeated the above experiments for ITO with different thicknesses. LMR spectra of S polarization state under different thicknesses were obtained when refractive index was 1.365, as shown in Figure 6:

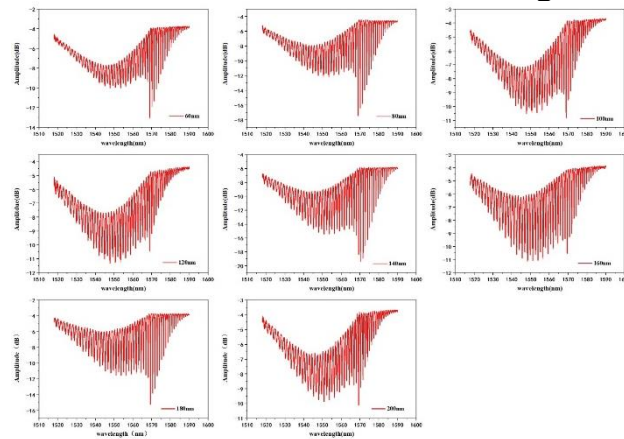


Fig. 6. Experimental spectra of ITO with different thicknesses at 1.365 refractive index

## CONCLUSIONS

The TFBG-LMR optical fiber sensing system and the simulation of multilayer waveguides has been studied. Based on the transmission matrix stimulation, we simulated multilayer waveguides with different coating materials, coating thickness and incident Angle and the parameters of the fiber sensing structure are optimized to meet the experimental requirements. According to the simulation and experimental data, it can be seen that increasing the film thickness leads to multi-order LMR, while decreasing the film thickness leads to the absorption peak moving to the direction of smaller wavelength and narrowing the absorption peak. In addition, the experimental results show that the formant peak is deeper and the LMR phenomenon is better and the resolution is higher in the external solution with lower refractive index.

## References

1. J. Andreas Ioannou, Antreas Theodosiou, Christophe Caucheteur, Kyriacos Kalli, 'Femtosecond Laser Inscribed Tilted Gratings for Leaky Mode Excitation in Optical

Fibers', I JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 38, NO. 7, APRIL 1, 2020.

2. Jacques Albert, Li-Yang Shao, and Christophe Caucheteur, 'Tilted Fiber Bragg Grating Sensors', Laser Photonics Rev., 1-26(2012)/ DOI 10.1002/Ipor.201100039.
3. J. Qi Wang, Wan-Ming Zhao, 'A comprehensive review of lossy mode resonance-based fiber optic sensors', Optics and Lasers in Engineering 100 (2018) 47-60.
4. J. Francesco Chiavaioli, Davide Janner, 'Fiber Optics Sensing With Lossy Mode Resonances: Applications and Perspectives', Journal of Lightwave Technology, JLT-27145-2020, 09-Nov-2020.

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОИЗВОДНОГО РОДАМИНА Б ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ

**Н. В. Лабода**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*nikolaj.laboda@gmail.com;*

*науч. рук. – Н. В. Белько, канд. физ.-мат. наук;*

*Л. С. Ляшенко, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства красителя FD1, ацил-гидразона родамина Б, в присутствии ионов  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  и кислой среде в водно-ацетонитрильном, водно-ацетонном и водно-этанольном растворах. Отклик FD1 на ионы  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  и  $H^+$  качественно аналогичен. В присутствии перечисленных ионов в спектрах поглощения и флуоресценции растворов красителя появляются полосы при 560 нм и 588 нм соответственно. Оптическая плотность при 560 нм с течением времени снижается во всех растворах, кроме водно-ацетонных. Появление полос поглощения и флуоресценции красителя FD1 в видимой области связано с протонированием в результате понижения pH. Снижение оптической плотности красителя со временем объясняется его гидролизом в кислой среде с образованием гидразида родамина Б и ацетона. Избыток ацетона ингибирует эту реакцию, поэтому в водно-ацетонных растворах краситель проявляет стабильность. Краситель FD1 может рассматриваться в качестве сенсора ионов металлов и использоваться, в частности, для детектирования коррозии.

**Ключевые слова:** родамин Б, флуоресцентный сенсор, ионы железа (III).

## ВВЕДЕНИЕ

Флуоресцентные сенсоры используются для детектирования многих веществ [1–4]. Они способны обеспечить большую избирательность и чувствительность обнаружения, просты в применении.

Ионы металлов способны оказывать большее влияние на окружающую среду и организм человека [5,6]. Также большую практическую значимость обнаружение ионов металлов имеет в диагностике ранних стадий коррозии металлов [7,8]. Производные родаминов могут использоваться для детектирования многих ионов металлов [9–11]. В частности, гидразид родамина Б является спироциклическим соединением и часто используется для разработки сенсоров ионов металлов [9, 12].

В данной работе исследуются спектрально-люминесцентные свойства красителя FD1, спироциклического производного родамина Б, в присутствии ионов  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  и кислой среде в различных растворителях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Краситель FD1 является ацил-гидразоном родамина Б. Его растворы концентрации 25 мкмоль/л приготавливали в смеси вода-ацетонитрил, вода-ацетон и вода-этанол в соотношении жидкостей 1:1. В них добавляли ионы  $\text{Fe}^{3+}$  в виде водного раствора  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ионы  $\text{Al}^{3+}$  – водного раствора  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  и ионы  $\text{H}^+$  – водного раствора  $\text{HCl}$ . Концентрацию ионов в растворах FD1 варьировали от 0,25 до 250 мкмоль/л.

Спектры поглощения растворов регистрировали в сантиметровых кварцевых кюветах при помощи спектрофотометра SOLAR PV1251 спустя одинаковый промежуток времени после приготовления. Спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции регистрировали с помощью спектрофлуориметра SPEX Fluorolog.

### ВЛИЯНИЕ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ И ВОДОРОДА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРАСИТЕЛЯ

Без добавления ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в видимой области спектров поглощения водно-ацетонитрильного, водно-ацетонного и водно-этанольного растворов FD1 отсутствуют полосы поглощения, поглощение имеется лишь в ультрафиолетовой области.

При добавлении ионов железа растворы приобретают видимую глазом малиновую окраску. В спектрах поглощения появляется полоса при 560 нм. С увеличением концентрации ионов ее интенсивность возрастает во всех использованных растворителях. При определенной концентрации ионов металла оптическая плотность при 560 нм достигает насыщения.

В спектре флуоресценции растворов FD1 после добавления ионов железа появляется полоса при 588 нм. Она зеркально симметрична возникшей полосе поглощения. Спектр возбуждения с регистрацией на 620 нм хорошо совпадает с полосой поглощения, что говорит о присутствии в растворе только одного типа центров, которым и соответствует данная полоса поглощения.

Форма спектров поглощения FD1 в присутствии  $\text{Fe}^{3+}$  практически не зависит от выбора растворителя. Сдвиг спектров незначителен, порядка 1 нм. Следовательно, на сольватацию молекул красителя большее влияние оказывает именно вода.

С течением времени после приготовления оптическая плотность при 560 нм убывает для водно-этанольных и водно-ацетонитрильных растворов. Стабильность краситель проявляет только в водно-ацетонном растворе.

Ионы  $\text{Fe}^{3+}$  могут быть достоверно обнаружены по изменению спектра поглощения FD1 при концентрации ионов 3 мкмоль/л и спектра флуоресценции – 0,3 мкмоль/л. Дальнейшее понижение концентрации

ионов железа нецелесообразно, поскольку при этом отклик красителя на примеси становится сравнимым с откликом на добавленные ионы железа.

Отклик красителя на ионы  $Al^{3+}$  и  $H^+$  качественно аналогичен отклику на ионы  $Fe^{3+}$ . В их присутствии в спектрах поглощения и флуоресценции водно-ацетонитрильных, водно-ацетонных и водно-этанольных растворов FD1 также появляются полосы при 560 и 588 нм соответственно.

Известно о ионах металлов, которые не влияют на спектр FD1, а именно ионы  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ .

### МЕХАНИЗМ ОКРАШИВАНИЯ КРАСИТЕЛЯ

Появление полос поглощения и флуоресценции красителя FD1 в видимой области связано с появлением более протяженной системы сопряженных двойных связей. При протонировании происходит раскрытие спиролактамового цикла и перераспределение двойных связей, атом азота при ксантеновом остатке приобретает положительный заряд. Такое перераспределение электронной плотности способствует делокализации электронов по всему хромофору, вследствие чего возникает поглощение и флуоресценция в видимой области. Ионы железа или алюминия понижают pH водных растворов посредством гидролиза. Ионы  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  слабо меняют pH раствора, поэтому их добавление не приводит к изменению в спектре красителя.

Снижение оптической плотности красителя со временем можно объяснить гидролизом в кислой среде связи  $C=N$  в молекуле красителя, в результате которого образуется гидразид родамина Б и ацетон. Избыток ацетона ингибирует эту реакцию, поэтому в водно-ацетонных растворах краситель проявляет стабильность.

Чистый гидразид родамина Б не обладает поглощением и флуоресценцией в видимой области, как и FD1. При добавлении ионов  $H^+$  в растворы гидразида родамина Б наблюдается полоса поглощения при 562 нм, но на порядок слабее полосы в спектрах растворов FD1 с такой же концентрацией красителя и ионов  $H^+$ . Добавление ацетона в раствор гидразида родамина Б, содержащего избыток ионов  $H^+$ , приводит к постепенному возрастанию оптической плотности при 562 нм, что вызвано образованием FD1 из гидразида родамина Б и ацетона в кислой среде.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В спектрах поглощения и флуоресценции красителя FD1, являющегося производным родамина Б, в водно-ацетонитрильных,

водно-ацетонных и водно-этанольных растворах при добавлении ионов  $\text{Fe}^{3+}$  появляются полосы при 560 нм и 588 нм соответственно. Предел детектирования ионов  $\text{Fe}^{3+}$  составляет 3 мкмоль/л по спектрам поглощения и 0,3 мкмоль/л по спектрам флуоресценции.

Также к подобному изменению спектральных свойств красителя приводят добавление ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{H}^+$ .

Возникновение полос поглощения и флуоресценции в видимой области является следствием протонирования молекул красителя. Присутствие ионов  $\text{Fe}^{3+}$  или  $\text{Al}^{3+}$  в растворах FD1 способствует понижению рН и, как следствие, протонированию.

Краситель FD1 может рассматриваться в качестве сенсора ионов металлов и использоваться, в частности, для детектирования коррозии.

### Библиографические ссылки

1. Heyne, B. Mechanistic studies of fluorescent sensors for the detection of reactive oxygen species / B. Heyne, S. Ahmed, J. C. Scaiano // *Org. Biomol. Chem.* – 2008. – V. 6, No 2. – P. 354–358.
2. A near-infrared fluorescent sensor for selective detection of cysteine and its application in live cell imaging / Y.-S. Guan [et al.] // *RSC Adv.* – 2014. – V. 4, No 16. – P. 8360–8364.
3. A new terthiophene derivative as a fluorescent sensor for protein detection / J. Hu [et al.] // *Journal of Luminescence.* – 2016. – V. 173. – P. 57–65.
4. Carter, K. P. Fluorescent Sensors for Measuring Metal Ions in Living Systems / K. P. Carter, A. M. Young, A. E. Palmer // *Chem. Rev.* – 2014. – V. 114, No 8. – P. 4564–4601.
5. Fluorescent Sensors for the Detection of Heavy Metal Ions in Aqueous Media / N. D. Acha, C. Elosua, J. M. Corres, F. J. Arregui // *Sensors.* – 2019. – V. 19, No 3.
6. Luminescence investigation of Fe (III)-rhodamine B complexes obtained by solvent extraction / R. Czoik [et al.] // *J. lumin.* – 2013. – Vol. 139. – P. 35–39.
7. Augustyniak, A. Early detection of steel corrosion via “turn-on” fluorescence in smart epoxy coatings / A. Augustyniak, J. Tsavalas, W. Ming // *ACS appl. mater.interfaces.* – 2009. – Vol. 1, №. 11. – P. 2618–2623.
8. Intelligent anti-corrosion and corrosion detection coatings based on layered supramolecules intercalated by fluorescent off-on probes / J. Lv [et al.] // *J. of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* – 2021. – Vol. 118. – P. 309–324.
9. A novel rhodamine B-based “off-on” fluorescent sensor for selective recognition of copper (II) ions / Y. Jiao [et al.] // *Talanta.* – 2018. – V. 184. – P. 143–148.
10. Rhodamine-based fluorescent sensor for mercury in buffer solution and living cells / H.-H. Wang [et al.] // *Dyes and Pigments.* – 2011. – V. 91, No 3. – P. 350–355.
11. Rhodamine-aminopyridine based fluorescent sensors for  $\text{Fe}^{3+}$  in water: Synthesis, quantum chemical interpretation and living cell application / F. Yan [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical.* – 2015. – V. 215. – P. 598–606.
12. Kim H. N. et al. A new trend in rhodamine-based chemosensors: application of spiro-lactam ring-opening to sensing ions // *Chemical Society Reviews.* – 2008. – T. 37. – №. 8. – C. 1465-1472.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НЕЙРОНОВ СРЕЗОВ ГИПОКАМПА *IN VITRO* ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УСЛОВИЙ РЕГИСТРАЦИИ

Г. С. Мазго

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*bylehka@yandex.ru*;

науч. рук. - А. А. Денисов, канд. биол. наук

Целью работы являлось исследование функционирования срезов гиппокампа при различных режимах работы специализированной проточной регистрационной камеры. Проведен анализ существующих подходов к обеспечению стабильности функционирования нервной ткани при экспериментальной работе *in vitro*. Установлены параметры скорости и температуры перфузионного потока искусственной спинномозговой жидкости, обеспечивающие стабильность электрической активности с сохранением оптимальных условий функционирования срезов.

**Ключевые слова:** активность нейронов, срезы гиппокампа, перфузия, температура, электрофизиологические исследования, регистрационная камера.

## ВВЕДЕНИЕ

Человеческий мозг является наиболее сложноорганизованной биологической системой, при этом нервная ткань характеризуется и наиболее высоким энергопотреблением. Человеческий мозг, составляя всего около 2 процентов от общей массы тела, потребляет около 20 процентов кислорода из кровотока. Для обеспечения эффективного транспорта в мозге присутствует развитая сеть кровеносных сосудов. При проведении экспериментов со срезами ткани мозга *in vitro* требуется поддержание надлежащего уровня кислорода и питательных веществ без помощи внутренней сосудистой системы, что является сложной задачей, так как транспорт в таком случае осуществляется только за счет диффузии.

На сегодняшний день разработаны различные конструкции регистрационных камер, позволяющие обеспечить стабильный транспорт кислорода и питательных веществ, а также производить тонкий контроль локальной нейрохимической среды и возможность применения современных микроскопических и электрофизиологических методов [1]. Помимо жидкостных камер различных конфигураций, в которых срез со всех сторон омывается раствором, существуют интерфейсные, где срез закрепляется на границе раздела газа и жидкости, так как из газовой фазы кислород поступает более



эффективно. Для улучшения обмена в некоторых конструкциях используется набор полых микроигл, которые создают каналы для непосредственного введения раствора во внутренние слои среза мозга. Они позволяют раствору не просто омывать срез, а частично идти сквозь него. Также современные камеры могут включать элементы микрофлюидики, которые позволяют не просто обеспечить эффективный транспорт, но и локально контролировать состав среды на определенных участках среза.

При разработке регистрационной камеры возникает вопрос об оптимальных характеристиках перфузионного потока, при которых обеспечиваются оптимальные условия проведения экспериментальной работы. На функционирование нейронов влияет не только скорость перфузионного потока, влияющая на эффективность переноса кислорода, но и температура. Ее снижение уменьшает потребность нейронов в кислороде, однако при этом может влиять на различные биофизические и физиологические процессы – варьирование температуры изменяет вероятности высвобождения везикул с нейромедиаторами, меняет пассивные и активные свойства мембраны, влияет на работу ионных каналов [2].

Целью данной работы являлось исследование функционирования срезов гиппокампа при различных режимах работы проточной регистрационной камеры, разработанной на кафедре биофизики в составе научно-учебного комплекса для исследования механизмов нейросетевых и когнитивных процессов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регистрация электрической активности проводилась в срезах гиппокампа толщиной 500 мкм 4-недельных крыс с применением научно-учебного комплекса для исследования механизмов нейросетевых и когнитивных процессов. Срез помещали в регистрационную камеру с элементами обеспечения стабильности скорости перфузионного потока искусственной спинномозговой жидкости (рисунок 1а). Стимулирующий электрод помещали в области коллатералей Шаффера, а регистрирующие электроды в *stratum radiatum* (регистрация возбуждающих постсинаптических потенциалов, ВПСП) и *stratum pyramidale* (регистрация популяционных спайков, ПС), как показано на рисунке 1б. Интервал между импульсами стимуляции составлял 20 с. амплитуда 20-30 мкА, частота – 0,05 Гц, длительность стимула – 0,2 мс. Параметры стимулирующих импульсов и перфузионного потока задавались при помощи программного обеспечения.

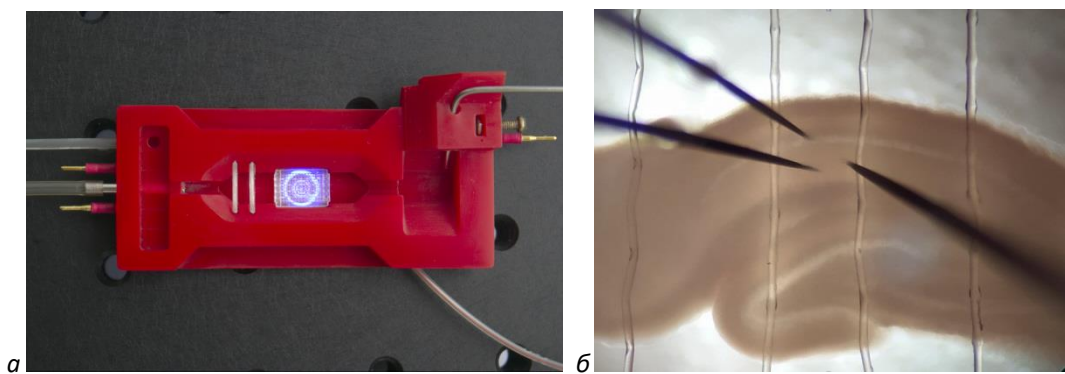


Рис. 1. Регистрационная камера (а) и размещение среза гиппокампа в камере (б)

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения влияния характеристик перфузионного потока на функционирование нейронов срезов гиппокампа был проведен ряд экспериментов с изменением скорости перфузии и температуры. В первом случае с помощью системы управления насосом скорость потока раствора менялась через каждые 10 минут и регистрировалась амплитуда ВПСП и ПС. Пример полученных зависимостей представлен на графике на рисунке 2. Во втором случае посредством системы термостабилизации каждые 10 минут температура менялась от 24 до 29 градусов, а затем в обратном порядке, и регистрировалось влияние на амплитуду получаемых ответов. Пример полученных зависимостей представлен на графике на рисунке 3.

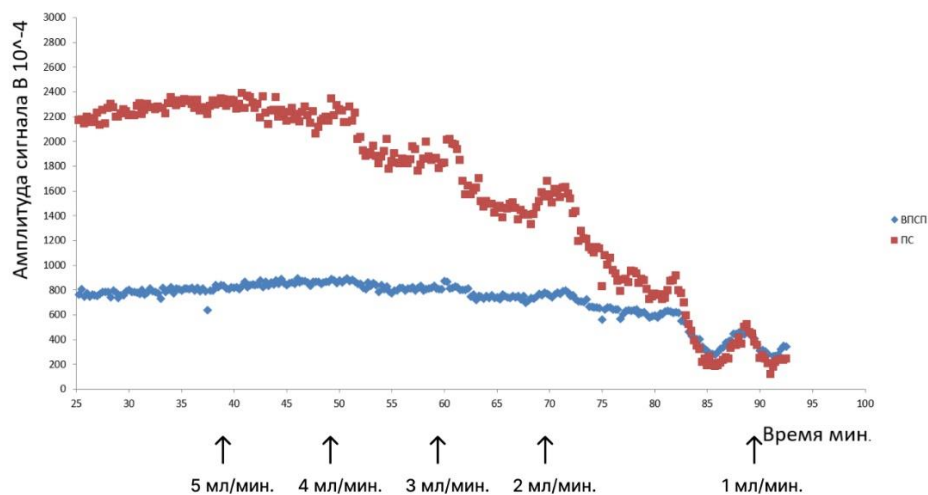


Рис. 2. Зависимость амплитуды ответов от скорости перфузии

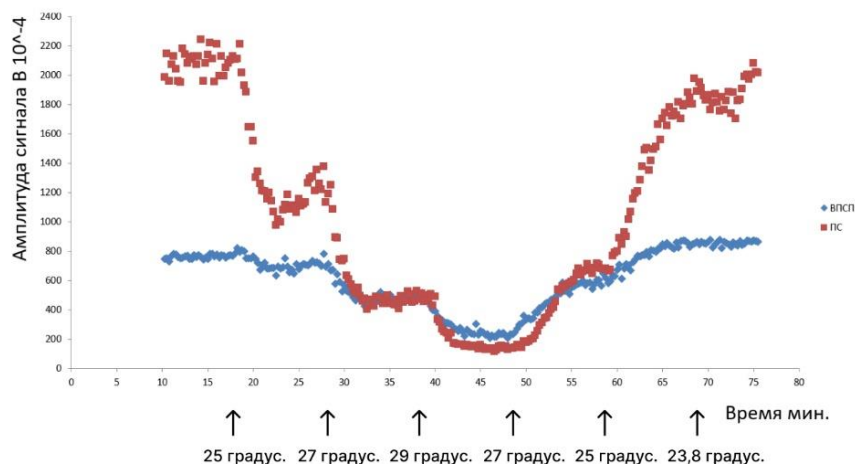


Рис. 3. Зависимость амплитуды ответов от температуры

Как следует из полученных зависимостей, снижение скорости перфузии сопровождается снижением амплитуды ответов на стимуляцию вследствие снижения поступления кислорода в ткань среза и активации защитных механизмов. Восстановление скорости перфузии приводит к восстановлению и дальнейшему возрастанию амплитуд ответов выше начального уровня, вероятно, из-за адаптации нервной ткани к низкому уровню кислорода

Оптимальной скоростью перфузии является 4 мл./мин. Снижение скорости перфузии приводит к нерациональному расходу раствора, снижение – к существенному понижению амплитуды ответов.

Увеличение температуры раствора сопровождается снижением амплитуды ответов из-за увеличения потребления кислорода нервной тканью. Последующее снижение температуры приводит к восстановлению амплитуды ответов. Оптимальной температурой является 27-28 °С, дальнейшее увеличение температуры может приводить к нестабильности амплитуд ответов из-за недостаточного поступления кислорода по диффузионному механизму при его повышенном расходе. Возможна модификация конструкции регистрационной камеры с целью фиксации среза набегающим потоком раствора.

#### Библиографические ссылки

1. Huang Y, Williams JC, Johnson SM // Brain slice on a chip: opportunities and challenges of applying microfluidic technology to intact tissues / Lab Chip. – 2012. – N12. P. – 2103-2117.
2. Van Hook MJ. // Temperature effects on synaptic transmission and neuronal function in the visual thalamus / PLoS One. – 2020. – V.15, N.4. – e0232451.

# SINGLE AND DOUBLE-PULSE LASER EXCITATION OF EMISSION SPECTRA OF ATOMS

**Y.I. Matyush**

*Belarusian State University, Minsk;*

*matyana@tut.by;*

*Scientific supervisor – K.F. Ermalitskaia, associate professor*

Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) is one of the most common types of atomic element analysis, which is widely used both for the analysis of industrial facilities and for the study of biological samples, art objects and artifacts. Due to the expressiveness, the absence of the need for mechanical and chemical sample preparation, minimal destruction of the surface, high sensitivity LIBS has proven itself for studying concentrations of various types of substances (metals, semiconductors, dielectrics) in various aggregate states. However, most of the scientific publications are devoted to the determination of metal concentrations both in multicomponent alloys and as trace elements in a non-metallic base (tablets, so-called "heavy metals" in biological objects and polymers). The purpose of the work was to investigate the effect of laser radiation parameters on the excitation of atomic and ion lines in the emission spectra of metals and multicomponent alloys during single-pulse and double-pulse laser ablation of metals and alloys. As a result, the optimal values of the inter-pulse intervals between the double laser pulses, providing the maximum value of the relative intensity of spectral lines at a constant total energy and power of laser radiation for zinc, copper and lead were determined.

**Key words:** laser ablation, double laser pulses, laser induced breakdown spectroscopy, ablative plasma, laser excitation.

## INTRODUCTION

Laser induced breakdown spectroscopy is a technology for rapid qualitative and quantitative analysis of objects that uses a short laser pulse to create microplasma on the surface of a sample. A significant number of theoretical and experimental works are devoted to laser ablation [1, 2, 3, 4, 5], the main purpose of which was to detect the relationship between the parameters of laser radiation (duration, wavelength, energy radiation, flux density), the thermophysical characteristics of the sample (thermal conductivity, heat capacity, absorption coefficient of optical radiation, heat of melting, evaporation and boiling); the state of the surrounding atmosphere and the amount of vaporized substance.

## FORMATION OF ABLATIVE PLASMA AS A RESULT OF THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH A SOLID

To determine the mechanisms of initiation of ablative plasma by laser radiation, it is necessary to know the aggregate state of the substance under study [1, 3, 5].

To determine the mechanisms of ablation of the substance and the formation of erosive plasma, the radiation flux density  $q$  is used. For densities  $q=10^4$  W/cm<sup>2</sup>, the destruction of the surface is mainly associated with melting – a significant part of the pulse energy is absorbed and propagated deep into the sample. At high densities of radiation fluxes, the role of evaporation processes from the surface increases and at  $q=10^6$  W/cm<sup>2</sup> they prevail over thermal conductivity [6].

Ablation of solid samples by radiation with  $q \leq 10^8$ - $10^9$  W/cm<sup>2</sup> is described in the framework of the thermal ablation model using the advanced evaporation model [4] in the approximation that the energy of the laser pulse goes to the formation of a low-temperature ( $T \sim 10^4$  K) plasma.

During ablation of solids by radiation with a flux density  $q \geq 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>, the substance leaves the surface not only due to surface evaporation, but also emission from the sample volume; in this case, hydrodynamic equations are used to describe plasma initiation processes [4]. In this case, the substance enters the erosion torch, both in the form of individual atoms and liquid droplets, the size of which increases by the end of the pulse due to an increase in the thickness of the melt on the sample surface.

## DOUBLE-PULSE LIBS

In many cases laser induced breakdown spectroscopy is the preferable method of qualitative and quantitative analysis of substances, which is due to the peculiarities of the interaction of laser radiation with the sample and the accompanying ablative plasma [1, 2, 3]. The advantages of LIBS include: expressiveness; the possibility of remote examination of objects; analysis of samples in liquid, solid and gaseous state; high sensitivity in determining the concentration of elements (up to  $10^{-3}\%$ ), which is detected with difficulty by other methods of atomic emission analysis; absence of preliminary mechanical and chemical preparation of samples. The last feature is due to the fact that the ablation of matter and the excitation of atoms occur in the same region – the focus point of the laser beam. Due to the high radiation flux density ( $q \sim 10^8$ - $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>), the evaporation process is independent of the physico-chemical properties of the sample, which allows the analysis of conductors, dielectrics, semiconductors and porous materials [1, 2].

One of the fastest developing areas of LIBS is double-pulse laser induced breakdown spectroscopy, in which double laser pulses shifted relative to each other in time are used as a source of excitation of emission spectra [3, 4, 5]. As compared with a single-pulse excitation this method allows to increase the analytical signal significantly and as a result, reduce the error of the analysis.

The development of the double-pulse LIBS method is carried out in three main directions related to the use of various spatial combinations of double pulses [1]: orthogonal, a scheme with a preablative laser spark and collinear. The most common configuration of double laser pulses at double-pulse LIBS is collinear – due to the relative simplicity of its technical implementation and the possibility of analyzing a wide class of objects, including remote ones. Double laser pulses are used in the analysis of solid and liquid samples, including aqueous solutions, used engine oil [7]. The independence of the ablation process from the physicochemical properties of the sample, as well as a significant increase in the intensity of spectral lines of even difficult-to-detect elements, allows the double-pulse LIBS method to determine the concentration of components of such objects, direct quantitative study of which by other methods of atomic emission spectrometry is impossible. Of particular interest is the use of double pulses for the study of multicomponent alloys used in industrial production: steels, brasses, bronzes [8].

#### **EXPERIMENTAL STUDY OF SINGLE-PULSE AND DOUBLE-PULSE LASER EXCITATION OF EMISSION SPECTRA OF ATOMS DURING ABLATION BY NANOSECOND PULSES OF METALS AND ALLOYS**

During the experiment the spectra of the zinc, copper and lead atoms were recorded both in pure form and in the composition of brass at different interpulse time intervals ( $\Delta t = 0, 1, \dots, 15 \mu\text{s}$ ). Figures 1 and 2 show the spectra of the zinc atom at  $\Delta t=0\mu\text{s}$  and  $\Delta t=1 \mu\text{s}$ .

For the zinc atom the intensity of the lines increases and at  $\Delta t=10 \mu\text{s}$  a maximum is observed (Figure 3): the intensity increases by 2 times compared to the initial one. During a single-pulse excitation, the 4p-4d transition (Table) was most effective, during a double-pulse excitation the intensity of the lines corresponding to this transition increased: for the 328 nm line – by 1.6 times; for the 330 nm line – by 1.2 times; for the 340 nm line – practically unchanged. These lines make up a fine structure and differ only in the value of the total moment  $J$ : for the 328 nm line  $J''=0, J'=1$ , for the 330 nm line  $J''=J'=1$ , for the 334 nm line  $J''=2, J'=3$  ( $J'', J'$  – total angular momenta of the lower and upper energy levels, respectively). In the spectrum of brass, three zinc lines (328 nm, 330 nm, 334 nm) are observed during the single-pulse and double-pulse excitation, and during the double-pulse excitation, the intensities of these lines increase significantly: for the 330 nm line – by 14 times, for the

334 nm line – by 8 times. The maximum intensity in the brass spectrum for zinc is observed at  $\Delta t = 12 \mu\text{s}$ : for the 328 nm line, the intensity increases 78 times compared to the intensity at  $\Delta t = 0 \mu\text{s}$ , for the 330 nm line – by 35 times, for the 334 nm line – 25 times.

Table

**The main characteristics of the spectral lines of the zinc atom [9] observed during the double-pulse excitation**

$\lambda$ , nm	I, rel. un.	$A_{ki}$ , $\text{c}^{-1}$	$E_i$ , $\text{cm}^{-1}$	$E_k$ , $\text{cm}^{-1}$	Lower level configuration, Term, J	Upper level configuration, Term, J
328.45	360000	$9 \cdot 10^7$	32 311.32	62 768.75	$3d^{10}4s4p$ , $3P^0$ , 0	$3d^{10}4s4d$ , $3D$ , 1
330.53	550000	$6.7 \cdot 10^7$	32 501.40	62 768.75	$3d^{10}4s4p$ , $3P^0$ , 1	$3d^{10}4s4d$ , $3D$ , 1
334.75	2900000	$1.7 \cdot 10^8$	32 890.33	62 776.98	$3d^{10}4s4p$ , $3P^0$ , 2	$3d^{10}4s4d$ , $3D$ , 3

I – relative intensity,  $A_{ki}$  – transition probability,  $E_i$ ,  $E_k$  – lower and upper energy levels, respectively, J – total angular momentum.

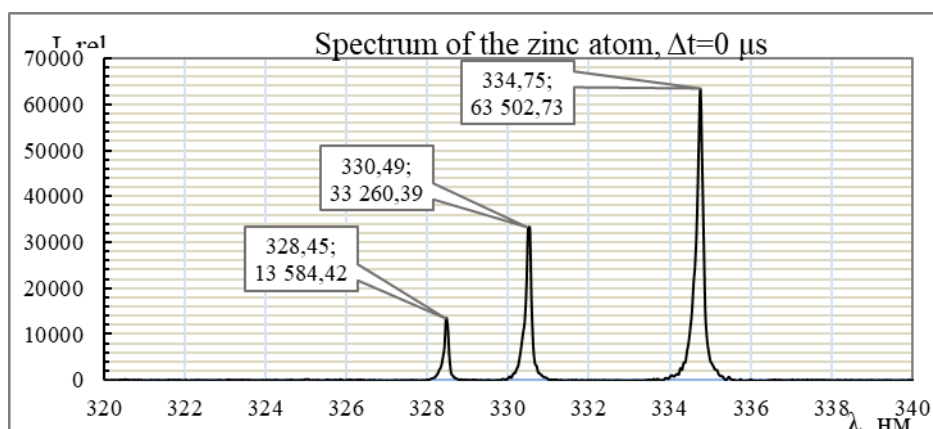


Fig. 1. Spectrum of the zinc atom at a single-pulse excitation

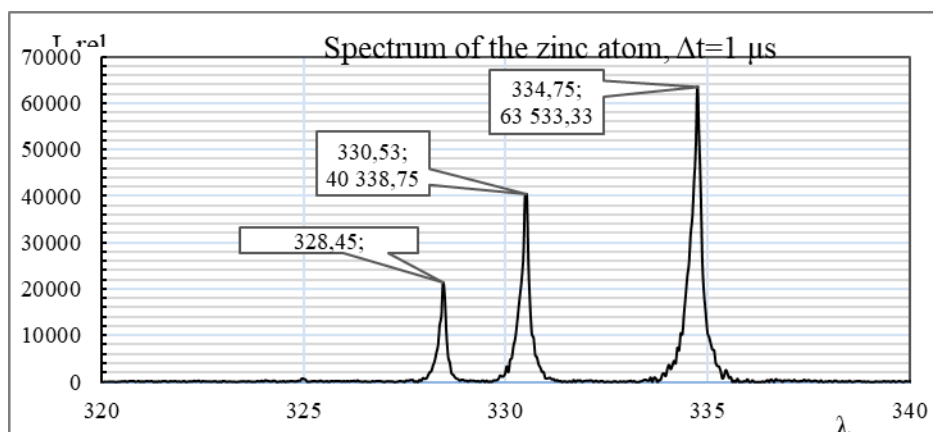


Fig. 2. Spectrum of the zinc atom at a double-pulse excitation with the interpulse time interval  $\Delta t = 1 \mu\text{s}$

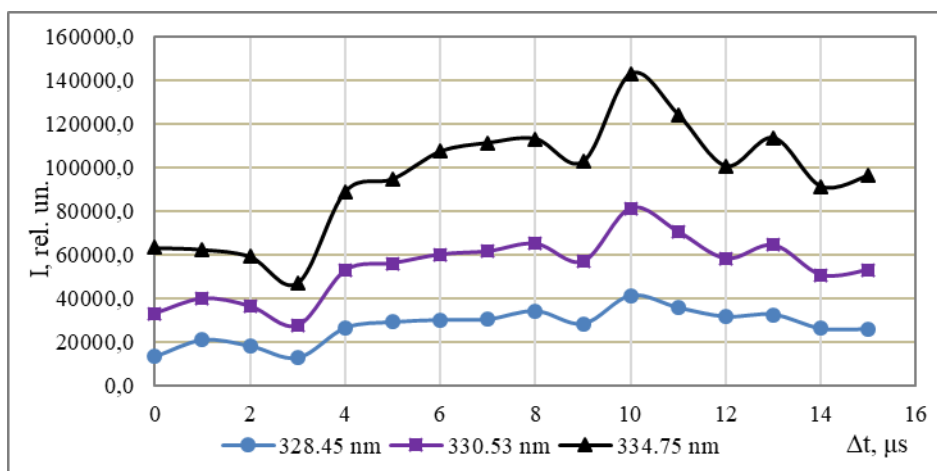


Fig. 3. Dependence of the intensity  $I$  of zinc lines on the inter-pulse interval  $\Delta t$

## CONCLUSIONS

According to the data obtained it can be observed that during the transition from single-pulse to double-pulse laser ablation of metals, the relative intensity of the spectral lines of all the elements considered increases. However, it should be noted that even for lines corresponding to transitions between two levels (but different sublevels of a fine structure), the increase in relative intensity can vary significantly. As we can see, for zinc, the spectral lines 328, 330 and 334 nm corresponding to the 4p-4d transition experience different increases in the analytical signal (1.6, 1.2 and 1 times, respectively). Thus, when switching from the single to the double laser pulses, it is necessary to take into account the fact that additional excitation of the primary plasma by the second pulse from the dual ones leads not only to additional excitation of all levels, but also to redistribution between the sublevels of the fine structure: a change in the total angular momentum of the atom equal to the sum of the orbital and spin momenta.

Optimal values of the inter-pulse time intervals between double laser pulses providing the maximum value of the relative intensity of spectral lines with the same total energy and power of laser radiation: for zinc – 10  $\mu s$ , for copper – 12  $\mu s$ , for lead – 7  $\mu s$ .

The transition from single to double laser pulses leads to a different change in the relative intensity of spectral lines during ablation of pure metals, and spectral lines of the same elements that make up multicomponent alloys (in most cases, the increase in the intensity is most pronounced during the ablation of alloys): in pure zinc, the intensity of spectral lines increases by 2 times, in the composition of brass – by 24-78 times. The difference in the increase in the analytical signal and the redistribution of excited atoms between the sublevels of the fine structure is associated with the processes occurring in



the propagating ablative plasma and with the peculiarities of the interaction of atoms of various components with laser pulses.

### References

1. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications/ A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter (Eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 620 p.
2. Журавлева, В.И. Эффективность использования вещества для спектрального анализа в различных условиях лазерной абляции/ В.И. Журавлева// журн. прикл. спектр. – 2004. – Т. 71, № 3. – С. 394-397.
3. Либенсон, М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Механизмы поглощения и диссипации энергии в веществе. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.; под ред. В.П. Вейко – Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 84 с.
4. Анисимов, С.И. Избранные задачи теории лазерной абляции/ С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук// Усп. физ. наук. – 2002. – Т. 172, № 3. – С. 301-333.
5. Laser induced breakdown spectroscopy/ C. Pasquini [et al]// J. Braz. Chem. Soc. – 2007. – Vol. 18, № 3. – P. 463-512.
6. Laser plasma formation in metal vapour: kinetic approach/ I.V. Mazhukin [et al]// Microchem J. – 1994. – Vol. 50, № 4. – P. 413-433.
7. Atomic emission spectroscopy method for mixing studies in high power thermal plasmas Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 89, 1 November 2013, Pages 93-102, Jochen Altenberend, Guy Chichignoud, Yves Delannoy.
8. Microwave plasma-atomic emission spectroscopy as a tool for the determination of copper, iron, manganese and zinc in animal feed and fertilizer Talanta, Volume 112, 15 August 2013, Pages 43-48, Wei Li, Patrick Simmons, Doug Shrader, Timothy J. Herrman, Susie Y. Dai.
9. NIST ASD Output: Lines [Electronic resource] – Mode of access: <http://physics.nist.gov>.

# ГЛУБОКИЕ СВЕРТОЧНЫЕ СЕТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**М. И. Моисеев**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
moiseeff.moisee@gmail.com;  
науч. рук. – Э. А. Чернявская, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В работе рассматриваются вопросы, связанные с обнаружением патологии на рентгеновских снимках грудных клеток пациентов. Исследованы методы улучшения исходного изображения, с целью повышения точности распознавания нейронной сетью. С использованием модели нейронной сети VGG16 было проведено исследование рентгеновских изображений. Проведен анализ используемых фильтров, для повышения точности распознавания патологии на рентгеновских изображениях. Получено, что точность классификации достигает 90.37% при использовании дополнительной комбинированной фильтрации.

**Ключевые слова:** сверточная нейронная сеть, VGG16, глубокое обучение.

## ВВЕДЕНИЕ

Оптимальный метод обучения нейронной сети совместно с предварительной обработкой изображений позволяет значительно уменьшить время для принятия решения по диагностике заболевания. Задача состоит в том, чтобы подобрать нужный метод обработки изображения перед передачей его для нейронной сети. Также необходимо внимательно подойти к выбору самой модели нейронной сети, так как с каждым годом модели глубокого обучения изменяются. Учитывая все нюансы предварительной обработки изображений, необходимо дополнительно избежать переобучения модели. Так как сфера использования – это медицина, то необходимо подобрать такой метод, который будет используя все эти нюансы, довольно быстро и без ошибок определять патологию на изображениях, чтобы дать возможность диагностировать в режиме реального времени.

Общая структура метода по обработке рентгеновских изображений состоит из следующих этапов: загрузка и предварительная обработка изображений, подготовка dataset к обучению нейронной сети, загрузка, обучение и оценка точности нейронной сети, сравнение результатов обработки для различных фильтров.

Цель данной работы состоит в использовании нейросетевого метода глубокого обучения при оптимизации предподготовки данных для обработки рентгеновских изображений.

## **АНАЛИЗ DATASET РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Для анализа рентгенограмм грудной клетки все рентгенограммы грудной клетки первоначально подвергались проверке для контроля качества изображений путем удаления всех низкокачественных или неразборчивых сканов. Диагнозы для изображений были затем оценены двумя врачами-экспертами, прежде чем они были одобрены для нейросетевого обучения [1].

Характеристика dataset: 5863 рентгеновских изображений, размер от 1000x500 до 2100x1900 пикселей, объем изображений от 40 кб до 900 кб, формат JPEG, 2 категории (PNEUMANIA/NORMAL), общий объем 2 гб.

### **МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Перед обучением нейронной сетью, была проведена процедура подготовки изображения. В подготовку входит несколько этапов: изменение размеров изображений на 224x224 пикселя, изменение наклона на изображения на 15 градусов для большей вариации ввиду индивидуальности каждого изображения, наложение фильтров для выделения исследуемых участков изображения.

Одним из ключевых этапов машинного обучения является этап предварительной обработки данных. В зависимости от специфики изучаемой области и преследуемых целей, выбираются те или иные способы предобработки.

В работе использовались следующие фильтры для повышения качества изображений: медианный фильтр, фильтр Гаусса и high pass filter (HPF). Для получения лучшей точности оценочной способности модели, использовались комбинации фильтров: медианный фильтр + HPF, фильтр Гаусса+HPF, HPF.

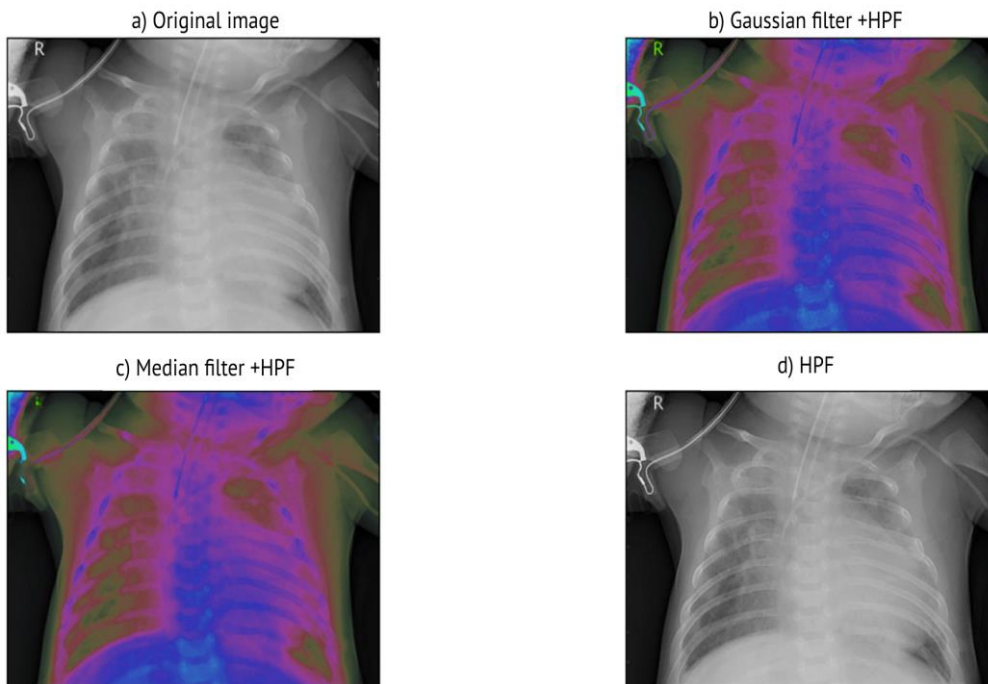


Рис. 1(a-d). Изображения после наложения фильтров

На рисунке 1.a в правом верхнем углу находится изображение без наложения фильтров. На рисунке 1.b находится изображение с наложением комбинации фильтра Гаусса и HPF в градации серого. На рисунке 1.c находится изображение обработанное комбинацией медианного фильтра и HPF в градации серого. На рисунке 1.d находится изображение с наложением HPF, аналогично, в градации серого.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ НАСТРОЙКА И ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Используемая нейронная сеть VGG16 имеет следующую структуру:

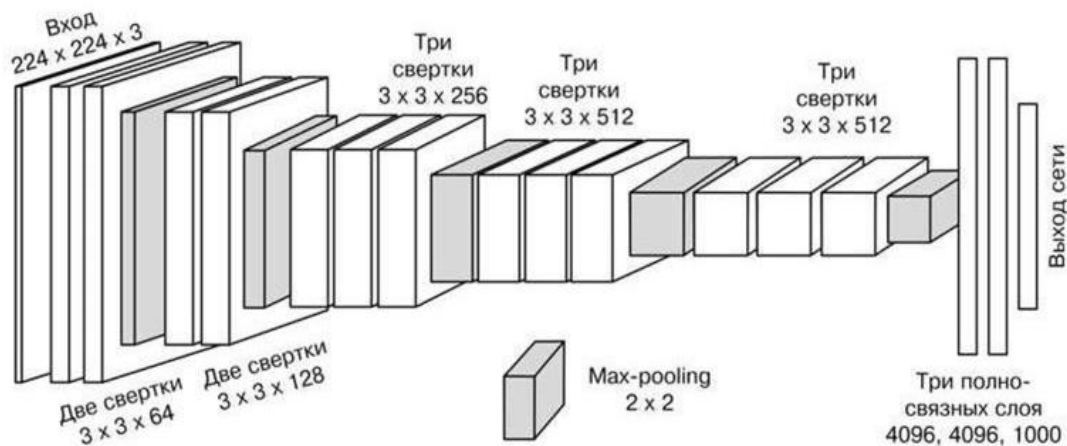


Рис. 2. Структура нейронной сети VGG16

Структура состоит из сверточных слоев с очень маленьким рецептивным полем размера 3x3, pooling-слоев в которых выполняется

операция max-pooling на окне размера 2x2 пикселей с шагом 2, полносвязных слоев с количеством 4096, 4096 и 1000 каналов соответственно, последним идет soft-max слой [3].

Для начала необходимо извлечь метки из пути файлов, так как изображения были рассортированы на две директории (PNEUMANIA / NORMAL). Затем необходимо разделить DATASET на часть для обучения, то есть какие изображения используются в обучении нейронной сети, и часть для оценки, по результатам обработки этих изображений и оценивается точность определения патологии нейронной сетью. В данном случае 80 процентов всех изображений использовалась для обучения и 20 процентов для оценки.

После настройки, сеть компилируется с затуханием скорости обучения и с использованием оптимизатора Adam. Так как это задача двухклассовой классификации, используется loss-функция бинарной перекрестной энтропии. Для того, чтобы избежать переобучения использовался метод Dropout [2].

По итогам работы выводится матрица неточностей, с помощью которой определяются значения точности, специфичности и чувствительности. Обучение было проведено на графическом процессоре с использованием CUDA, количество эпох равнялось 25 с batch size 32.

#### **Результаты точности распознавания нейронной сетью с применением различных фильтров**

<b>Используемый фильтр</b>	<b>Точность</b>
Медианный фильтр+HPF	90.37%
Фильтр Гаусса+HPF	88.15%
HPF	86.04%
Без фильтрации	84.43%

Как видно из результатов обучения нейронной сети (Таблица), наивысшую точность 90.37%, имеет комбинация медианный фильтр+HPF. В свою очередь точность распознавания можно повысить путем увеличения количества эпох, а также с использованием других, более сложных комбинаций фильтров.

Многие задачи распознавания патологии на рентгеновских снимках могут быть решены с использованием новейших методов глубокого обучения для задач экспресс диагностики.

#### **Библиографические ссылки**

1. Daniel S. Kermany, Michael Goldbaum, Wenjia Cai, Carolina C.S. Valentim, Huiying Liang, Sally L. Baxter, Alex McKeown, Ge Yang, Xiaokang Wu, Fangbing Yan, Justin Dong, Made K. Prasadha, Jacqueline Pei, Magdalene Y.L. Ting, Jie Zhu, Christina Li, Sierra Hewett et al. // Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Im-

- age-Based Deep Learning [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(18\)30154-5#relatedArticles](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(18)30154-5#relatedArticles) (дата обращения: 28.03.2022)
2. Adrian Rosebrock // Detecting COVID-19 in X-ray images with Keras, TensorFlow, and Deep Learning [Электронный ресурс]. URL: <https://pyimagesearch.com/2020/03/16/detecting-covid-19-in-x-ray-images-with-keras-tensorflow-and-deep-learning/> (дата обращения: 04.04.2022)
  3. Karen Simonyan, Andrew Zisserman // Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (дата обращения: 01.05.2022)

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ И МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ТВС И ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА ВВЭР-1200

**А. В. Николайчик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
nikolaychik.nastenka@gmail.com;  
науч. рук. – С. А. Кутень, ст. преп.*

В работе изучены подходы к расчетам макроскопических сечений и коэффициентов диффузии для одной ТВС в Монте-Карло коде Serpent, подготовлен входной файл и рассчитаны макроскопические сечения и коэффициенты диффузии для одной ТВС реактора ВВЭР-1200 с помощью кода Serpent, создан инструмент для чтения и обработки выходных файлов кода Serpent и создания набора библиотек макроскопических сечений в формульном формате для реакторного кода DYN3D для указанных в данной работе параметров. Проведена процедура параметризации (фитирования) сечений по параметрам активной зоны, найденные коэффициенты параметризации записаны в требуемом формате для wqs-файла библиотеки. Подготовлено 8 библиотек сечений (\_wqs.dat) для кода DYN3D с использованием разных методов расчетов макроскопических сечений и коэффициентов диффузии. Проведено тестирование созданных файлов сечений.

**Ключевые слова:** макроскопические сечения; коэффициент диффузии; малогрупповые библиотеки сечений; Монте-Карло; Serpent; DYN3D.

## ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование является одним из самых эффективных методов изучения сложных систем. Технические системы, которые существуют в современном мире уже невозможно исследовать обычными теоретическими методами. Особую роль компьютерное моделирование играет в ядерной энергетике, в частности для АЭС. Объекты энергетике нуждаются в управлении, которое подразумевает постоянное наблюдение в процессе эксплуатации за интенсивными и динамичными процессами преобразования энергии и движения рабочих сред. Это связано с необходимостью исследования допустимости различных режимов работы, оценки и прогнозирования технического состояния и т.п., что целесообразно выполнять с помощью специализированных программных средств. Одним из самых точных методов для моделирования нейтронно-физических процессов, происходящих в активной зоне ядерных реакторов является метод Монте-Карло.

Целью работы является подготовка входного файла в Монте-Карло коде Serpent и создание, с помощью ПС Wolfram Mathematica, средства для автоматического чтения и обработки выходных файлов для рассматриваемой задачи и селекции необходимых физических величин в зависимости от нейтронно-физических параметров и последующей параметризации макроскопических сечений и коэффициентов диффузии для подготовки библиотеки в формульном формате для реакторного диффузионного кода DYN3D.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

В таблице 1 представлены методы расчета макроскопических сечений и коэффициентов диффузии [1]:

- $B_1$ : поиск геометрического параметра для расчета коэффициентов диффузии и критического спектра.
- $P_1$ : аналогично  $B_1$ , но без одного коэффициента, зависящего от геометрического параметра.

Дополнительные методы расчета коэффициентов диффузии:

- TRC: способ расчета более точных коэффициентов диффузии с использованием транспортных поправочных коэффициентов.
- СММ: метод кумулятивной миграции, общий способ расчета коэффициентов диффузии внутреннего рассеяния в бесконечной геометрии.

Таблица 1

Методы расчета макроскопических сечений и коэффициентов диффузии

	$B_1$	$P_1$	СММ	TRC
Сечения	+	+	<del>+</del>	<del>+</del>
Коэффициенты диффузии	+	+	+	+

## ПОДГОТОВКА ФАЙЛОВ В КОДЕ SERPENT

В работе используется спектральный Монте-Карло код Serpent. Подготовлен входной файл для модели одной ТВС с учетом возможного наличия поглощающих стержней в направляющих каналах с заданием команд для проведения расчета малоэнергетических сечений и коэффициентов диффузии всеми доступными методами ( $B_1$ ,  $P_1$ , СММ, TRC). Заданы параметры (табл. 2), при которых проведены расчеты характеристик ТВС (температура топлива  $T_{fuel}$ , температура  $T_{mod}$  и плотность  $Den_{mod}$  теплоносителя, концентрация борной кислоты  $C_b$  в теплоносителе, глубина выгорания).





## ПОДГОТОВКА БИБЛИОТЕК СЕЧЕНИЙ ДЛЯ КОДА DYN3D

Библиотека сечений для кода DYN3D создана в формульном формате, с использованием программы Wolfram Mathematica. Формульный формат описывает зависимость макроскопических сечений и коэффициентов диффузии от различных параметров (температура топлива, температура и плотность теплоносителя, концентрация борной кислоты в теплоносителе, глубина выгорания). Библиотека создается для одной ТВС, в которой в направляющих каналах может быть теплоноситель или поглощающие стержни. Она готовится для каждого из трех случаев: CRwater (для теплоносителя), CRb4c (для поглощающих стержней из В<sub>4</sub>С), CRdy (для поглощающих стержней из титаната диспрозия).

Фитирование проводится по следующим формулам:

для концентрации борной кислоты и плотности теплоносителя:

$$a(1 + a1(x - xRef) + a2(x + xRef)^2),$$

для температуры топлива:

$$a(1 + a1(-\sqrt{xRef} + \sqrt{x})),$$

для температуры теплоносителя:

$$a\left(1 + a1\left(-\frac{1}{xRef^{0.5}} + \frac{1}{x^{0.5}}\right)\right),$$

где  $a$ ,  $a1$ ,  $a2$  – коэффициенты фитирования,  $xRef$  – референсные значения.

Каждый коэффициент аппроксимируется по выгоранию:

$$C0 + C1 \cdot B + C2 \cdot (B)^2.$$

Для проверки правильности проведенного фитирования рассчитывается  $k_{eff}$  в коде DYN3D/Serpent и сравнивается со значением из Serpent при одинаковых значениях параметров. Для такой проверки в коде DYN3D реализован специализированный модуль CONSTANT FEEDBACK CALCULATION, в котором варьируются значения по температуре топлива, температуре и плотности теплоносителя, концентрации борной кислоты.

Выбор оптимальных режимов расчета коэффициентов диффузии и макроскопических сечений для ТВС проводился для значений расчетов

коэффициента критичности и распределения энерговыделения для активной зоны реактора ВВЭР-1000. Поскольку погрешности расчета значений для коэффициента критичности является довольно маленькой, то выбор параметров производился исходя из минимальных значений погрешностей расчета энерговыделения в ТВС. Наиболее лучшим режимом расчета является следующее сочетание: метод TRC для коэффициентов диффузии и метод P1 для остальных констант.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Rintala A.* Diffusion coefficients and critical spectrum methods in Serpent // 8<sup>th</sup> International Serpent User Group Meeting. Espoo, Finland, May 30, 2018.

# QR-КОД И ПРОЦЕСС НАХОЖДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАТОРОВ

Е. А. Овсяник, Я. С. Судник

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
jenechek555@gmail.com, yass290304@gmail.com;  
науч. рук. – И. И. Рушнова, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой*

В статье представлен вариант включения в процесс обучения в высшей школе QR-кодирования в качестве инструмента для создания новых алгоритмов кодирования образовательной информации. QR-код используется в качестве ссылки на портал физического факультета Белорусского государственного университета, где размещается программа, созданная в среде программирования Delphi, демонстрирующая процесс нахождения собственных и присоединенных к ним векторов для линейного оператора в действительном или комплексном поле.

**Ключевые слова:** QR-код, кодирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача нахождения собственных значений и собственных векторов линейных операторов является одной из основных задач, как для разделов высшей математики, так и для многих разделов физики. С такой задачей приходится сталкиваться как в методах математической физики, так и при исследовании, например, собственных колебаний различных механических систем, колебательных и электронных спектров молекул и др. Например, такое понятие, как «диагонализация гамильтониана» (оператора энергии), непосредственным образом связано с нахождением собственных значений этого оператора.

QR-код – двухмерный штрих код, состоящий из черных и белых пикселей и позволяющий кодировать до нескольких сотен символов, уже некоторое время тому нашел применение в образовательном процессе. Так, использование QR-кодов в учебниках и методических разработках придает интерактивности печатным изданиям и расширяет их содержание дополнительным материалом. Все большую популярность QR-кодирование приобретает и на практических занятиях различных дисциплин, поскольку становится отличным подспорьем традиционным приемам изложения тем и дает возможность наглядно продемонстрировать теоретические выкладки. Кодированию подлежит любая информация, представимая в различных форматах.

## QR-КОД И РАЗРАБОТАННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

В работе акцентируется внимание на векторы, которые играют особую роль в приложениях. Это нулевые векторы, которые под воздействием линейного оператора  $f$  преобразуются в новые векторы, коллинеарные исходным, и называются собственными векторами оператора  $f$  (матрицы  $A$ ), а соответствующие им числа – собственными значениями оператора  $f$  (матрицы  $A$ ). Точные определения и алгоритм нахождения собственных векторов и значений приведены в [1,2]. Если базис линейного оператора составить из собственных векторов, то матрица оператора имеет наиболее простой вид и представляет собой диагональную матрицу, а соответствующая операция называется приведением данной матрицы к диагональному виду.

В последнее время при изложении темы «собственные и присоединенные векторы линейного оператора» все чаще возникают вопросы: «что мешает успешному усвоению этой темы линейной алгебры?» и «каким образом можно способствовать успешному усвоению вышеупомянутой темы?». Очевидно, необходим перспективный инструмент-помощник, способный расширить информационное пространство современного образования для студентов. В нынешних условиях, несомненно, очень комфортно студентам с мобильными устройствами. Поэтому можно воспользоваться некоторыми преимуществами, включая мобильные устройства на практических занятиях (с ведома преподавателя) через доступные и простые в использовании технологии, такие как QR-коды.

В этой связи, чтобы задача на собственные значения и собственные векторы линейного оператора на практических занятиях по аналитической геометрии и линейной алгебре была более наглядно продемонстрирована, был создан QR-код, который ориентирован на использование в качестве ссылки на портал физического факультета Белорусского государственного университета, где размещается программа, созданная в среде программирования Delphi, для нахождения собственных и присоединенных к ним векторов для линейного оператора в действительном или комплексном линейном пространстве [2,3].

В данной работе в некотором базисе линейного пространства линейному оператору поставлена в соответствие матрица третьего порядка. Это не ограничивает общности распространить результат на иной порядок матрицы.

Следуя правилу нахождения собственных значений и собственных векторов линейного оператора, на первом шаге программа находит характеристический многочлен матрицы, например, при  $n = 3$ ,

```

| 1 -1 1 |
| 1 1 -1 |
| 2 -1 0 |

| 1-л -1 1 |
| 1 1-л -1 | =det(A-лE)
| 2 -1 0-л |

det(A-лE)=(л+( 1))*(л^2+( -3)*л+( 2))=0

```

Рис. 1. Визуально представленная логическая часть кода

причем важно помнить, что минор порядка  $k$  матрицы  $A$  – это определитель, составленный из элементов этой матрицы, стоящих на пересечении каких либо её  $k$  строк и каких-то  $k$  столбцов. Главный минор  $M_k^k$  составлен из элементов на пересечении строк и столбцов с одинаковыми номерами. Этот факт в представлении выше дает возможность представить характеристическое уравнение матрицы в виде кубического уравнения относительно  $\lambda$ . На втором шаге программа находит все характеристические числа матрицы и определяет их алгебраические кратности.

```

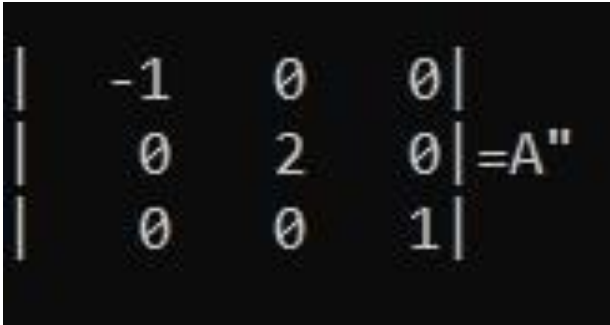
| | л1= -1    к1=1
| | л2=  2    к2=1
| | л3=  1    к3=1

```

Рис. 2. Визуально представленная логическая часть кода

При этом в программе используется метод понижения степени характеристического многочлена до второй степени с неизвестным сомножителем  $(\lambda - g)$ , алгоритм нахождения которого заложен в программе [4]. На следующем шаге проверяются условия: 1. все характеристические числа принадлежат данному полю (действительному или комплексному) или нет; 2.  $k_i = 3 - \text{rang}(A - \lambda_i E)$ , т.е. равно ли число найденных собственных векторов кратности соответствующих им собственных значений, причем для каждого  $\lambda_i$ .

Если условия 1. и 2. дают положительный ответ, то матрица линейного оператора приводится к диагональному виду, и программа записывает этот вид. Например,



$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = A$$

Рис. 3. Визуально представленная логическая часть кода

Если условие 1. выполняется, но не выполняется условие 2., то для этого значения  $\lambda_i$  программа ищет присоединенный вектор.

Для поиска собственных векторов, при кратности равной 1, используется алгоритм нахождения решения однородной системы через алгебраические дополнения к элементам одной из строк матрицы системы  $(A - \lambda_i E)$ . Если алгебраические дополнения все равны нулю, то выбирается другая строка элементов и процедура повторяется.

По найденным собственным векторам оператора алгоритм строит матрицу перехода от базиса, где матрица линейного оператора имела исходный вид, к базису, где матрица имеет, выстроенный из собственных значений, диагональный вид.

Присоединенные векторы находятся по соответствующему алгоритму решения неоднородной системы линейных уравнений. При наличии присоединенных векторов, выписывается матрица по столбцам из координат собственных и соответствующих им присоединенных векторов.

В случае, когда в условии 1. некоторые из  $\lambda_i$ , принадлежат полю комплексных чисел, то используем утверждение основной теоремы алгебры и ее следствия. Всякий многочлен с действительными коэффициентами представляется в виде произведения линейных двучленов и квадратных трехчленов, причем с отрицательными дискриминантами. В силу этого многочлен нечетной степени с действительными коэффициентами всегда имеет хотя бы один действительный корень. Таким образом, в нашем случае алгоритм находит один простой действительный корень и пару простых сопряженных корней, то есть всего 3 корня (с учетом их кратности =1), учитывая и тот факт, что многочлен  $n$ -й степени имеет ровно  $n$  корней,

если каждый корень считать столько раз, какова его кратность. Собственные векторы находятся при помощи созданного разработчиками алгоритма, учитывая среду программирования Delphi.

Ниже приведена рабочая версия главной страницы приложения.

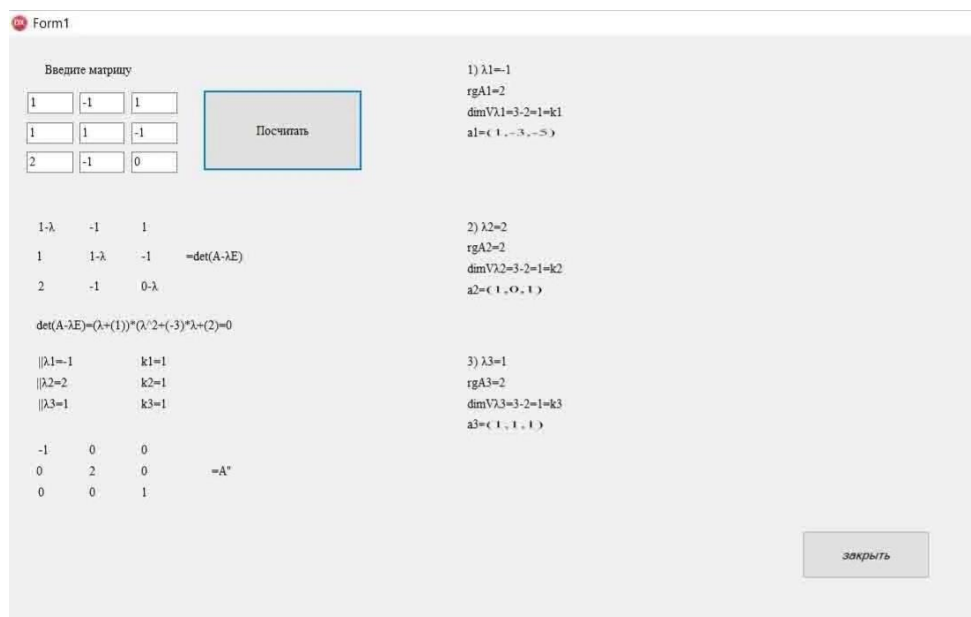


Рис. 4. Рабочий вариант главной страницы приложения

Вывод: Внедрение в обучение QR-кодирования позволяет изложение даже сложных тем сделать увлекательным и интересным в проверке приобретённых на занятиях практических навыков. А также, QR-код, может стать инструментом для расширения кодирования различной учебной информации в дисциплинах по физике и математике.

#### Библиографические ссылки

1. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/91377> Высшая математика. Сборник задач : в 3 ч. / В. К. Ахраменко [и др.]; под. ред. Н.Г. Абрашиной-Жадаевой и В.Н. Русака. Минск, 2013. Ч. 1.
2. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/113069> Высшая математика. Сборник задач : в 3 ч. / В. К. Ахраменко [и др.]; под. ред. Н.Г. Абрашиной-Жадаевой и В.Н. Русака. Минск, 2013. Ч. 2.
3. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/173448> Аналитическая геометрия и линейная алгебра : электронный учеб.-метод. комплекс по учебной дисциплине «Аналитическая геометрия и линейная алгебра» для специальностей: 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)», 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии», 1-31 04 07 «Физика наноматериалов и нанотехнологий», 1-31 04 08 «Компьютерная физика» / БГУ, Физический фак., Каф. высшей математики и математической физики ; составители: Н. Г. Абрашина-Жадаева [и др.]. – Минск : БГУ, 2016. – 177 с. : ил. – Библиогр.: с. 176–177.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.:Наука, 2006.



# ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Н. Н. Руденик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
marshalsultt@gmail.com;  
науч. рук. – Е. А. Крутилина., ассист.*

Было проведено изучение процесса эрозии поверхностных слоев алюминия и силуминовых сплавов в результате воздействия на них компрессионными плазменными потоками, выявлены основные механизмы эрозии и установлено влияние содержания кремния на интенсивность процесса эрозии.

**Ключевые слова:** силумин; заэвтектический сплав; эвтектический сплав; компрессионный плазменный поток; эрозия.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием техники и научно-технического прогресса все более востребованными становятся материалы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами и технологичностью в процессе производства. Особое внимание уделяется сплавам, характеризующимся низким значением температурного коэффициента линейного расширения и необходимым уровнем механических свойств. К таким материалам относятся сплавы системы Al-Si. Перспективность применения данного типа сплава в производственной деятельности (например, в машиностроении или приборостроении) требует тщательного изучения влияния на него ряда повреждающих факторов, одним из которых является высокоэнергетическое воздействие плазмы и потоков частиц. Возможным результатом такого рода воздействий является эрозия поверхности, протекание которой в значительной степени должно повлиять на последующие эксплуатационные свойства материала [1]. Целью данной работы является установление особенностей протекания процесса эрозии поверхностных слоев сплавов системы Al-Si с различным процентным содержанием кремния под импульсным воздействием компрессионных плазменных потоков, определение ее основных механизмов и оценка влияния содержания кремния на интенсивность эрозии.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования использовались образцы заэвтектического силуминового сплава с содержанием кремния 44 и 20 ат.%, а также образцы эвтектического сплава (содержание кремния 12 ат.%) и чистого алюминия. Модифицирование поверхности осуществлялось воздействием компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых с помощью магнитоплазменного компрессора компактной геометрии в остаточной атмосфере азота (давление остаточной атмосферы 400 Па). Величина напряжения на системе конденсаторов составляет 4кВ. Расстояние между поверхностью образца и срезом электрода разрядного устройства - 8 см. Обработка поверхности осуществлялась воздействием 1, 3, 5 и 7 последовательными импульсами КПП, интервал следования ~10 с, длительность одного импульса составляет 100 мкс.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Массу испытуемых образцов до и после воздействия компрессионных плазменных потоков определяли с использованием аналитических весов Radwag с точностью  $\pm 0,00005$  г. Анализ морфологии поверхности проводился на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO 1455VP при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток зонда  $5 \cdot 10^{-7}$  А.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При сопоставлении масс алюминия и силуминовых образцов до и после высокоэнергетической обработки было установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков приводит к эрозии их поверхности, о чем свидетельствует уменьшение массы образцов (Рис. 1).

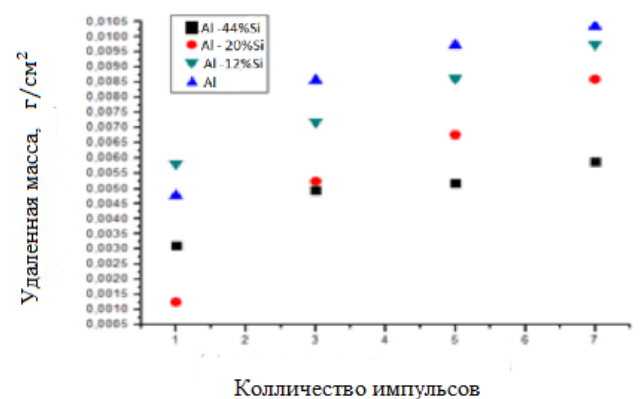


Рис. 1. Зависимость массы, удаленной с единицы поверхности исследуемых образцов в результате воздействия на них разным количеством импульсов КПП

Как видно из полученного графика, количество уносимой массы для всех испытуемых образцов возрастает с ростом количества импульсов КПП. Однако интенсивность уноса массы для заэвтектических сплавов будет меньше, чем для чистого алюминия и сплава эвтектического состава.

Известно [2], что некоторая доля энергии КПП превращается в тепловую в результате взаимодействия плазменного потока с обрабатываемым материалом. При этом происходит расплавление его поверхностных слоев с последующим изменением структурно-фазового состояния и механических свойств.

Результаты РЭМ-исследований показали, что воздействие КПП в исследуемом режиме приводит к плавлению поверхностного слоя образцов алюминия и силуминовых сплавов (Рис. 2).

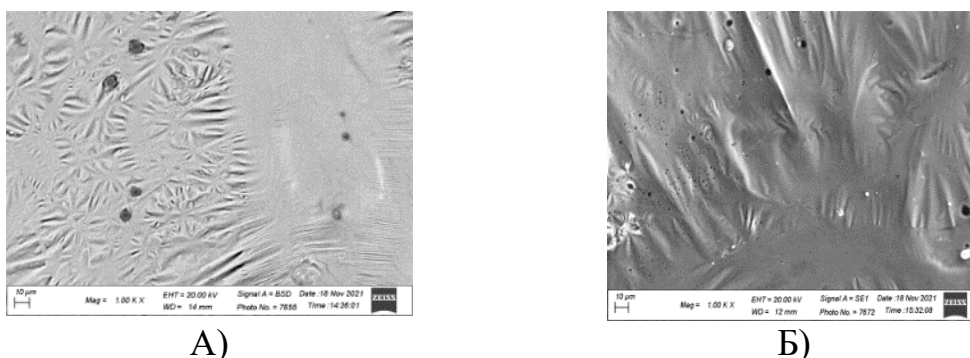


Рис.2. Результаты РЭМ-исследования образцов после воздействия 1 импульсом КПП: А) Al-12Si; Б) Al-40Si

Можно заметить формирование волнистого рельефа, что связано с действием сил поверхностного натяжения в расплаве. Таким образом, предполагается, что в процессе плазменного воздействия реализуются механизмы эрозии поверхности, связанные с жидкофазными процессами, к числу которых относится гидродинамическое течение расплава и его последующее вытеснение за края образца давлением КПП. Возможность реализации данного механизма подтверждается и данными визуального контроля образцов. Наблюдается образование шероховатой поверхности, а также следы стекания расплава по боковым граням образцов

Кроме того, эрозия может происходить в результате испарения элементов, входящих в состав испытуемых образцов, со свободной поверхности расплава. С целью установления роли данного механизма решалось одномерное уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Согласно полученным результатам, через 100 мкс на глубине 0,2 мкм максимальная температура достигает 2150 - 2490 К в зависимости от

материала образца, длительность существования расплава составляет ~ 100 мкс.

Далее, согласно [2], аддитивно оценивалось количество массы образцов, унесенной за счет испарения отдельных их компонентов, с использованием соответствующих Al и Si констант.

Расчеты показали, что доля испаренной массы образцов на два порядка меньше значения полной удаленной массы материала, что может свидетельствовать о незначительном влиянии механизма испарения на эрозию поверхности силуминовых сплавов при воздействии КПП. Снижение интенсивности уноса массы увеличением содержания кремния в исследуемых образцах может заключаться в следующем. Так как температура плавления алюминия ниже таковой кремния ( $T_{пл}(Al) = 660^\circ C$ ,  $T_{пл}(Si) = 1415^\circ C$ ), меньший унос массы обусловлен большим содержанием кремния и, как следствие, формированием более однородного расплава алюминия большего объема. Кроме того, следует отметить, что с увеличением содержания кремния в силуминовых сплавах повышается его динамическая вязкость (Al – 0,8104 мПа·с, Al-12Si – 0,8902 мПа·с, Al-20Si – 0,9620 мПа·с, Al-44Si – 1,004 мПа·с), что должно затруднять гидродинамическое движение расплава. Также следует подчеркнуть, что поверхностное натяжение жидкого алюминия будет иметь меньшее значение, чем для жидкого кремния при одной и той же температуре ( $\sigma(Al)=725$  мН/м при  $1600^\circ C$ ,  $\sigma(Si)=750$  мН/м при  $1550^\circ C$ ). Соответственно, можно сделать вывод о том, что процесс гидродинамического течения, в том числе и выталкивания вещества за пределы образца давлением КПП, вероятнее всего будет происходить за счет алюминиевой составляющей образцов.

## ВЫВОД

По результатам проведенного исследования было установлено, что эрозия поверхностных слоев силуминовых сплавов в результате воздействия компрессионных плазменных потоков протекает в жидкофазном состоянии, а ее интенсивность снижается с увеличением содержания кремния. Наиболее вероятным механизмом уноса массы является гидродинамическое течение расплава с последующим его вытеснением за края образцов давлением компрессионных плазменных потоков. В меньшей степени влияет поверхностное испарение элементов сплава.

### **Библиографические ссылки**

1. *Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д.* Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц. *Успехи физических наук*, 1999. Т. 169, № 11. С. 1243 – 1271.
2. *Черенда Н.Н., Ласковнев А.П., Басалай А.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М.* Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков. *Перспективные материалы*, 2014. № 11. С. 5-14.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ БИОГАЗА В НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Н. В. Томкович, А.В. Казак, Л. В. Симончик, А. А. Кириллов,  
Г.Ф. Стельмах

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, г. Минск,  
<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*mikalaitomkavitch@yandex.by*;  
науч. рук. – А. В. Казак, канд. физ.-мат. наук;  
Г. Ф. Стельмах, канд. физ.-мат. наук, доц.

Представлен плазмохимический реактор для конверсии биогаза на основе несамостоятельного тлеющего разряда постоянного тока атмосферного давления в трехэлектродной конфигурации. Экспериментально исследована конверсия смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в синтез-газ, основными компонентами которого являются водород и окись углерода. Достигнута степень конверсии порядка 83% для углекислого газа и 78 % для метана.

**Ключевые слова:** тлеющий разряд атмосферного давления; биогаз; риформинг; синтез-газ; водород.

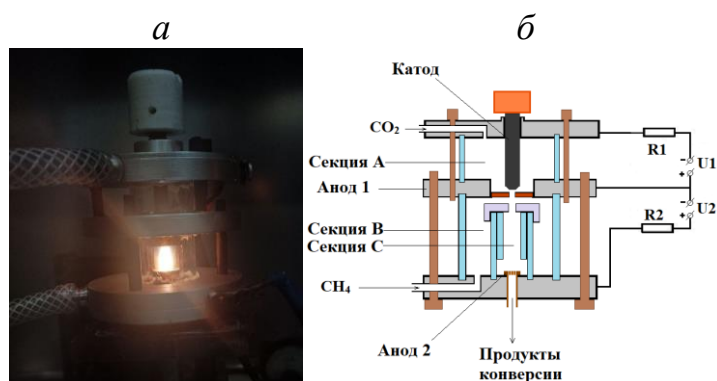
## ВВЕДЕНИЕ

Биогаз является перспективным возобновляемым источником энергии и важным компонентом для будущего энергоснабжения. Обычное использование биогаза – прямое сжигание для производства тепла и электричества. Однако тепловая ценность биогаза невысокая из-за большой концентрации углекислого газа в нем. Более эффективно преобразовывать биогаз в синтез-газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) посредством риформинга, где наиболее перспективными являются каталитические и плазменные технологии. Однако данные технологии все еще далеки от достаточной степени энергоэффективности и степени конверсии [1].

Ранее в [2] была продемонстрирована высокая эффективность плазмохимического реактора на основе несамостоятельного тлеющего разряда атмосферного давления на постоянном токе в трехэлектродной конфигурации при конверсии этанол-водных смесей в синтез-газ. В данной работе конструкция плазмохимического реактора адаптирована для риформинга смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  и представлены результаты экспериментальных исследований процесса ее конверсии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Внешний вид плазмохимического реактора представлен на *Рис. 1, а*. Реактор состоит из трехсекционной камеры (*Рис. 1, б*), секции которой образуют отрезки цилиндрических кварцевых труб. В секции А находится катод (стальной стержень диаметром 8 мм), а диск с латунной вставкой толщиной 1 мм является анодом 1. Межэлектродный промежуток составляет 1-2 мм. Через секцию А обеспечивается поток  $\text{CO}_2$ , который выходит в секцию С через отверстие в латунной вставке анода 1. одновременно в секцию С из секции В поступает метан. Расходы  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  подбираются таким образом, чтобы в секции С реализовывалась смесь в соотношении близком к 1:1.



*Рис. 1.* Фото (*а*) и схема (*б*) плазмохимического реактора

В секции А зажигается нормальный тлеющий разряд в  $\text{CO}_2$ . Ток разряда  $\sim 200$  мА обеспечивается источником питания  $U_1$  (1500 В,  $R_1 \sim 5$  кОм). Данный разряд служит плазменным катодом для несамостоятельного разряда в секции С, который зажигается между анодом 1 и анодом 2 от другого источника питания постоянного тока  $U_2$  (3000 В,  $R_2 \sim 10$  кОм). Межэлектродный промежуток секции С зафиксирован на расстоянии  $\sim 18$  мм. Разрядный ток несамостоятельного разряда при этом составляет 150-200 мА.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте разрядный промежуток в секции А устанавливался около 1 мм, т. к. в этом случае напряжение на электродах слабо изменяется в диапазоне токов от 50 до 400 мА. Вольт-амперная характеристика несамостоятельного разряда в смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  представлена на *Рис. 2*. Видно, что в диапазоне рабочих токов 100-200 мА она падающая, напряжение на электродах изменяется в пределах 2000-1500 В.

Состав продуктов конверсии смеси  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  на выходе плазмохимического реактора определялся методом абсорбционной инфракрасной (ИК) спектроскопии аналогично работе [3].

б

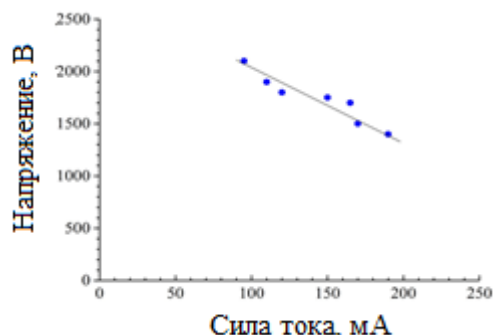


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика несамостоятельного (50%  $\text{CH}_4$ +50%  $\text{CO}_2$ ) разряда.

Мольная доля водорода рассчитывалась с учетом мольных долей ИК активных компонент в продуктах конверсии биогаза и дополнительно контролировалась балансом атомов водорода на входе и выходе из плазмохимического реактора.

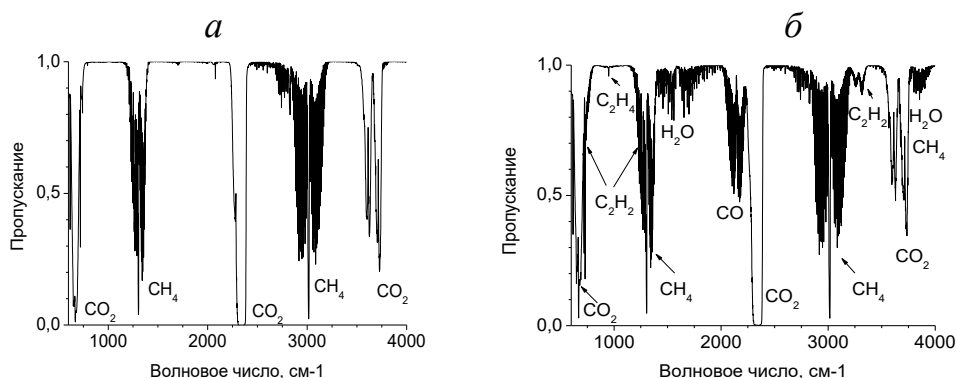


Рис. 3. ИК-спектры исходной смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (а) и продуктов ее конверсии

Спектр пропускания исходной смеси  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  представлен на Рис. 3, а. В спектр пропускания продуктов конверсии на выходе из реактора выявлены полосы молекул  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{C}_2\text{H}_4$  (Рис. 3, б). Мольные доли  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  определялись по полосам 3500-3800  $\text{cm}^{-1}$  и 2800-3200  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{C}_2\text{H}_4$  по полосам 2000-2200  $\text{cm}^{-1}$ , 1300-2000  $\text{cm}^{-1}$  и 3200-3400  $\text{cm}^{-1}$ , соответственно. Если принять во внимание, что других продуктов конверсии в спектре не наблюдается, то можно предположить, что оставшаяся доля будет принадлежать  $\text{H}_2$ .

В Таблице представлены данные конверсии смеси  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в соотношении близком к 1:1 при суммарных расходах 1,4 и 0,7 л/мин. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что с



уменьшением расхода биогаза количество CO и H<sub>2</sub> увеличивается, а метана и углекислого газа уменьшается.

**Мольный состав (проценты) продуктов конверсии биогаза**

	расход 1,4 л/мин	расход 0,7 л/мин
CO <sub>2</sub>	18	6
CH <sub>4</sub>	22	7
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,8	1,5
H <sub>2</sub> O	2,5	1,5
CO	35	45
H <sub>2</sub>	20,53	39
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,17	0,15

При снижении расхода реакционной смеси с 1,4 л/мин до 0,7 л/мин степени конверсии  $\eta(\text{CO}_2)$  изменяется с 58% до 83%, и  $\eta(\text{CH}_4)$  с 40% до 78%, что, вероятно, связано с увеличением температуры и времени пребывания газовой смеси в области разряда.

**Библиографические ссылки**

1. *Alves H.J., Junior C.B., Niklevicz R.R., Frigo E.P., Frigo M.S., Coimbra-Araujo C.H., Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells// Int. J. Hydrogen Energy, 2013, vol. 38, no. 13, pp. 5215–5225.*
2. *Arkhipenko, V.I., Kirillov, A.A., Simonchik, L.V., Kazak, A.V., Chernukho, A.P. and Migoun, A.N., Ethanol conversion in a DC atmospheric pressure glow discharge// Int. J. Hydrogen Energy, 2016, vol. 41, no. 41, pp. 18320-18328.*
3. *Arkhipenko, V.I., Zgirouski, S.M., Karoza, A.G., Kirillov, A.A. and Simonchik, L.V., Diagnostics of ethanol conversion products by IR absorption spectroscopy// J. Appl. Spectrosc., 2013, vol. 80, no. 1, pp. 99-103.*

# РОЖДЕНИЕ ФЕРМИОННОЙ ПАРЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОЦЕССОВ ЛЕПТОН-АНТИЛЕПТОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ

Ю. Н. Чуднова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
yuliachudnova39@gmail.com;  
науч. рук. - Т.В. Шишкина,*

С использованием диаграммной техники Фейнмана проведено вычисление амплитуды процесса рождения мюон-антимюонной пары в результате аннигиляции электронов и позитронов высоких энергий в борновском порядке теории возмущений. Рассчитаны квадраты матричных элементов отдельно с учетом электромагнитного, слабого и интерференционного электрослабого вкладов. Показано, что все они должны быть учтены для корректного описания процесса рождения фермион-антифермионной пары. Выполнен численный анализ дифференциальных и полных сечений процесса, а также асимметрии вылета вперед-назад. Показано, что ультрарелятивистское приближение корректно описывает сечения процесса при энергиях взаимодействия частиц на линейных коллайдерах нового поколения. Сделаны выводы о перспективности исследования как Стандартной Модели электрослабого взаимодействия частиц, так и расширенных калибровочных моделей на базе процессов рождения фермионов.

**Ключевые слова:** линейные коллайдеры, Стандартная Модель, электрон-позитронные столкновения, сечение рождения.

## ВВЕДЕНИЕ

Линейные коллайдеры – одно из перспективных направлений экспериментальной физики высоких энергий [1,2]. Процессы столкновения лептонов позволяют сделать прецизионные измерения, необходимые для проверки Стандартной Модели и ее параметров. Рассматриваемый процесс, процесс взаимодействия электрон-позитронной пары с образованием мюон-антимюонной пары, является электрослабым в низшем порядке теории возмущений, поэтому эффекты слабого взаимодействия вносят значительный вклад [3-6]. Исследование этого процесса на базе экспериментальных данных планируемых линейных ускорителей нового поколения обладает эвристическим потенциалом как для подтверждения Стандартной Модели, так поиска эффектов «новой физики», выходящих за границы Стандартной Модели.

Величины, которых достигают сечения в низшем порядке, свидетельствуют о необходимости учёта высших порядков теории возмущений, так как эти поправки будут значительны [7].

## КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА

В работе рассматривается процесс

$$e^-(p_1) + e^+(-p_2) \rightarrow \mu^-(p'_1) + \mu^+(-p'_2), \quad (1)$$

где  $p_1, p_2, p'_1, p'_2$  – 4-импульсы начальных и конечных частиц.

Для ковариантного описания процесса (1) удобно использовать кинематические инварианты Мандельштама:

$$\begin{aligned} s &= (p_1 + p_2)^2 = (p'_1 + p'_2)^2, \\ t &\equiv -Q^2 = (p_1 - p'_1)^2 = (p_2 - p'_2)^2, \\ u &= (p_1 - p'_2)^2 = (p_2 - p'_1)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

связанные соотношением

$$s + t + u = 2m_e^2 + 2m_\mu^2. \quad (3)$$

Процесс (1) в борновском порядке теории возмущений описывается двумя диаграммами Фейнмана, представленными на рисунке 1.

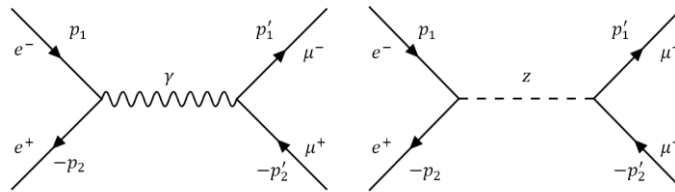


Рис. 1 – Диаграммы Фейнмана процесса мюон-антимюонного рождения в низшем порядке теории возмущений.

Первая диаграмма описывает процесс, обусловленный электромагнитным взаимодействием, а вторая – слабым.

В соответствие с приведенным выше диаграммам ставится матричный элемент процесса:

$$\langle f | S - 1 | i \rangle = N_{p_1} N_{p_2} N_{p'_1} N_{p'_2} M (2\pi)^4 \delta(p_1 + p_2 - p'_1 - p'_2). \quad (4)$$

Из полученного выражения можно извлечь матричный элемент процесса, с учетом тензорной структуры представимый в следующем виде:

$$M = C_{\alpha\beta} \bar{u}(p'_1) M \bar{u}(-p'_2) u(-p_2) A u(p_1), \quad (5)$$

где  $M$  и  $A$  – части тензорной структуры, включающие в себя гамма-матрицы Дирака.

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ

Квадрат матричного элемента может быть разделен на три вклада, описывающих отдельно электромагнитный, электрослабый и слабый вклады, соответственно:

$$|M|^2 = |M^{em}|^2 + 2\text{Re}|M^{em} M^{w*}| + |M^w|^2 = F^{EM} + F^{EW} + F^W. \quad (6)$$

Дифференциальное сечение процесса тогда может быть переписано как

$$d\sigma = \frac{1}{32\pi s(s - 4m_e^2)} |M|^2 dQ^2, \quad (7)$$

где инвариант  $Q^2 \equiv -t$  описывает эффективную передачу модуля импульса от начальных частиц к конечным.

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

На рисунке 2 изображены графики полных сечений исходного процесса при учете различных вкладов.

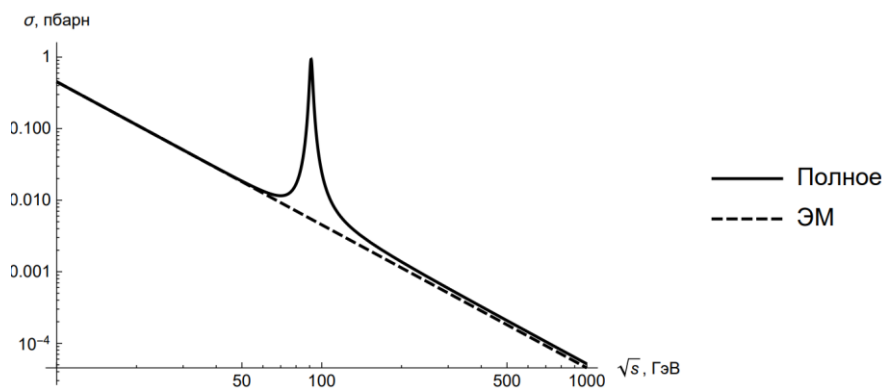


Рис. 2. Графики полных сечений исходного процесса при учете различных вкладов.

Можно увидеть, что при учете электрослабых эффектов появляется выраженный пик рождения массивного векторного бозона, достигающего значения 1 нбарн. При этом стоит отметить, что вклад

слабого вклада существенен лишь в малой области энергий, от 78 до 144 ГэВ, где превышает 1% от электромагнитного.

На рисунке 3 представлен график асимметрии, характеризующей отношение количества процессов, которые происходят с вылетом вторичных частиц в переднюю-заднюю полусферы детектора.

При энергии взаимодействия, равной энергии рождения  $Z$ -бозона, происходит смена знака величины асимметрии. При энергии, не превышающей  $M_Z$ , преобладают процессы с большими углами отклонений, а в области энергий, больших  $M_Z$  процессы – происходящие при минимальных углах отклонения вторичных частиц. На графике видны перегибы функции асимметрии, приводящие к наличию экстремальных значений асимметрии, достигающей по абсолютному значению 42% при нулевом угле обрезания.

Исследование ультрарелятивистского приближения показывает, что максимальное отличие от точного выражения составляет 0.2 % на пороге рождения мюон-антимюонной пары и резко падает ниже 0.01 % уже при энергии 0.1 ГэВ.

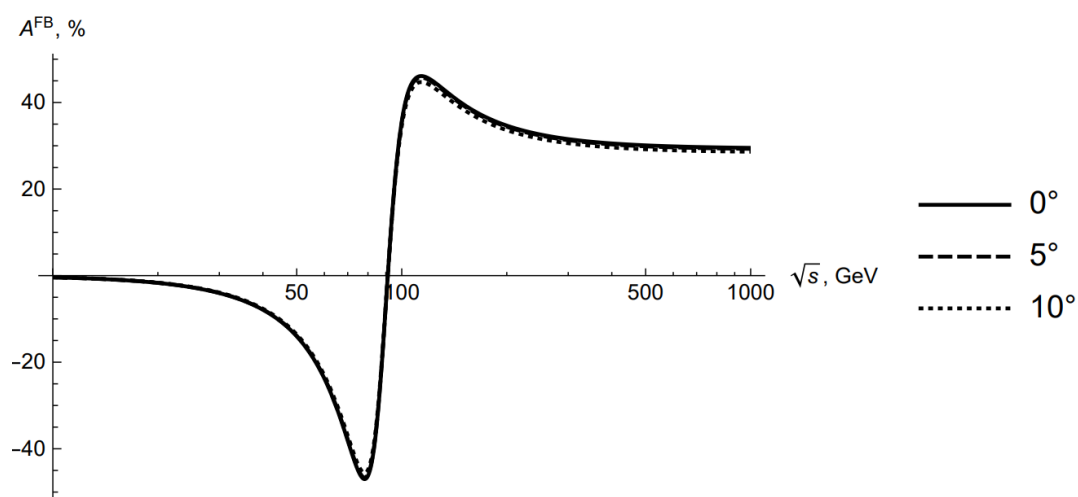


Рис. 3. Асимметрия рассеяния вперед-назад для различных значений угла обрезания.

Следовательно, ультрарелятивистское приближение даёт хорошие результаты при расчете процесса в низшем порядке теории возмущений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет матричного элемента, квадрата его модуля и сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  в древесном приближении. Выполнен численный анализ дифференциальных и полных сечений процесса и асимметрий вперед-назад для различных энергий взаимодействия, а также углов обрезания.

### Библиографические ссылки

1. Phinney N. ILC Reference Design Report / Phinney N. // SLAC-PUB, Stanford, 2007.
2. Гинзбург, И. Ф. Фотонные коллайдеры и исследование фундаментальных взаимодействий / И. Ф. Гинзбург ; Междунар. науч. фонд, Рос. фонд фундам. исследований // Российская наука: Выстоять и возродиться, Москва, С. 77-87, 1997.
3. Биленький С.М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия // ЛЕНАНД, Москва, 2014.
4. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля // Рег. и хаот. динамика, Ижевск, 2001.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая электродинамика // Наука, Москва, 1989.
6. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика // Наука, Москва, 1981.
7. Шишкина Т.В., Шумейко Н.М. Физика элементарных частиц: курс лекций // БГУ, Минск, 2002.

# ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

---

## РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТИВНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МУЛЬТИКИНАЗНЫХ ИНГИБИТОРОВ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Т. Д. Войтко

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*timvaitko@gmail.com;*

*науч. рук. – А.Д. Карпенко, ст. преп.*

Работа посвящена разработке генеративной нейронной сети для генерации мультикиназных ингибиторов. Мишенями являются нативная и мутантные киназы, в качестве основной архитектуры нейронной сети был выбран гетероэнкодер. При помощи полученной архитектуры были сгенерированы 1083 уникальные молекулы, некоторые из них по результатам докинга сравнимы с уже существующими ингибиторами по разным мишеням.

**Ключевые слова:** машинное обучение; нейронные сети; гетероэнкодеры; LSTM сети; полносвязные сети; ингибиторы нативной киназы; ингибиторы мутантной киназы.

Одной из нововведенных архитектур в докладах исследователей по машинному обучению и дизайну лекарств выступает модель гетероэнкодера, которая является усовершенствованием автоэнкодера. На данном этапе, основной задачей является построение самой архитектуры гетероэнкодера. Основное отличие гетероэнкодера от автоэнкодера есть способность обрабатывать сразу несколько представлений молекулы. В исследованиях гетероэнкодеров [3] рассматривают различные архитектуры автоэнкодеров, объединенные в гетероэнкодеры, экспериментируя с различными типами данных.

Также в задачу входит генерация молекул с заданными свойствами при помощи полученной генеративной модели: требуется получить ингибитор мультикиназа, который будет устойчив к множеству мутаций заболеваний лейкемии, будет иметь достаточно маленькую энергию связывания, будет содержать в своей структуре 2-ариламинопиримидин.

Принципиальное отличие нашей работы от уже существующих [1, 3] состоит в архитектуре гетероэнкодера, а также в выбранной функции потерь для обучения этого гетероэнкодера.

Концепт нашей работы заключается в следующем: для входных данных мы хотим получить их представление в латентном пространстве, то есть получить эмбединги, а далее, основываясь на этих эмбедингах

и задаваемой энергии связывания, мы хотим восстановить наши данные, а точнее восстановить строку формата SMILES и строку формата канонического SMILES.

Передавать энергию связывания будем декодирующему слою для достижения следующей цели: как известно, чем меньше энергия связывания, тем крепче связь ингибитор – белок, поэтому требуется разработать архитектуру, которой можно будет передавать желаемую энергию связывания для генерации. Для нас это значения от -14 до -10.

Для реализации данной задачи была разработана архитектура гетероэнкодера с тремя энкодерами и двумя декодерами, на рисунке 1 обзорно представлена архитектура модели. Энкодерами для строковых форматов была выбрана архитектура, состоящая из двух слоев LSTM, состояния из которых становятся эмбедингами и попадают на объединяющий слой.

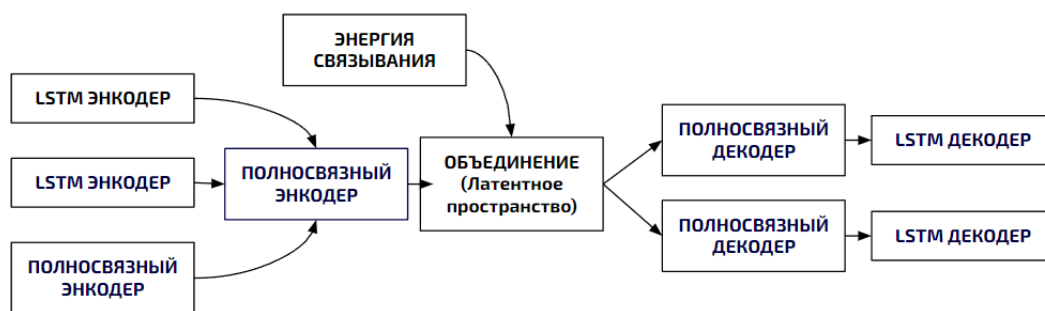


Рис. 1. Архитектура разработанного гетероэнкодера

Числовые характеристики обрабатываются полносвязной нейронной сетью прямого распространения, состоящей из двух полносвязных слоев, слоя батч-нормализации и еще одного полносвязного слоя, результаты работы последнего являются эмбедингами для числовых признаков. Все полученные выше эмбединги попадают на конкатенирующий слой, где образуют один вектор. После этот вектор нормализуется на слое батч-нормализации и передается на полносвязный слой, после чего к ним присоединяется желаемое значение энергии. Результаты работы этого слоя, то есть обработанные эмбединги и энергия, образуют латентное пространство.

Далее, полученные элементы латентного пространства подаются на декодеры. Они попадают на два несвязных полносвязных слоя, выходы которых нормализуются и подаются в качестве состояний на слой LSTM. В качестве входных данных для LSTM слоя были представлены те же данные, что и ожидаются на выходе из нейронной сети. Эта идея была реализована с целью улучшить работоспособность декодера и



быстрее обучить модель. Выходы из LSTM слоев подаются на полносвязные слои с функцией активации softmax.

Программную реализацию данной архитектуры осуществим при помощи библиотеки Keras, на основе выкладок из [2].

Весы модели обучим методом минимизации функции потерь. Наша функция потерь будет состоять из двух частей. Первая часть есть категориальная кросс-энтропия (*CCE*). Также, дополнительно введем функцию, которая будет учитывать специфику наших данных. Назовем ее CustomChemLoss (*CCL*). Данная функция будет штрафовать за не содержание в декодированной молекуле 2-ариламинопиримидина и также будет штрафовать в случае если декодированная формула не является валидной. *CCL* равен 0, если молекула валидна и содержит 2-ариламинопиримидин, равен 1, если молекула валидна, но не содержит вышеупомянутое вещество и равен 5, если молекула невалидна.

Таким образом, формула ошибки для нашей модели:

$$Loss = CCE + \alpha CCL,$$

где  $\alpha$  – коэффициент значимости химической ошибки, является гиперпараметром. В нашей работе мы выбрали значение  $\alpha = 0.1$ .

Тренировочными данными для нейросети являются 108410 уникальных молекул, представленные в четырех типах. Валидационные данные представлены в аналогичном формате, и их 27102 уникальных молекул. В качестве оптимизатора был выбран ADAM.

После обучения из валидационной выборки были выбраны 1000 лучших по энергии связывания молекул, на основе их мы получили представление латентного пространства при помощи модели. Добавляя к этим векторам гауссовский шум, мы посимвольно сгенерировали новые соединения при помощи декодеров. Так получили 1083 новые молекулы, которые предположительно являются ингибиторами мультикиназа. Они были проверены на валидность, интерпретируемость и содержание 2-ариламинопиримидина при помощи библиотеки rdkit. По итогам молекулярного докинга получены энергии связывания по двум мишеням, гистограммы которых представлены на рисунке 2. Левая гистограмма – энергия связывания по нативной киназе, правая – по мутантной киназе.

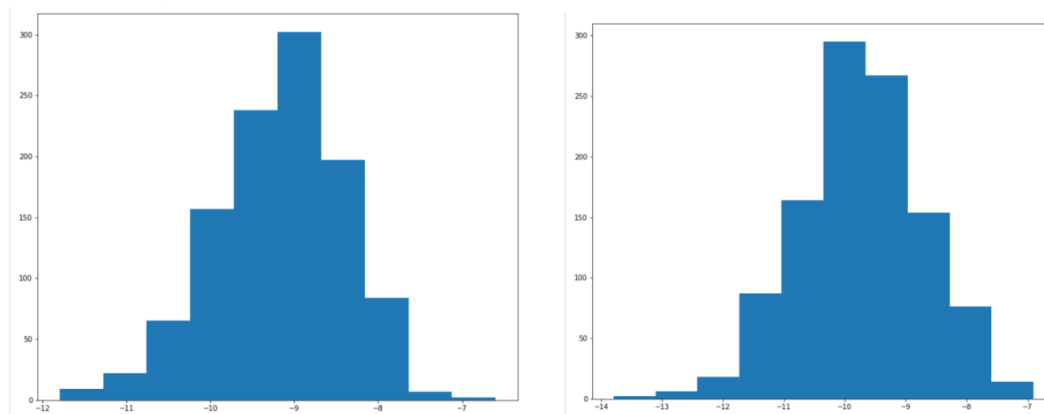


Рис. 2. Распределения энергий связывания

По данным распределениям можно говорить об предварительной успешности нашей работы: большое количество молекул находится в интересующем нас диапазоне, что позволяет перейти к дальнейшим исследованиям, таким как молекулярная динамика, сравнение с существующими ингибиторами по различным мишеням и т.д.

#### Библиографические ссылки

1. A De Novo Molecular Generation Method Using Latent Vector Based Generative Adversarial Network [Электрон.ресурс.] – [https://www.researchgate.net/publication/333912936\\_A\\_De\\_Novo\\_Molecular\\_Generation\\_Method\\_Using\\_Latent\\_Vector\\_Based\\_Generative\\_Adversarial\\_Network](https://www.researchgate.net/publication/333912936_A_De_Novo_Molecular_Generation_Method_Using_Latent_Vector_Based_Generative_Adversarial_Network)
2. Rowel Atienza, Advanced Deep Learning with Keras/Rowel Atienza. – Published by Packt Publishing Ltd. Livery Place 35 Livery Street Birmingham B3 2PB, UK. – 2018. – 369p.
3. Improving Chemical Autoencoder Latent Space and Molecular De Novo Generation Diversity with Heteroencoders [Электрон.ресурс.] – [https://www.researchgate.net/publication/328632724\\_Improving\\_Chemical\\_Autoencoder\\_Latent\\_Space\\_and\\_Molecular\\_De\\_Novo\\_Generation\\_Diversity\\_with\\_Heteroencoders](https://www.researchgate.net/publication/328632724_Improving_Chemical_Autoencoder_Latent_Space_and_Molecular_De_Novo_Generation_Diversity_with_Heteroencoders).

# ГЛУБОКОЕ МНОГОЗАДАЧНОЕ МЕТАОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

**А. М. Герасимчик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*hherasimchuk@gmail.com;*

*науч. рук. – В. В. Краснопрошин, д-р. техн. наук, проф.*

Задача глубокого обучения с подкреплением является важной задачей в сфере робототехники. В работе был предложен оригинальный подход, в котором для повышения эффективности и скорости обучения нейронной сети была использована многозадачная функция потерь с её стохастической аппроксимацией с одновременным возмущением. С помощью вычислительных экспериментов по обучению агента в среде ML1 фреймворка MetaWorld проведено сравнение предложенного способа с известным алгоритмом метаобучения MAML. Проведены эксперименты, результаты которых показывают, что представленные алгоритмы эффективнее как по качеству решения задачи, так и по скорости обучения, по сравнению с исходным алгоритмом.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, нейронная сеть, метаобучение, многозадачное обучение, глубокое обучение, глубокое обучение с подкреплением, обучение с подкреплением.

## ВВЕДЕНИЕ

Искусственные нейронные сети являются одним из основных и распространенных инструментов при создании интеллектуальных систем. Также, они активно используются для анализа данных в таких сферах, как робототехника, компьютерное зрение, обработка естественного языка и др. Процесс обучения нейронных сетей есть один из самых трудоемких этапов.

Несмотря на значительный научный прогресс в глубоком обучении с подкреплением, существующие алгоритмы не обладают достаточной эффективностью для решения задач в реальном мире. К тому же, такие алгоритмы требуют значительного количества времени на обучение, что усложняет процесс разработки. Для решения данных проблем в последнее время особенно актуально использование алгоритмов метаобучения или «обучения учиться». В работе предлагается подход к метаобучению с подкреплением с использованием многозадачного оптимизатора весов. Экспериментально показывается, что предлагаемый подход является более эффективным, чем известный алгоритм MAML.

## МНОГОЗАДАЧНОЕ ОБУЧЕНИЕ

Во время метаобучения с подкреплением традиционно вклад каждой задачи учитывается равным. Однако, такое обучение неэффективно, т. к. для решения каждой новой задачи нужно обучать нейронную сеть заново, что влечет большие затраты по времени. Для решения данной проблемы предлагается использование подхода многозадачного обучения.

Многозадачное обучение представляет такой подход, при котором модель обучается предсказывать несколько задач одновременно [1]. Было предложено использовать жесткое разделение параметров для всех скрытых слоев сверточной сети [3]. Таким образом, для всех задач используется одна нейронная сеть, а наличие нескольких задач отражается только на функции потерь. Для этой цели в [3] была предложена следующая многозадачная функция потерь:

$$\mathcal{L}_{\xi_t}^{MT}(\omega_t, \{Q_{t_i}\}_{i=1}^M) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{(\omega_t^{(i)})^2} \mathcal{L}_{\theta, t_i}(Q_{t_i}) + \sum_{i=1}^M \log(\omega_t^{(i)})^2 \quad (1)$$

где веса  $\omega_t$  являются гиперпараметрами.

Как показано в [4], производительность модели чрезвычайно чувствительна к выбору многозадачных весов  $\omega_t$ . В данной работе вопрос рассматривается с точки зрения оптимизации и предлагается использовать в качестве многозадачного оптимизатора весов подход стохастической аппроксимации с одновременным возмущением из-за их устойчивости к неопределенностям и успешного применения в различных задачах машинного обучения [5].

Для оптимизации нестационарной оптимизационной задачи из [3], предлагается алгоритм “SPSA-Delta”, где стохастический оптимизатор многозадачных весов строит следующие оценки многозадачных весов на итерации  $t$ :

$$\begin{cases} L_t^\pm = L_t(\hat{\omega}_{t-1} \pm \beta_t \Delta_t) \\ \hat{\omega}_t = \hat{\omega}_{t-1} - \alpha_t \Delta_t \frac{L_t^\pm - L_t^-}{2\beta_t} \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_t$  – наблюдения обучающего эпизода  $t$ ,  $\hat{\omega}_t$  – оценка  $\omega_t$ ,  $\Delta_t$  – вектор, состоящий из независимых случайных величин с

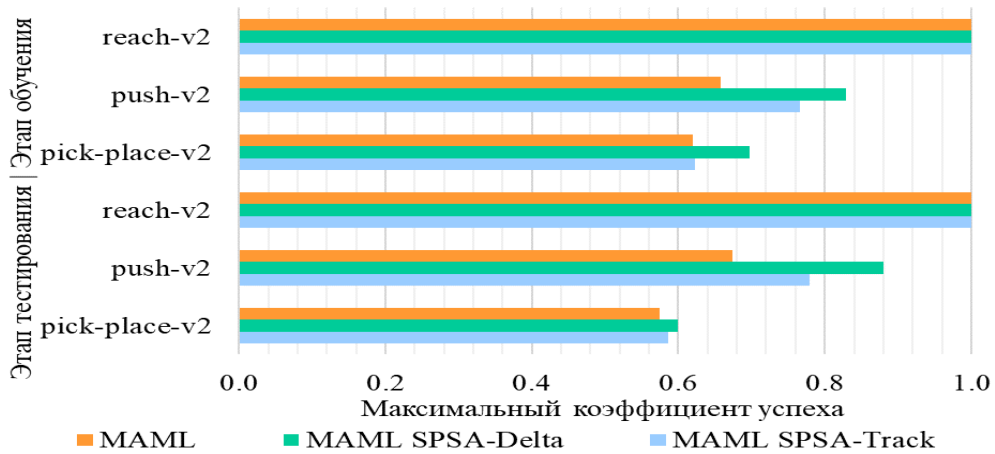
распределением Бернулли,  $\hat{\omega}_0$  — вектор с начальными значениями,  $\{\alpha_t\}$  и  $\{\beta_t\}$  — последовательности положительных чисел.

В многозадачном метаобучении можно наблюдать нестабильное изменение параметров  $\omega_t$ , которое влияет на обучение параметров модели. По этим причинам в качестве многозадачного оптимизатора весов предлагается использовать другой подход стохастической аппроксимации [6], назовем его “SPSA-Track”:

$$\begin{cases} L_{2t} = L_{2t}(\hat{\omega}_{2t-2} + \beta_n \Delta_t) \\ L_{2t-1} = L_{2t-1}(\hat{\omega}_{2t-2} - \beta_t \Delta_t) \\ \hat{\omega}_{2t-1} = \hat{\omega}_{2t-2} \\ \hat{\omega}_{2t} = \hat{\omega}_{2t-1} - \alpha_t \Delta_t \frac{L_{2t} - L_{2t-1}}{2\beta_t} \end{cases} \quad (3)$$

## ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов в области метаобучения с подкреплением в качестве базового алгоритма метаобучения для цикла внешней оптимизации был выбран алгоритм MAML, который является одним из самых цитируемых алгоритмов в данной области. Для цикла внутренней оптимизации использовался простой и популярный алгоритм REINFORCE.



Максимальный коэффициент успеха алгоритмов в тестовой среде ML1

В качестве прикладной задачи для решения и оценки эффективности разработанных алгоритмов рассмотрим тест ML1 в среде MetaWorld [7]. Алгоритмы оцениваются по трем задачам из ML1: reach-v2, push-v2, pick-place-v2, где варьируется или позиция, которую нужно достигнуть, или целевая позиция объекта. Позиции цели не указаны в состояниях

мира, что вынуждает алгоритмы метаобучения с подкреплением адаптироваться к цели методом проб и ошибок.

На рисунке представлен максимальный коэффициент успеха, усредненный по 5 запускам, в тестовой среде ML1 MetaWorld. Исходя из полученных результатов, видно, что все 3 алгоритма отлично справляются с решением задачи reach-v2 как на этапе обучения, так и на этапе тестирования.

На более сложных задачах push-v2 и pick-place-v2 алгоритм MAML SPSA-Delta является более эффективным среди всех рассмотренных. Улучшение относительно базового алгоритма составило 17% на этапе обучения и 21% на этапе тестирования на задаче push-v2, 8% и 3% на задаче pick-place-v2 соответственно. Однако, на задаче pick-place-v2 способность метода MAML SPSA-Delta к обобщению не сильно выше алгоритма MAML SPSA-Track (60% у MAML SPSA-Delta и 59% у MAML SPSA-Track).

**Максимальный коэффициент успеха, усредненный по всем задачам тестовой среды ML1**

Алгоритмы	Этап обучения	Этап тестирования
MAML	76%	75%
MAML SPSA-Delta	84%	83%
MAML SPSA-Track	80%	79%

В таблице представлено сравнение среднего максимального коэффициента успеха, достигнутого каждым алгоритмом в тестовой среде ML1.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исходя из результатов экспериментов в тестовой среде ML1 MetaWorld тремя различными методами глубокого метаобучения с подкреплением: исходным алгоритмом MAML, MAML SPSA-Delta, MAML SPSA-Track, предложенный метод MAML SPSA-Track показывает улучшение эффективности в среднем на 4%, а MAML SPSA-Delta на 8% соответственно. Более того, последний затрачивает в среднем в 2 раза меньше времени на обучение на задачах push-v2 и pick-place-v2. Согласно полученным результатам, видно, что использование многозадачной функции потерь и её стохастической аппроксимации с одновременным возмущением позволяет значительно улучшить эффективность алгоритмов глубокого обучения с подкреплением.

### **Библиографические ссылки**

1. Zhang Y., Yang Q. An overview of multi-task learning / Y. Zhang, Yang Q. // National Science Review. – 2018. – P. 30–43

2. Ruder S. An overview of multi-task learning in deep neural networks / S. Ruder // In 2017 European Control Conference (ECC). – 2017. – P. 301-312
3. Boiarov A., Granichin O., Granichina O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for few-shot learning / A. Boiarov, O. Granichin, and O. Granichina // In 2020 European Control Conference (ECC). – 2020. – P. 350–355
4. Kendall A., Gal Y., Cipolla R. Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics / A. Kendall, Y. Gal, R. Cipolla // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2018. – P. 7482–7491
5. Granichin O., Volkovich Z. Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining / O. Granichin, Z. Volkovich // Intelligent Systems Reference Library. Springer Nature. – 2015. – P. 136–159
6. Granichin O., Amelina N. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances / O. Granichin, N. Amelina IEEE Transactions on Automatic Control. – 2014. – P. 1653–1658
7. Yu T., Quillen D., He Z. Meta-World: A Benchmark and Evaluation for Multi-Task and Meta Reinforcement / T. Yu, Quillen D., Z. He // CoRL 2019. – 2019. – P. 203-231.

# АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА СПЕКУЛЯТИВНЫХ ПУЗЫРЕЙ НА РЫНКЕ КРИПТОВАЛЮТ

Т. В. Голод

Белорусский государственный университет, г. Минск;

e-mail: tiholad@gmail.com;

науч. рук.: Малюгин В.И., канд. физ.-мат. наук, доц.

**Ключевые слова:** рынок биткоин, спекулятивные пузыри; тесты «взрывного поведения» курсов активов; модель MS-GARCH.

В статье решается задача выявления спекулятивных пузырей (*speculative bubbles*) [1] на рынке криптовалют с использованием моделей с переключениями состояний [3] для временного ряда доходности и статистических тестов «взрывного поведения» (*explosive behaviors*) курсов финансовых активов [2]. Для описания дневной доходности криптовалюты Биткоин в условиях характерной для рынка циклической смены классов состояний «спада» и «подъема» волатильности доходности используется модель обобщенной условной гетероскедастичности с марковскими переключениями состояний MS-GARCH (*Markov-Switching Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedastic model*) [4]. Алгоритм обнаружения спекулятивного пузыря основывается на выявлении периодов «взрывного» поведения курса биткоина при росте волатильности рынка с помощью статистического теста GSADF (*Generalized Supremum Augmented Dickey-Fuller*) [2].

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается стремительный рост рынка криптовалют. Благодаря этому возникают большие возможности для создания алгоритмических торговых стратегий, основанных на использовании эконометрических моделей и методов анализа, реализуемых с помощью «программ-роботов», работающих в режиме регулярного обновления данных высокой частоты. Использование таких стратегий вместо «ручных» является общемировым трендом и позволяет получать преимущество в виде значительно большей доходности [5]. Наибольшая ожидаемая доходность на рынке криптовалют связана с ранним обнаружением моментов смены состояний рынка «спад» и «подъем», а также «спекулятивных пузырей», т.е. аномально стремительного роста курса криптовалюты.



Рынок Биткоин является доминирующим по объему сделок и капитализации, что объясняет его значительное влияние на иные криптовалютные рынки [6].

В данной работе для обнаружения «спекулятивных пузырей» на рынке Биткоин используется алгоритм, основанный на применении двух «инструментов»: эконометрической модели дисперсии доходности MS-GARCH для оценивания поворотных точек состояний «спад» и «подъем» и статистических тестов «спекулятивных пузырей» GSADF и BSADF, которые используются в состоянии «рост».

### МОДЕЛИ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ УСЛОВНОЙ ГЕТЕРОСКЕДАСТИЧНОСТИ С МАРКОВСКИМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ

Модель MS-GARCH (*Markov-Switching Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedastic model*) имеет вид [4]:

$$y_t = \sigma_t u_t,$$

$$\sigma_t^2 = w_{s_t} + \alpha_{s_t} y_{t-1}^2 + \beta_{s_t} \sigma_{t-1}^2,$$

где  $u_t \sim N(0,1)$ ,  $w_{s_t} > 0$ ,  $\alpha_{s_t} \geq 0$ ,  $\beta_{s_t} \geq 0$ , а  $\{s_t\}$  – однородная цепь Маркова на пространстве двух классов состояний  $\{s_t = 1 - \text{"спад"}, s_t = 2 - \text{"рост"}\}$ , с переходными вероятностями  $\{\eta_{ij} = P(s_{t-1} = j)\}$  и вероятностями классов  $\{\pi_i\}$  ( $i, j = 1, 2$ ).

Для проведения экспериментальных исследований использовался язык программирования R и библиотека MSGARCH. Для временного ряда дневной доходности биткоина в период с 1 января 2017 года и по 13 мая 2022 года была построена следующая модель MS-GARCH:

$$\sigma_t^2 = 0.0957 \xi_{t-1}^2 + 0.8995 \sigma_{t-1}^2, \text{ при } s_t = 1$$

$$\sigma_t^2 = 0.0234 \xi_{t-1}^2 + 0.9756 \sigma_{t-1}^2, \text{ при } s_t = 2$$

По результатам построения модели график вероятности режима  $s_t = 2$  имеет вид:

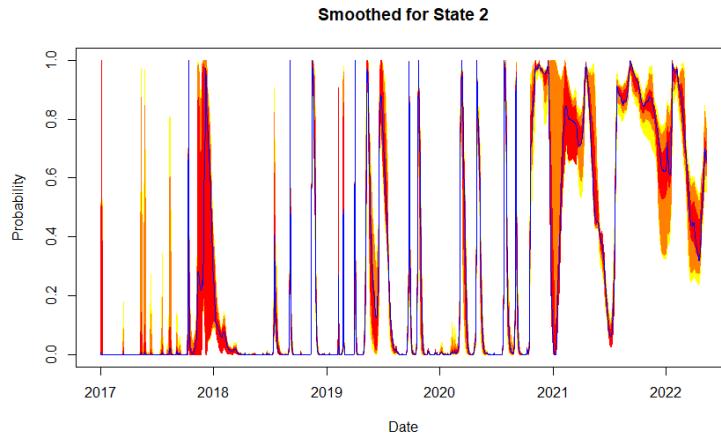


Рис. 1. График вероятности режима  $s_t = 2$  в каждый момент времени (синяя линия), доверительный интервал 2 s.e. для вероятности режима  $s_t = 2$  (оранжевые области)

На рисунке 1 ось ординат – вероятность принятия в качестве текущего режима  $s_t = 2$ , синяя линия – наиболее вероятное значение вероятности наличия режима  $s_t = 2$  в каждый момент времени, оранжевые области – доверительные интервалы значения вероятности в каждый момент времени, которые были получены по результатам оценивания параметров модели методом Монте-Карло [4].

Второй режим ( $s_t = 2$ ), связанный со всплесками высокой волатильности, наблюдается с ноября 2017 года и по март 2018 года, а также в июне 2019 года и с конца 2020 года и по май 2022 года. Данные периоды ассоциируются с образованием и «схлопыванием» спекулятивного пузыря. Помимо этого, встречаются короткие периоды высокой волатильности, которым соответствуют кратковременные коррекции курса Биткоин. В реальных приложениях для идентификации выделенных временных интервалов высокой волатильности доходности и образования спекулятивного пузыря необходимо специальное тестирования временного ряда курса рассматриваемого актива на предмет «взрывного» поведения.

### ТЕСТ «ВЗРЫВНОГО» ПОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ

Для тестирования на наличие «взрывного» поведения рынка, характерного для образования спекулятивного пузыря, используется тест GSADF (*Generalized Supremum Augmented Dickey-Fuller*), чья эффективность оказалась большей в сравнении с альтернативными методами [2].

Нулевая гипотеза  $H_0$  теста GSADF заключается в том, что на рассматриваемом интервале наблюдения отсутствует «взрывное» поведение, альтернатива  $H_1: \underline{H_0}$  (отрицание  $H_0$ ).

Статистика теста вычисляется по формуле

$$GSADF(r_0) = \sup ADF_{r_1}^{r_2}, r_1 \in [0, r_2 - r_0], r_2 \in [r_0, 1],$$

где 0 – начало выборки, 1 – конец выборки на рассматриваемом интервале,  $r_1$  – номер первого наблюдения подвыборки на которой вычисляется правосторонняя статистика ADF,  $r_2$  – номер последнего наблюдения подвыборки, в качестве  $r_0$  берется минимальный номер, позволяющий оценить коэффициенты регрессионного уравнения ADF-теста.

Нулевая гипотеза об отсутствии пузыря отклоняется в том случае, если статистика GSADF больше критического значения  $\Delta(\varepsilon)$  на уровне значимости  $\varepsilon$ :

$$H_0 \text{ не отклоняется, если } GSADF \leq \Delta(\varepsilon),$$

$$H_0 \text{ отклоняется, если } GSADF > \Delta(\varepsilon).$$

Второй этап заключается в поиске интервалов выборки, в рамках которых процесс является «взрывным» с помощью статистики BSADF (*Backward Supremum Augmented Dickey-Fuller*):

$$BSADF_{r_2}(r_0) = \sup ADF_{r_1}^{r_2}, r_1 \in [0, r_2 - r_0].$$

Нулевая гипотеза  $H_0$  статистики BSADF заключается в том, что рассматриваемая подвыборка лежащая в интервале  $[r_1, r_2]$  является «взрывным» процессом. В таком случае моменты начала и окончания «взрывного» поведения вычисляются следующим образом:

$$\hat{r}_e = \inf\{r_2: BSADF_{r_2}(r_0) > \Delta(\varepsilon)\}, r_2 \in [r_0, 1]$$

– оценка момента начала пузыря,

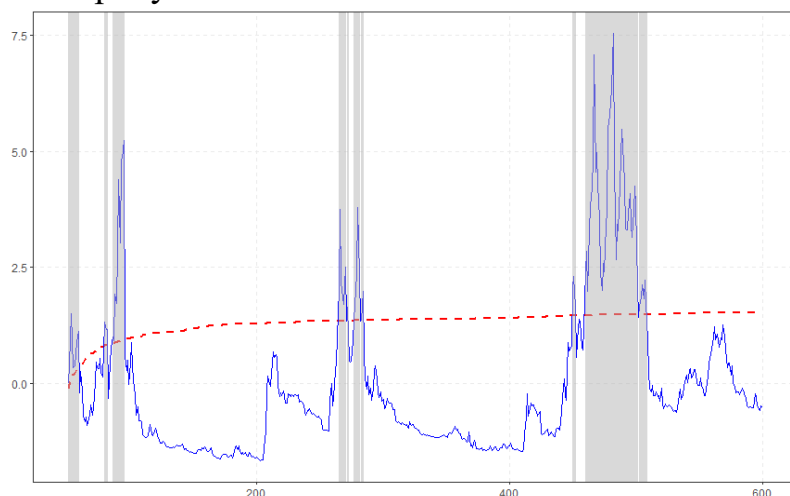
$$\hat{r}_f = \inf\{r_2: BSADF_{r_2}(r_0) < \Delta(\varepsilon)\}, r_2 \in [\hat{r}_e + \delta \log(T)/T, 1]$$

– оценка момента окончания пузыря,

где  $\Delta(\varepsilon)$  критическое значение статистики BSADF на уровне значимости  $\varepsilon$  на основании  $r_2$  наблюдений [2].

Для проведения экспериментальных исследований использовался язык программирования R и библиотека Eхuber. Итоговые результаты

метода обнаружения «взрывного» поведения для ряда курса биткоина в промежутке от 11 марта 2017 года по 10 февраля 2022 года представлены на рисунке 1.



*Рис. 2.* Иллюстрация работы теста BSADF: временной ряд курса биткоина (синяя линия), критические значения статистики критерия (красная линия), периоды «взрывного» поведения курса биткоина (серые вертикальные полосы)

Таким образом с помощью теста GSADF определены периоды «взрывного» поведения в конце 2017 года, в середине 2019 года и в первом полугодии 2021 года, что соответствует периодам формирования спекулятивного пузыря на рынке биткоина и совпадает с разворотными точками перехода к режиму высокой волатильности построенной модели MS-GARCH.

#### Библиографические ссылки

1. Малюгин В.И. Рынок ценных бумаг: Количественные методы анализа / В.И. Малюгин. – Москва: Дело, 2003. – 320 с.
2. Phillips P. C. B., Shi S., Yu J. Testing for multiple bubbles: Historical episodes of exuberance and collapse in the S&P 500 // *International Economic Review*. – 2015. – Т. 56. – №. 4. – С. 1043-1078.
3. Hamilton J.D. Regime-Switching Models / J.D. Hamilton – University of California, 2005. – 15 с.
4. Bauwens L., Preminger A., Rombouts J.V.K. Theory and inference for a Markov switching GARCH model / L.Bauwens, A. Preminger, J.V.K. Rombouts. – CORE, 2007. – Т. 55. – 26 с.
5. Криптовалюты: тренды, риски, меры [Электронный ресурс] [www.crb.ru](http://www.crb.ru) – Режим доступа: [https://www.crb.ru/Content/Document/File/132241/Consultation\\_Paper\\_20012022.pdf](https://www.crb.ru/Content/Document/File/132241/Consultation_Paper_20012022.pdf). – Дата доступа 26.04.2022
6. Global Crypto Index 2021 [Электронный ресурс] [research.binance.com](https://research.binance.com) – Режим доступа: [https://research.binance.com/static/pdf/Global\\_Crypto\\_Index\\_2021.pdf](https://research.binance.com/static/pdf/Global_Crypto_Index_2021.pdf). – Дата доступа 08.05.2022

# МУЛЬТИСТРАНОВОЙ АНАЛИЗ ТИПОЛОГИИ ПАНДЕМИИ COVID-19 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**А. К. Корниевич, В. И. Малюгин**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*kosasha998@gmail.com, Malugin@bsu.by;*

*научн. руков. – В.И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье представляются результаты мультистранового анализа интенсивности протекания пандемии COVID-19 в 30 странах европейского региона на основе методов кластерного анализа и предлагаемых статистических индикаторов пандемии COVID-19 на страновом и мультистрановом уровне.

**Ключевые слова:** пандемия COVID-19, мультистрановой анализ, статистические индикаторы COVID-19, панельные данные, кластерный анализ.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблеме анализа пандемии COVID-19 в различных аспектах уделяется значительное внимание в мировой научной литературе. Важным направлением в рамках проводимых исследований является разработка методов статистического анализа доступных в режиме регулярного обновления мультистрановых данных по основным показателям пандемии COVID-19 [1].

Целью данного исследования является решение следующих задач: 1) разработка статистических методов классификации стран европейского региона по интенсивности протекания пандемии COVID-19, начиная с первой волны; 2) построение статистических индикаторов, характеризующих интенсивность пандемии; 3) разработка программного обеспечения, реализующего предлагаемые алгоритмы в режиме регулярного обновления данных.

Для решения указанных задач используется подход к анализу панельных данных с кластерной структурой в условиях «самообучения», позволяющий осуществлять статистическую классификацию стран в пространстве сформированных признаков по панельным данным с помощью методов кластерного анализа [2].

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПОДХОДА

В общем случае предполагается, что доступные данные эпидемического процесса представляют собой совокупность значений  $N$

показателей, полученных для некоторой выборки стран объема  $n$ , в моменты времени  $t (t = 1, \dots, T)$ , то есть представляют панельные данные вида:

$$x_{i,t} = (x_{i1,t}, \dots, x_{iN,t})' \in \mathfrak{R}^N (i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T).$$

В контексте задачи анализа эпидемического процесса COVID-19 панельные данные имеют неоднородную кластерную структуру. Наиболее важным фактором неоднородности является различие стран по латентному признаку, характеризующему степень интенсивности протекания эпидемического процесса COVID-19. По данному свойству страны могут быть отнесены к одному из  $L$  классов. Указанное свойство выражается дискретной переменной  $d_{it} \in \{1, \dots, L\}$ , указывающей на номер класса, к которому относится страна  $i$  в момент времени  $t$ .

*Задача статистической классификации* состоит в отнесении организаций по наблюдениям  $\{x_{i,t}\}$  к одному из  $L$  классов, то есть в оценивании матрицы классификаций  $D = \{d_{i,t}\} (i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T)$ .

На основе имеющихся статистических данных для всех стран рассчитываются показатели, которые используются в качестве классификационных признаков в алгоритмах кластерного анализа выборки  $\{x_{i,t}\} (i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T)$  в пространственном представлении, включая:

- отношение числа закрытых случаев к общему числу инфицированных (*Closed to Total*);
- отношение числа закрытых случаев к числу активных случаев (*Closed to Active*);
- ежедневные темпы роста общего числа заражений или отношение текущего значения заболевших к предыдущему (*Total Infections Daily Rate*);
- уровень смертности - доля летальных исходов от общего числа официально зарегистрированных случаев COVID (*Death Rate*).

Осуществляется нормировка признаков к интервалу  $(0,1)$  таким образом, что близкие к нулю значения соответствуют более благоприятному течению эпидемического процесса и наоборот.

На основе полученной с помощью алгоритмов иерархического кластерного анализа и  $K$ -средних [3] матрицы классификаций

$D = \{d_{i,t}\}$  для рассматриваемого временного интервала рассчитываются следующие статистические показатели процесса COVID-19:

- $d_{it} \in \{1, 2, 3\}$  – *ежедневный страновой рейтинг (Daily Country Rating)*, характеризующий степень интенсивности протекания эпидемии в течение рассматриваемого временного интервала для отдельной страны;
- *средние страновые рейтинги (Average Country Ratings – ACR)* за весь временной интервал:

$$ACR_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T d_{it} \in [1,3], i = 1, \dots, n;$$

- *интегральный мультистрановой индикатор COVID-19 (Integral Multicounty Indicator – IMI)*:

$$IMI_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{it}$$

В ходе проведенных исследований установлено существование трех ( $L=3$ ) устойчивых кластеров (классов) стран, различающихся интенсивностью протекания эпидемического процесса COVID-19, которые имеют следующую интерпретацию:

- 1 класс – страны с относительно низкой интенсивностью процесса;
- 2 класс – страны со средней интенсивностью процесса;
- 3 класс – страны с наиболее активной интенсивностью процесса.

Дискриминационные способности используемых классификационных признаков демонстрируются на рисунке 1 и в таблице 1.

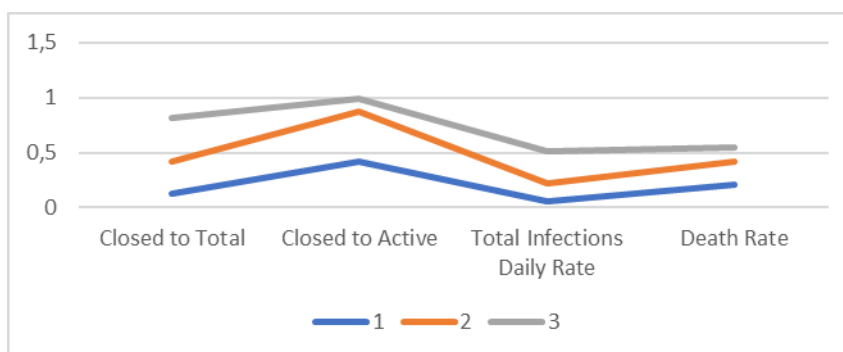


Рис. 1. График центров трех кластеров 1, 2, 3

На рисунках 2 и 3 представлены соответственно графики ежедневных рейтингов стран из класса 1 и результаты ранжирования всех стран по среднему страновому рейтингу для всего периода наблюдения.

### Средние значения признаков для различных классов

Классы и выделенных страны	Анализируемые показатели			
	Closed to Total	Closed to Active	Total Infections Daily Rate	Death Rate
1	0.126	0.422	0.058	0.21
2	0.422	0.88	0.22	0.42
3	0.814	0.986	0.51	0.552

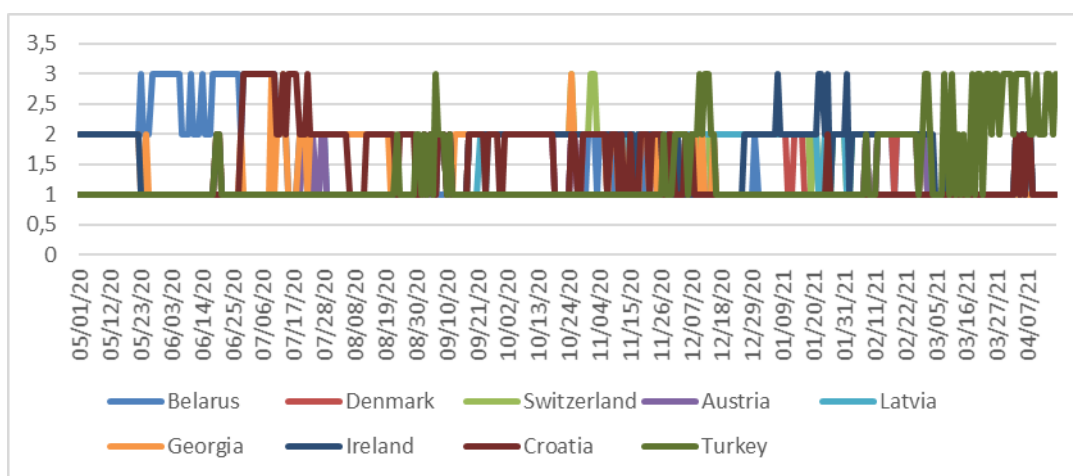


Рис. 2. Динамика ежедневных страновых рейтингов для стран из класса 1 с более благоприятным течением эпидемии

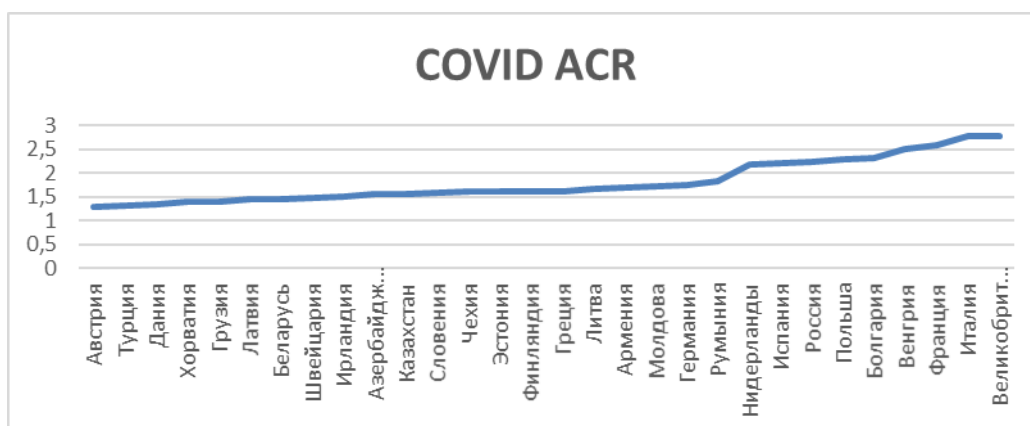


Рис. 3. Ранжирование стран по среднему страновому рейтингу ACR для всего периода наблюдения



### Библиографические ссылки

1. Worldometers.info [Electronic resource] – Mode of access: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> – Date of access: 27.02.2022.
2. *Malugin, V.I.* Statistical analysis and econometric modelling of the creditworthiness of non-financial companies / V.I. Malugin, N.V. Hryn, A.Yu. Novopol'tsev // Int. J. Computational Economics and Econometrics. – 2014. – Vol. 4(1/2). – P. 130-147.
3. *Харин, Ю.С.* Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, М.С. Абрамович. – Минск: БГУ. 2008. –451 с.

# РЕАЛИЗАЦИЯ КОМАНДНОГО ИНТЕРПРЕТАТОРА ДЛЯ UNIX-ПОДОБНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д. П. Лебедев

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*daniel.lebedzeu@gmail.com;*

*науч. рук. — В. В. Горячкин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье рассматриваются вопросы разработки командного интерпретатора, способного работать под управлением Unix-подобных операционных систем. Уделено внимание изучению места командных интерпретаторов среди средств организации пользовательского интерфейса и современных командных оболочек Unix-систем. Кроме этого, освещены такие аспекты разработки интерпретатора, как проектирование входного языка интерпретатора на основе выдвинутых требований, простота разбора этого языка и внутреннего устройства его анализаторов, а также техническая реализация конструкций, поддерживаемых им. Практическая значимость проведенного исследования состоит в возможности использования разработанного интерпретатора в реальных ситуациях и его улучшения при необходимости.

**Ключевые слова:** Unix; пользовательский интерфейс; командный интерпретатор; формальный язык; процесс разбора.

Среди видов пользовательского интерфейса выделяется *интерфейс командной строки*, также именуемый *текстовым*. Суть его состоит в том, что пользователь вводит с клавиатуры *команды*, предписывающие выполнить то или иное действие. После ввода команды исполняются компьютером, а результаты выводятся на экран. Для этого используется специальная программа, называемая *командным интерпретатором* или *оболочкой командной строки*.

Одно из важнейших мест интерфейс командной строки в целом и командные интерпретаторы в частности занимают в операционных системах семейства Unix. Такое положение обусловлено прежде всего тем, что уже в начале истории Unix в целом завершилось формирование классической *командной оболочки Unix* вместе с достаточно богатым набором ее возможностей, включавшим в том числе поддержку управляющих конструкций (ветвлений и циклов) [1]. Классическая оболочка Unix также называется *Bourne shell* по имени своего создателя Стивена Борна или *sh* по названию своего бинарного файла.

Современные интерпретаторы также поддерживают многие другие возможности, не связанные напрямую с исполнением команд, — автодополнение команды (в том числе программируемое), хранение истории команд и прочее.

В современных Unix-системах наиболее широко распространены следующие командные интерпретаторы:

- *bash* (*BourneAgainShell*) — наиболее популярный интерпретатор для Linux, который обратно совместим с *sh*, но поддерживает и ряд собственных расширений;

- *ksh* (*KornShell*) — альтернативный *sh*-совместимый интерпретатор, который отличается лучшей поддержкой сценариев;

- *tcsh* — интерпретатор, основанный на *csh* (*CShell*), основной особенностью которого является синтаксис входного языка, приближенный к синтаксису Си, основная оболочка для пользователя *root* в системе FreeBSD;

- *fish* (*FriendlyInteractiveShell*) — интерпретатор, рассчитанный прежде всего на интерактивное использование и поддерживающий такие возможности, как подсветка синтаксиса, отображение подсказки и краткая справка по команде;

- *zsh* (*ZShell*) — *sh*-совместимый интерпретатор, который объединяет в себе возможности всех предыдущих [2].

Разработанный интерпретатор отличается минимализмом по возможностям в сравнении с рассмотренными: так, не поддерживаются не только автодополнение или история команд, но даже управляющие конструкции. Тем не менее, основные возможности интерпретаторов поддерживаются на уровне входного языка, что уже позволяет использовать его для решения реальных задач. Кроме того, за счет дизайна интерпретатора возможно расширять его возможности, не влияя при этом на уже реализованную функциональность.

Интерпретатор состоит из следующих частей: модуль разбора, состоящий из лексического и синтаксического анализаторов, модуль функциональности, который реализует возможности интерпретатора, и главный модуль, который связывает два предыдущих модуля воедино.

Реализованные возможности интерпретатора включают в себя:

- запуск одиночных команд и перенаправление потоков ввода-вывода для них, а также открытие/дублирование потоков ввода-вывода под произвольным номером дескриптора;

- объединение команд в так называемые связки:

- конвейеры — связки, в которых стандартный вывод команды непосредственно связан со стандартным выводом следующей команды;

- условные связки, в которых исполнение очередной команды зависит от того, успешно ли выполнялась предыдущая команда;

- безусловные связки: фоновое выполнение предыдущей команды, последовательное выполнение команд.

Все связки, реализованные в интерпретаторе, являются левоассоциативными, то есть составляющие их команды и связки

исполняются слева направо. Кроме того, для команд и связок действует приоритет: сначала исполняются одиночные команды, затем конвейеры, затем условные связки, затем безусловные.

Эти возможности командного интерпретатора нашли свое воплощение в конструкциях входного языка.

Разбор этого языка разделяется на две части: лексический и синтаксический анализ. Такое разбиение обычно для процесса разбора вообще, поскольку позволяет достичь сразу нескольких выгод: упрощения целевой грамматики, разделения обязанностей и возможности генерировать один и тот же поток лексем при разных кодировках[3].

Для генерации лексем используется отдельный лексический анализатор, представляющий собой детерминированный конечный автомат, который сохраняет свое состояние и накопленную часть лексем. Когда автомат решит, что очередная лексема готова, он передает ее наружу. Также каждому состоянию соответствует свой обработчик. Таким образом, добавление новых лексем представляет собой простой процесс: достаточно написать новый обработчик состояния или состояний, соответствующих новой лексеме, а также добавить все нужные переходы, не меняя при этом существующих.

Для построения синтаксического анализатора используется контекстно-свободная грамматика, нетерминальные символы которой соответствуют той или иной конструкции (команде, связке), а терминальные — той или иной лексеме (слову, составляющему команду, а также служебным символам). Грамматика входного языка принадлежит классу  $SLR(1)$  и, следовательно, допускает сравнительно простой алгоритм табличного разбора, а вместе с тем и простое и детерминированное построение новой таблицы по известному алгоритму (см. [3]), что дает возможность быстрого расширения грамматики.

Исполнение команды происходит путем обхода подготовленного дерева разбора в глубину. Подготовка состоит в том, что из дерева удаляются все бесполезные вершины, которые усложняют реализацию конструкций языка. При этом при посещении очередной вершины дерева вызываются обработчики, соответствующие ее типу, что опять-таки позволяет поддержать добавление новых конструкций.

Если для исполнения одиночной команды необходимо запустить программу, то интерпретатор порождает для нее отдельный процесс системным вызовом *fork*, после подготовительных действий запускает программу вызовом *execv*. Использование именно этого вызова оправдано тем, что он позволяет запускать все программы из

директорий, перечисленных в переменной окружения PATH[4], то есть практически все программы, установленные в системе.

В подготовительные действия входит в том числе перенаправление потоков ввода-вывода, которое состоит из открытия необходимых файлов и дублирования дескрипторов при помощи системного вызова *dup2*.

Конвейер организуется при помощи связывания стандартных потоков, составляющих команду, посредством анонимного канала, при этом каналов необходимо ровно на один меньше, чем число команд в конвейере.

Для организации условных связей необходимо поддерживать статус последней команды, что можно сделать, если запомнить статус, возвращенный системным вызовом *waitpid*; при этом успешно завершившейся командой считается та команда, которая завершилась сама (то есть не по сигналу) с кодом 0.

Наконец, фоновые команды организуются следующим образом. Для их исполнения порождается отдельный процесс, который и проинтерпретирует поддерево разбора, соответствующее команде. При этом интерпретатор не ожидает его выполнения, но может получить информацию о его исполнении в будущем.

Исходный код интерпретатора размещен автором в GitHub-репозитории, который можно просмотреть по ссылке [5].

Реализованный интерпретатор, с одной стороны, достаточно минималистичен, то есть включает в себя лишь необходимый минимум функций. Как следствие, после компиляции получается бинарный файл, размер которого невелик относительно других интерпретаторов (порядка 120 КБ против более чем 1 МБ у того же *bash*). Таким образом, он может найти свое применение в ситуациях, когда размер доступной памяти имеет значение (например, во встраиваемых системах). Его также можно относительно просто обогащать новыми конструкциями за счёт особенностей его архитектуры (таких как наличие отдельных обособленных друг от друга обработчиков).

#### Библиографические ссылки

1. *StephenR. Bourne*. TheUnixshell // BYTE. 1983. Volume 8, Number 10.
2. Which Linux Shell Is Best? 5 Common Shells Compared // makeuseof.com. URL: <https://www.makeuseof.com/tag/best-linux-shells> (дата обращения: 27.05.2022).
3. *AlfredV. Ahoetal*. Compilers: principles, techniques, andtools. 2nded. Boston: PearsonEducation, 2007. 1009 p.
4. *exec(3)* — Linux manual page. URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man3/exec.3.html> (дата обращения: 27.05.2022).
5. *alphaver/dipsh*. URL: <https://github.com/alphaver/dipsh> (дата обращения: 27.05.2022).

# МАДЭЛЬ АПТЫМАЛЬНАГА ПЛАНАВАННЯ РАБОТ ПА ПРАВЕРЦЫ І РАМОНЦЕ ГРУЗАВЫХ КАНТЭЙНЕРАЎ З МАГЧЫМАСЦЮ АДМОВЫ

М. М. Лукашэвіч, М. Я. Кавалёў

<sup>1</sup> *Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, г. Мінск;  
mikhail.n.lukashevich@gmail.com;*

<sup>2</sup> *Аб'яднаны інстытут праблем інфарматыкі НАН Беларусі, г. Мінск;  
kovalyov\_my@newman.bas-net.by;*

*науч. рук. — М. Я. Ковалёв, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. НАНБ*

Разглядаецца праблема аптымальнага планавання работ па праверцы і рамонце грузавых кантэйнераў на некалькіх аб'ектах на працягу часу. Ёсць грузавыя кантэйнеры розных тыпаў. Яны прыбываюць у порт, іх разглядаюць на патрэбу пачынкi і пры неабходнасці чыняць, каб яны працявалі служыць карыстальніку. Кантэйнеры прыбываюць для праверкі на пляцоўцу  $0$ , а рамантуюцца на  $F$  іншых пляцоўках. Чыстка кантэйнераў разглядаецца як від рамонту. Любы кантэйнер можа мець адзін з  $q$ ,  $q=0,1,\dots,Q+1$ , узроўняў якасці. Кантэйнеры ўзроўню якасці  $0$  выкарыстоўваюцца для задавальнення зададзеных патрабаванняў кантэйнераў без патрэбы рамонта. Кантэйнеры ўзроўню якасці  $Q+1$  утылізуюцца і не могуць быць выкарыстаны для задавальнення патрабаванняў. Неабходна знайсці план размеркавання кантэйнераў на кожным этапе іх апрацоўкі на пляцоўках, каб звесці да мінімуму агульны кошт. Пры гэтым улічваюцца абмежаванні працоўнай сілы, транспарту і ўмяшчальнасці пляцовак. У мэтавую функцыю ўваходзіць кошт агляду кантэйнераў, рамонта, транспарціроўкі і захоўвання, кошт адмовы ў прыняцці кантэйнераў і незадаволенасці попыту карыстальнікаў. Праблема зведзена да задачы лінейнага праграмавання.

**Ключавыя словы:** аптымальнае планаванне, грузавыя кантэйнеры, лінейнае праграмаванне, кіраванне запасамі, мінімум агульных выдаткаў.

## ФАРМУЛЁЎКА ЗАДАЧЫ

Уваходныя параметры:  $j = 1, \dots, n$  – тыпы кантэйнераў;  $f = 0, 1, \dots, F$  – пляцоўкі;  $t = 0, 1, \dots, T$  – дні гарызонту планавання;  $q = 0, 1, \dots, Q + 1$  – ўзроўні якасці ў парадку пагаршэння ( $q = 0$  – ідэальны стан,  $q = Q + 1$  – якасць для ўтылізацыі);  $k_{jt}$  – колькасць кантэйнераў тыпу  $j$ , якія прыбываюць на пляцоўку  $0$  у пачатку прамежку  $t$ ;  $\frac{p_{jq}}{100}$  – верагоднасць таго, што ўзровень якасці любога неправеранага кантэйнера тыпу  $j$  роўны  $q$ ;  $f_{jq} \in \{1, \dots, F\}$  – пляцоўка па рамонце кантэйнераў тыпу  $j$  і ўзроўню якасці  $q$ ;  $J_f$  – наборы пар  $(j, q)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $q = 1, \dots, Q$ , такія што  $f_{jq} = f$ ;  $u_j$  – першапачатковая інвентарызацыя, якая не прайшла праверку кантэйнераў тыпу  $j$  на пляцоўцы агляду  $0$  у пачатковы

прамежак часу  $l$ ;  $g_{jaf}$  – першапачатковая інвентарызацыя правераных кантэйнераў тыпу  $j$  якасці  $q$  на пляцоўцы  $f$  у пачатковы пачатковы прамежак часу  $l$ ;  $b_{jq_t}$  – першапачатковая інвентарызацыя кантэйнераў тыпу  $j$  і якасці  $Q$  з затрымкай рамонтна на пляцоўцы  $0$ , якія былі інспектаваны ў перыяд  $t - \delta$  і рамонт якіх можа пачацца ў прамежак часу  $t$ ;  $D_{jt}$  – агульны попыт кантэйнераў тыпу  $j$  у прамежак часу  $t$ ;  $m$  – прапускная здольнасць;  $s_j$  – колькасць чалавека-гадзін, неабходных для праверкі аднаго кантэйнера тыпу  $j$  на пляцоўцы  $0$ ;  $V$  – верхняя мяжа чалавека-гадзін, даступных для праверкі ў любы прамежак часу;  $G$  – верхняя мяжа па колькасці кантэйнераў ўзроўню якасці  $Q + 1$ , якія могуць быць утылізаваны ў любы прамежак часу;  $r_{jq}$  – колькасць чалавека-гадзін, неабходных для рамонтна аднаго кантэйнера тыпу  $j$  ўзроўню якасцяў  $q$ ;  $U_f$  – верхні мяжа чалавека-гадзін, даступны для рамонтных работ у любы прамежак часу на пляцоўцы  $f$ ;  $W_f$  – колькасць кантэйнераў усіх тыпаў, якія могуць захоўвацца на пляцоўцы  $f$  пры пераходзе паміж двума суседнімі днямі;  $c_j^{(ins)}$  – кошт праверкі аднаго кантэйнера тыпу  $j$ ;  $c_{jq}^{(rep)}$  – кошт рамонтна аднаго кантэйнера тыпу  $j$  і ўзроўню якасці  $q$  на пляцоўцы  $f_{jq}$ ;  $c_f^{(tra)}$  – кошт перавозкі аднаго кантэйнера любога тыпу з пляцоўкі  $0$  на пляцоўцы  $f$ ;  $c_f^{(hol)}$  – кошт захоўвання аднаго кантэйнера любога тыпу на пляцоўцы  $f$  паміж двума суседнімі днямі;  $c_{jt}^{(dis)}$  – кошт незадаволенасці карыстальнікаў, які выплачваецца за кожны недапастаўлены кантэйнер тыпу  $j$  ў прамежак часу  $t$ ;  $c_j^{(rej)}$  – кошт адмовы прыему аднаго кантэйнера тыпу  $j$ .

Задача мінімізацыі сумарнага кошту пры ўказаных абмежаваннях можа быць сфармуляваная наступным чынам. Увядзем зменную  $x_{j,f,t,f',t',\&}$ , якая ўяўляе сабою колькасць кантэйнераў тыпу  $j$ , якіх перамясцілі з пляцоўкі  $f$  на пляцоўку  $f'$  пры пераходзе з дня  $t$  на дзень  $t' \in \{t, t + 1\}$ . Сімвал  $\& \in \{\sim, \otimes, q, *\}$  характарызуе неінспектаваныя і неадрамантаваныя кантэйнеры ( $\& = \otimes$ ), выбракаваныя (адмоўленыя) кантэйнеры ( $\& = \sim$ ), правераныя кантэйнеры ўзроўню якасці  $q$ , гатовыя да рамонтна ці ўтылізацыі ( $\& = q$ ), кантэйнеры узроўню якасці  $Q$ , якія правяраюцца ў момант  $t$  і ўтрымліваюцца ў інспекцыйнай майстэрні  $0$  да моманту  $t + \delta$ , каб стаць даступнымі для рамонтна ў момант  $t + \delta$ . Масіў пераменных абазначым праз  $x$ .

## ФАРМАЛЬНАЯ ПАСТАНОВА ЗАДАЧ

$$\min_n \{Rej(x) + Hol(x) + Ins(x) + Rep(x) + Tra(x) + Dis(x)\},$$

Дзе

$$Rej(x) = \sum_{j=1}^n c_j^{(rej)} \sum_{t=1}^T (x_{j((-1,t),(-1,t),-)})$$

агульны кошт адмовы ў прыняцці кантэйнераў,

$$Hol(x) = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T c_0^{(hol)} \left( x_{j((-1,t),(-1,t+1),\otimes)} + \sum_{q=0}^{Q+1} x_{j((0,t),(0,t+1),q)} \right. \\ \left. + \delta x_{j((0,t-\delta),(0,t),*)} \right) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{(j,q) \in J_f} c_f^{(hol)} x_{j((f,t),(f,t+1),q)}$$

агульны кошт захоўвання кантэйнераў,

$$Ins(x) = \sum_{j=1}^n c_j^{(ins)} (u_j + \sum_{t=1}^T k_{jt} - \sum_{t=1}^T (x_{j((-1,t),(-1,t),-)}))$$

агульны кошт агляду кантэйнераў,

$$Rep(x) = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{q=1}^Q c_{jq}^{(rep)} \left( \frac{p_{jq}(u_j + \sum_{t=1}^T k_{jt} - \sum_{t=1}^T (x_{j((-1,t),(-1,t),-)}))}{100} \right) \right. \\ \left. + \sum_{f=1}^F g_{jqf} \right) + \sum_{t=1}^T c_{jq}^{(rep)} b_{jqf}$$

агульны кошт рамонту кантэйнераў,



$$Tra(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{(j,q) \in J_f} c_f^{(tra)} x_{j((0,t),(f,t),q)}$$

агульны кошт транспарціроўкі кантэйнераў,

$$Dis(x) = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T c_{jt}^{(dis)} \max\{0, D_{jt} - \sum_{f=0}^F \sum_{\alpha=1}^t x_{j((f,\alpha),(F+1,\alpha),0)}\}$$

агульны кошт незадоволенасці попыту карыстальнікаў, з наступнымі абмежаваннямі:

$$x_{j((-1,0),(-1,1),\otimes)} = u_{jt}, \forall j, (1)$$

$$x_{j((f,0),(f,1),q)} = g_{jqf}, \forall j, f = 0, 1, \dots, F, (2)$$

$$x_{j((0,0),(0,1),*)} = g_{jq+10}, \forall j, (3)$$

$$x_{j((0,t-\delta),(0,t),*)} = b_{jqt}, \forall j, t = 0, 1, \dots, \delta, (4)$$

$$\left\lfloor \frac{p_{jq}}{100} x_{j((-1,t),(0,t),\otimes)} \right\rfloor = x_{j((0,t),(0,t+\delta),*)}, \forall j, t = 0, 1, \dots, T, (5)$$

$$\begin{aligned} k_{jt} + x_{j((-1,t-1),(-1,t),\otimes)} + x_{j((-1,t),(0,t),\otimes)} \\ = x_{j((-1,t),(-1,t+1),\otimes)} + x_{j((-1,t),(-1,t),-)}, \end{aligned}$$

$$\forall j, t = 0, 1, \dots, T, (6)$$

$$\begin{aligned} x_{j((0,t-1),(0,t),q)} + \left\lfloor \frac{p_{jq}}{100} x_{j((-1,t),(0,t),\otimes)} \right\rfloor \\ = x_{j((0,t),(F+1,t),q)} + x_{j((0,t),(0,t+1),q)}, \end{aligned}$$

$$\forall j, t = 1, \dots, T, q \in \{0, Q+1\}, (7)$$

$$\begin{aligned} x_{j((0,t-1),(0,t),q)} + \left\lfloor \frac{p_{jq}}{100} x_{j((-1,t),(0,t),\otimes)} \right\rfloor \\ = x_{j((0,t),(f_{jq},t),q)} + x_{j((0,t),(0,t+1),q)}, \end{aligned}$$

$$\forall j, t = 1, \dots, T, q \in \{1, \dots, Q - 1\}, (8)$$

$$x_{j((0,t-\delta),(0,t),*)} + x_{j((0,t-1),(0,t),Q)} = x_{j((0,t),(f_{jq},t),Q)} + x_{j((0,t),(0,t+1),Q)},$$

$$\forall j, t = 1, \dots, T, (9)$$

$$\begin{aligned} & x_{j((f,t-1),(f,t),0)} + \sum_{(j,q) \in J_f} \left( x_{j((f,t-1),(f,t),q)} + x_{j((0,t),(f,t),q)} \right) \\ & = x_{j((f,t),(F+1,t),0)} + \\ & x_{j((f,t),(f,t+1),0)} + \sum_{(j,q) \in J_f} x_{j((f,t),(f,t+1),q)}, \forall j, f = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, (10) \end{aligned}$$

$$k_{jt} = x_{j((-1,t),(f,t),\sim)}, \forall j, t = 1, \dots, T, (11)$$

$$x_{j((0,t),(f,t),q)} \geq x_{j((f,t),(f,t+1),q)}, (j, q) \in J_f, f = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, (12)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{(j,q) \in J_f} x_{j((0,t),(f,t),q)} \leq m, t = 1, \dots, T, (13)$$

$$\sum_{j=1}^n s_j x_{j((-1,t),(0,t),\otimes)} \leq V, t = 1, \dots, T, (14)$$

$$\sum_{(j,q) \in J_f} r_{jq} \left( x_{j((f,t-1),(f,t),q)} + x_{j((0,t),(f,t),q)} - x_{j((f,t),(f,t+1),q)} \right) \leq U_f, \\ f = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, (15)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \left( x_{j((-1,t),(-1,t+1),\otimes)} + \sum_{q=0}^{Q+1} x_{j((0,t),(0,t+1),q)} \right. \\ & \left. + \sum_{t-\delta < \alpha < t} x_{j((0,\alpha),(0,\alpha+\delta),*)} \right) \leq W_0, \end{aligned}$$

$$t = 1, \dots, T, (16)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=0}^Q x_{j((f,t),(f,t+1),q)} \leq W_f, f = 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, (17)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{j((0,t),(F+1,t),Q+1)} \leq G, t = 1, \dots, T, (18)$$

$$x \geq 0. (19)$$

Даследуемая задача можа быць аднесена да класа шматпрадуктовых дынамічных задач кіравання запасамі. Даследаванні такіх задач былі пачаты Вагнерам і Віцінам [1] і працягнуты, сярод іншых, Као [2], Чубанавым і інш. [3], Кунхай і інш. [4] і Алтэндорферам [5]. Прыведзеная алгебраічная пастаноўка задачы з'яўляецца задачай лінейнага праграмавання і для яе рашэння можна скарыстацца стандартным праграмным забяспечаннем.

#### Бібліяграфічныя спасылкі

1. *Вагнер Х. М., Віцін Т. М.*, Дынамічная версія мадэлі эканамічнага памеру лота. *Навука кіравання*. 1958; 5(1): 89-96. DOI: 10.1287/mnsc.5.1.89
2. *Као Е.Р.С.*, Мультыпрадуктная дынамічная мадэль з індывідуальнымі і сумеснымі выдаткамі на ўстаноўку. *Даследаванні апераций*. 1979; 27(2): 279-289. DOI: 10.1287/opre.27.2.279
3. *Чубанаў С., Кавалёў М.Я., Пешч Э.*, Эканамічная задача па памеры лоту з нераўнамерным рэсурсам: набліжэнне. *Еўрапейскі часопіс аперacyjnych даследаванняў*. 2008; 189(3): 877-889. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.02.058
4. *Кунья Д. О., Крамер Х., Мела Р. А.*, Эфектыўная матэўрыстыка для шматэлементнай ёмістасці задачы аб памеры лоту з аднаўленнем. *Кампутары і даследаванні апераций*. 2019; 104: 149-158. DOI: 10.1016/j.cor.2018.12.012
5. *Алтэндорфер К.*, Уплыў абмежаванай магутнасці на аптымальныя параметры планавання для шматэлементнай вытворчай сістэмы з часамі ўстаноўкі і папярэдняй інфармацыяй аб попыце. *Міжнародны часопіс вытворчых даследаванняў*. 2019; 57(6): 1892-1913. DOI: 10.1080/00207543.2018.1511925.

# ГЕНЕРАЦИЯ ОПИСАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

**А. А. Мальщик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*akim.malyschik@gmail.com;*

*науч. рук. – А. В. Тузиков, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке новых эффективных ингибиторов проникновения ВИЧ-1, в настоящее время нет лицензированных противовирусных препаратов, основанных на ингибировании критических взаимодействий белка gp120 оболочки ВИЧ-1 с клеточным рецептором CD4 [1]. В связи с этим исследования по разработке терапевтических средств, ингибирующих связывание белка gp120 с молекулой CD4, остаются чрезвычайно актуальными.

В настоящей работе была разработана генеративная модель нейронной сети, позволяющая получать SMILES-описания химических соединений, обладающих задаваемой энергией связывания с гликопротеином gp120. С помощью разработанной модели были сгенерированы соединения, для которых в дальнейшем была вычислена оценка энергии связывания методом молекулярного докинга.

В результате проведенного исследования были получены соединения с энергией связывания, сравнимой с энергиями известных на данный момент ингибиторов NBD11021 и NBD14010.

**Ключевые слова:** методы глубокого обучения, автоэнкодер, ВИЧ-1, белок gp120, ингибиторы проникновения ВИЧ-1, методы молекулярного моделирования, лекарственные препараты против ВИЧ.

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

Ставилась задача для входных данных получить их представление в латентном пространстве (эмбединги), и, основываясь на этих эмбедингах, восстановить описание соединения в формате SMILES.

Для решения поставленной задачи была выбрана архитектура автоэнкодера. В качестве энкодера использовались один LSTM слой и один полносвязный слой. Входные данные обрабатывались LSTM слоем, состояния с этого слоя объединялись на конкатенирующем слое, формируя эмбединги. Полученные эмбединги дополнительно обрабатывались полносвязным слоем.

Далее обработанные эмбединги попадали на конкатенирующий слой, где объединялись с данными нейрона, отвечавшего за энергию связывания соединения. Полученный вектор образовывал латентное пространство.

Полученные элементы латентного пространства с помощью двух независимых полносвязных слоев преобразовывались в состояния для LSTM-слоя в декодере. В качестве входных данных LSTM слой получал то же, что и ожидалось на выходе из нейронной сети. Данный метод позволяет улучшить работоспособность декодера и быстрее обучить модель [2]. Выходы из LSTM слоя подавались на полносвязный слой с функцией активации softmax.

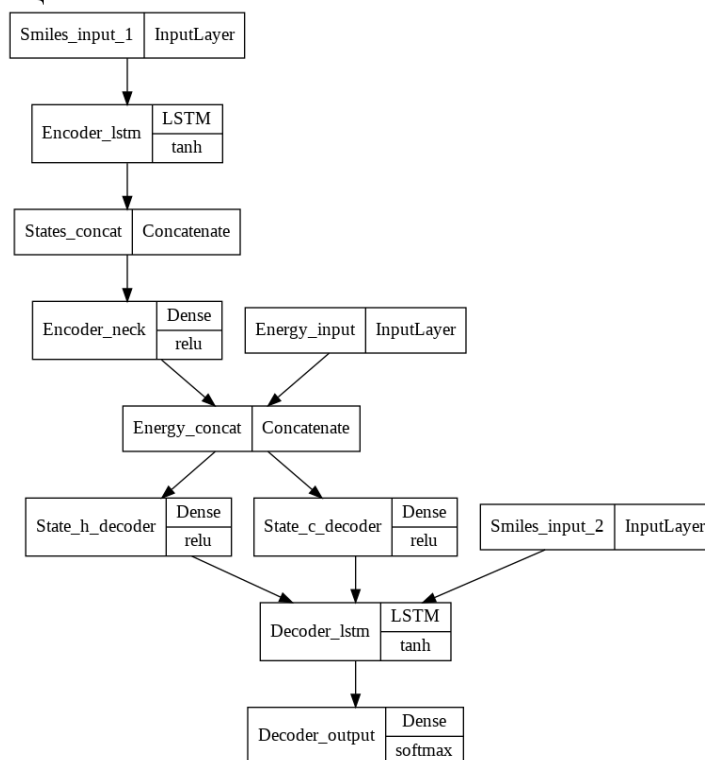


Рис.1. Архитектура модели

## ГЕНЕРАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ, РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЯЗЫВАНИЯ

После разработки и обучения модели автоэнкодер был разделён на 3 модели, чтобы отдельно использовать энкодер для получения латентного пространства и декодер для генерации соединений. Процесс генерации был организован следующим образом. Сначала случайно выбиралось 200 соединений из тестовой выборки. Затем на их основе с помощью модели энкодера формировалось латентное пространство, в которое также добавлялся случайный шум. Далее каждое из соединений 5 раз восстанавливалось из латентного пространства декодером (генерировалось 5 соединений). В случае получения при генерации большого количества дубликатов шум увеличивался. После генерации с помощью инструментария из пакета RDKit с открытым исходным кодом

(URL: <http://www.rdkit.org/>) проверялась корректность и интерпретируемость сгенерированных соединений.

В результате генерации из 1000 сгенерированных соединений 836 оказались корректными SMILES-дескрипторами. После удаления дубликатов и соединений с некорректной трехмерной структурой их осталось 765. Для них был проведен молекулярный докинг с белком gp120. Трехмерная структура белка gp120 была выделена из комплекса этого гликопротеина с рецептором CD4 и антителом 17b (код 1GC1 из банка данных белков [3]). Атомы водорода добавлены к структуре белка gp120 с помощью программного пакета Chimera. Также была проведена оптимизация структуры в силовом поле UFF при помощи программы OpenBabel.

Молекулярный докинг лигандов из обучающего набора данных с белком gp120 выполнялся с помощью программы AutoDock Vina с учетом конформационной подвижности лиганда. Ячейка для докинга представляла собой фрагмент белка gp120 с координатами  $x \in (19 \text{ \AA}; 39 \text{ \AA}), y \in (-20 \text{ \AA}; 0 \text{ \AA}), z \in (73 \text{ \AA}; 93 \text{ \AA})$ , включающий Phe43-полость гликопротеина. Для каждого лиганда генерировали девять моделей комплекса, лучших по значению оценочной функции. При этом охват конформационного пространства был задан равным 50.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам докинга было получено распределение энергий связывания для сгенерированных молекул (рис. 2)

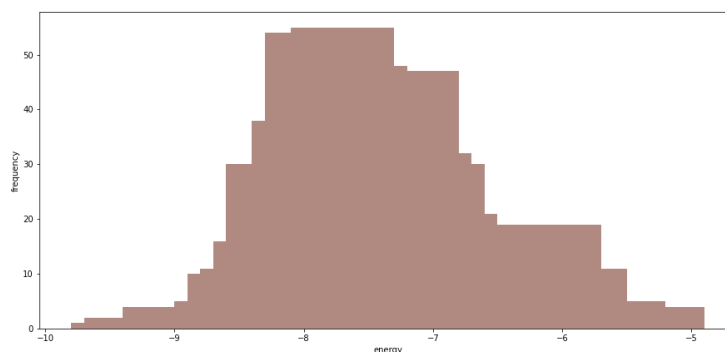


Рис.2. Распределение энергии сгенерированных соединений

В среднем, энергия связывания сгенерированных соединений ниже, чем энергия на тренировочной выборке. При генерации в качестве желаемой энергии была выставлена средняя энергия по тренировочной выборке, составлявшая -6.9 ккал/моль.

Стоит отметить, что большая часть сгенерированных соединений (76%) имеет энергию связывания ниже пороговой, что говорит об успешном обучении автоэнкодера.

Также было сгенерировано несколько соединений с энергией связывания в диапазоне  $-9 \pm 0.5$  ккал/моль. Аналогичную энергию имеют известные на данный момент ингибиторы gp120 [4], то есть сгенерированные соединения представляют интерес для дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках работы был разработан алгоритм генерации SMILES-описаний химических соединений, использующий данные о пороговой величине энергии связывания. Для первичного анализа сгенерированных соединений был проведен молекулярный докинг и оценена их энергия связывания.

В дальнейшем планируется сравнение лучших по энергии связывания сгенерированных соединений с ингибиторами NBD11021 и NBD14010, а также исследование полученных соединений методом молекулярной динамики. Некоторые из полученных соединений, в конечном итоге, могут быть синтезированы и протестированы на противовирусную активность, а разработанная модель может быть использована для поиска новых потенциальных ингибиторов проникновения ВИЧ-1.

## Библиографические ссылки

1. Jiang, S. Small-molecule HIV-1 entry inhibitors targeting the epitopes of broadly neutralizing antibodies / S. Jiang, A. Tuzikov, A. Andrianov // Cell Chemical Biology – 2022. – Vol. 29, 5 – P. 757-773.
2. Master your molecule generator: Seq2seq RNN models with SMILES in Keras [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.cheminformania.com/master-your-molecule-generator-seq2seq-rnn-models-with-smiles-in-keras>. – Date of access: 17.03.2022.
3. Structure of an HIV gp120 envelope glycoprotein in complex with the CD4 receptor and a neutralizing human antibody / Kwong P. D. [et al.] // Nature – 1998. – Vol. 393 – P. 648–659.
4. Synthesis, Antiviral Potency, in Vitro ADMET, and X-ray Structure of Potent CD4 Mimics as Entry Inhibitors That Target the Phe43 Cavity of HIV-1 gp120 / Curreli F [et al.] // Journal of Medicinal Chemistry – 2017. – Vol. 60, 7. – P. 3124-3153.
5. Computational discovery of small drug-like compounds as potential inhibitors of SARS-CoV-2 main protease / A.M. Andrianov [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics – 2021. – Vol. 39, n. 15. – P. 5779-5791.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИБЛИОТЕКИ OPENCV

**З. И. Мигас**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
zlatamigas@gmail.com;  
науч. рук. – С. Е. Гутников, ст. преп.*

В работе построена система с использованием возможностей библиотеки компьютерного зрения OpenCV для распознавания объектов в видеопотоке по заданному шаблону при помощи классификатора Хаара. Задачей является построение системы распознавания парковочных столбиков в видеопотоке. В результате апробации системы делается вывод о наилучших параметрах каскада Хаара для поставленной задачи независимо от размера и качества тестовой выборки.

Система с использованием компьютерного зрения позволяет оптимизировать однотипные и затратные по времени задачи распознавания. Построенная система может применяться в сфере транспорта как в качестве автономного помощника водителю, так и как интегрируемый модуль для более сложной дорожно-транспортной системы.

**Ключевые слова:** OpenCV; JavaCV; каскад Хаара; классификатор Хаара; компьютерное зрение; распознавание образов.

### ОБУЧЕНИЕ КАСКАДОВ ХААРА

Первым этапом работы выступает построение серии каскадов Хаара с разными входными параметрами. Для построения используются утилиты библиотеки OpenCV [1] *opencv\_createsamples* и *opencv\_traincascade*.

Для обучения каскадам предоставляется 305 изображений позитивной и 700 изображений негативной выборок с использованием полного комплекта Хаар-признаков.

В качестве тестовых используются следующие параметры:

- *numStages* — количество уровней каскада, которые программа будет обучать;
- *minhitrate* — коэффициент, определяющий качество обучения, так называемый процент «правильных» обнаружений;
- *maxFalseAlarmRate* — уровень ложной тревоги.

В результате обучения было получено 11 классификаторов в формате xml с различными наборами параметров, представленных в таблице 1.



Каскады Хаара с различными входными параметрами

#	Количество уровней обучения	Уровень ложной тревоги	Процент «правильных» обнаружений
1	15	0,4	0,800
2			0,990
3	16	0,3	0,999
4		0,4	0,980
5			0,990
6			0,999
7	0,5	0,999	
8	18	0,4	0,980
9			0,999
10		0,5	0,990
11			0,999

### ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Для моделирования системы распознавания используется язык программирования Java. Для работы с видеопотоком на стороне приложения применяется JavaCV [2] – Java-интерфейс библиотеки OpenCV [3, 4].

На вход построенной системе передается файл с классификатором Хаара и видеофайл или номер устройства, с которого будет вестись поиск в режиме реального времени.

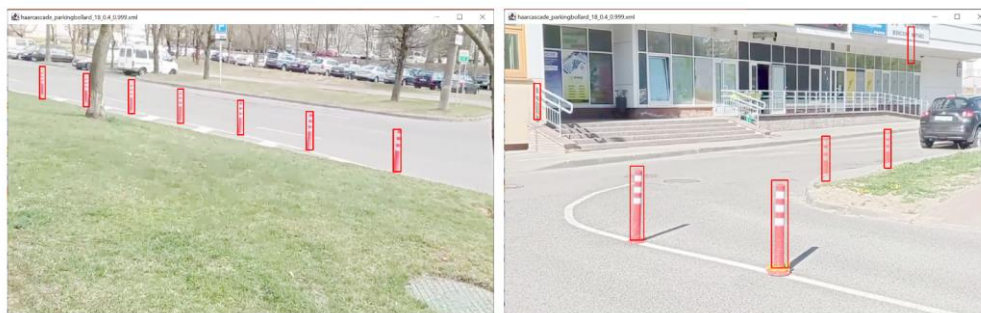
### АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ

Для апробации системы используются видеоряды длиной от 3 до 15 секунд: два видеоряда (1 и 2) содержат элементы тренировочной позитивной выборки, три (3, 4 и 5) – нет.

В экспериментах, где в видеоряде содержались элементы тренировочной позитивной выборки, лучше всего себя проявили классификаторы с большим количеством уровней обучения. Основным недостатком удовлетворительных классификаторов являлась излишняя чувствительность к объектам, подобным искомому.

В экспериментах с уникальными видеорядами лучше всего себя показали классификаторы со средним уровнем тревоги (0,4). При этом большое количество классификаторов считается непригодными.

Пример работы системы можно наблюдать на рисунке.



Распознавание объектов в видеопотоке: корректное (слева) и частично некорректное (справа)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Каждому эксперименту приписывается коэффициент значимости: экспериментам с более продолжительным видеорядом и отсутствием элементов позитивной тесовой выборки – выше, остальным – ниже.

Если классификатор в эксперименте показал хорошие результаты, то ему приписывается вес  $\nu$  равный 1,0, если удовлетворительно, то 0,5, иначе – 0,0.

Полученные веса суммируются с указанным коэффициентом для каждого классификатора и формируется итоговая оценка, приведенная в последнем столбце таблицы 2.

Таблица 2

Взвешенные результаты экспериментов

Характеристики каскадов			Результаты экспериментов					
Количество уровней обучения	Уровень ложной тревоги	Процент «правильных» обнаружений	1	2	3	4	5	Итог
16	0,5	0,999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
15	0,4	0,800	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,15
		0,990	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,15
18	0,5	0,990	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,15
		0,999	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,25
16	0,3	0,999	0,0	1,0	0,0	0,5	0,5	0,40
	0,4	0,980	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,40
		0,999	1,0	0,0	0,5	0,0	1,0	0,45
		0,990	1,0	0,0	1,0	0,0	0,5	0,50
18	0,4	0,980	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,80
		0,999	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,90
Коэффициент эксперимента			0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	

В результате экспериментов были сделаны следующие выводы:

1. При увеличении уровней обучения каскада Хаара качество распознавания увеличивается.

2. Высокий уровень ложной тревоги повышает количество ложных срабатываний при распознавании.

3. Коэффициент «правильных» обнаружений не является решающим при заданном размере обучающей выборки и остальных тестируемых параметрах.

4. По результатам экспериментов, самым подходящим для решаемой задачи является каскад с 18 уровнями обучения, процентом «правильных» обнаружений равным 0,4 и уровнем ложной тревоги 0,999.

5. Наиболее стабильно производится распознавание объектов на расстоянии от 1 до 6 метров, при увеличении расстояния объект может быть распознан несколько раз с паузой перед повторным распознаванием.

6. Построенный каскад при ложном срабатывании может распознавать другие столбы, дорожные знаки и подобные им объекты.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Для получения лучших результатов на сложных объемных объектах размер выборки должен быть большим, что является довольно затратным по времени обучения. То же касается количества стадий обучения – чем больше, тем точнее. Тем не менее, на чувствительность системы оказывает сильное влияние уровень ложной тревоги, что может быть полезным в случае, если требуется распознавание объектов, имеющих существенные отличия от шаблонного объекта.

Таким образом, в результате работы была построена система распознавания парковочных столбиков в видеопотоке с использованием возможностей библиотеки OpenCV и создан классификатор, наиболее подходящий поставленной задаче.

## **Библиографические ссылки**

6. OpenCV [Электронный ресурс]: информационный ресурс библиотеки компьютерного зрения OpenCV. URL: <https://opencv.org> (дата обращения: 01.05.2022).
7. JavaCV [Электронный ресурс]: официальный репозиторий Java-интерфейса для библиотеки OpenCV. URL: <https://github.com/bytedeco/javacv> (дата обращения: 24.04.2022).
8. *Клэр А., Брэдски Г.* Изучаем OpenCV 3 / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2017. 826 с.
9. *Прохоренок Н. А.* OpenCV и Java. Обработка изображений и компьютерное зрение. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 320 с.

# ПОИСК ПЛАГИАТА В ТЕКСТАХ ИСХОДНЫХ КОДОВ ПРОГРАММ

**Р. Ю. Руба**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*fpm.rouba@bsu.by;*

*науч. рук. – В. Ю. Сакович, ст. преп.*

В данной статье рассматривается решение проблемы эффективного поиска плагиата в тексте программ с использованием одной из версий алгоритма отпечатков. Помимо конкретной реализации в виде функционального API и пользовательского интерфейса, для целей демонстрации в данной работе обуславливается эффективность выбранного подхода к решению поставленной задачи, а также рассматривается возможность обобщения применённого метода к схожему классу задач. Все проведённые теоретические рассуждения подкреплены данными тестирования на реальных примерах.

**Ключевые слова:** поиск плагиата, алгоритм отпечатков, методы трансляции.

## ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении работы различных систем поиска плагиата отдельным классом задач является поиск плагиата в текстах программ. Основной спецификой является строгость задающих языки программирования грамматик, а также наличия явной и последовательной логики их интерпретации. В связи с этим возникают различные специализированные подходы как к распознаванию плагиата, так и специфические способы его сокрытия. Соответственно, одним из основных критериев оценки эффективности алгоритма будет являться его способность верно находить не только банальное копирование, но и попытки маскировки такового.

## АЛГОРИТМ ОТПЕЧАТКОВ

В данной работе рассматривается алгоритм, базовой идеей которого является выбор из всего файла исходного кода некоторых наиболее полно его характеризующих фрагментов – отпечатков, дабы в дальнейшем производить анализ заимствований, исходя из этих конкретных значений. Такой подход позволяет быстро сравнивать файлы по модели «один ко многим», что и требуется в большинстве случаев, а также может существенно сократить объём требуемой памяти в случае особого вида хранения отпечатков. Наиболее часто используемый подход, что не стало исключением в данной реализации,

заключается в хранении хэшированного представления отпечатка, а также его смещения относительно начала файла для возможности отображения информации конечному пользователю.

Для отбора отпечатков существует несколько подходов, однако наиболее точным из всех является алгоритм со скользящим окном [1]. Суть его заключается в выборе всего одного хэш-значения из нескольких входящих в окно, которое «пробегаёт» по всему файлу с единичным шагом. Регулируя размер окна, можно задавать минимальный участок кода, считающийся плагиатом, а также гарантировать выбор в качестве отпечатка всех участков кода более некоторой фиксированной длины. Параметры размера окна и единиц для хэширования были подобраны, исходя из тестирования на реальных данных. Также было проверено утверждение о большей точности данного алгоритма с использованием хэширующих функций из семейства Карпа-Рабина [2], но из-за особенностей реализации предварительной обработки данный подход не оправдал себя.

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА**

Для работы самого алгоритма от момента хэширования и до момента сравнения хэш-значений не имеет никакого значения вид поступающего на вход текста. Однако как банальная логика, так и результаты тестирования показали, что от первичного преобразования текста исходного кода результат работы может очень сильно варьироваться. Поэтому в финальном варианте был представлен наиболее интересный как с теоретической, так и практической точки зрения результат – трансляция исходного языка программирования в некоторое промежуточное и обобщённое представление. Эффективность такого подхода целиком и полностью зависит от полноты описания всех возможных правил перевода, а также широты нового алфавита, что является достаточно большой темой для отдельного исследования. Явным же плюсом можно указать независимость сравнения прошедших через такую обработку файлов с кодом на разных языках, например на Java и C++, ведь оба варианта приводятся к единому представлению.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Итак, опишем полученный результат. Разработанное приложение состоит из четырёх независимых модулей, реализующих предварительную обработку файла (приведение исходного кода к обобщённому виду), непосредственное хэширование и выбор

отпечатков, сравнение хэш-значений с предоставлением дополнительной информации, графического интерфейса для демонстрации работы. Благодаря набору решений приложение успешно фиксирует не только наличие прямого копирования, но также перестановки блоков кода (выбор отпечатков с помощью окна), изменение имён идентификаторов (трансляция к обобщённому представлению), дробление на функции (трансляция + окно) и некоторые другие, а также любую из комбинаций вышеперечисленных попыток сокрытия факта плагиата.

Тестирование корректности работы приложения, а также подбор оптимальных параметров производился на наборе решений контрольных работ студентов прошлых лет, включающих в себя более 100 уникальных архивов с файлами на языке программирования Java. Разнообразие стилей написания, а также явные попытки взаимоплагиата позволили улучшить изначальную версию транслятора до достаточно точной, но не излишне строгой версии, а также подобрать оптимальные параметры для размеров окна. Итоговая версия работает с инструкциями, превращая по 3 инструкции в одно хэш-значение, а размер окна составляет 5 инструкций. Таким образом, незначительно малые участки кода длиной до трех инструкций в принципе не рассматриваются подозрительными на плагиат, а выбор отпечатка происходит не реже чем раз в 5 строк кода, что позволяет отлавливать разбиение даже на относительно небольшие функции.

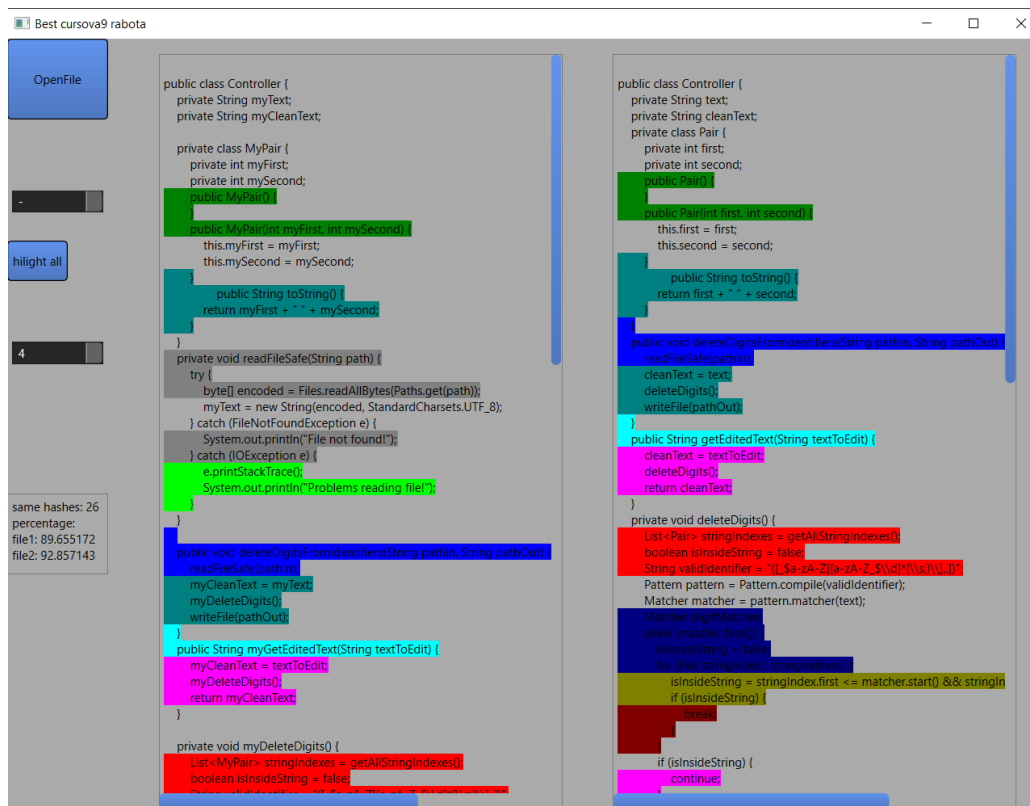
Графический интерфейс, представленный ниже, снабжён всем необходимым для демонстрации функционалом: возможностью открывать файл для проверки, выбором отсортированного в порядке убывания количества совпадений файла из базы для сравнения, возможностью визуализировать как отдельные совпадения, так и сразу все.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В целом, разработанное приложение является полностью портативным и встраиваемым в любую существующую систему (при наличии совпадающего api), единственным направлением для развития является модуль для трансляции кодов, который можно независимо дополнять правилами для различных языков, а также вносить изменения в имеющиеся для улучшения их работы. Система является весьма легковесной и быстрой, и, соответственно, может быть применена в реальных условиях, и в то же время может представлять интерес с

научной точки зрения, а именно с позиции построения и влияния транслятора на точность результата.

Общий вид приложения представлен на рисунке.



Пример работы алгоритма с графическим интерфейсом

### Библиографически есылки

1. *Aiken A.* Winnowing: local algorithms for document finger-printing / *A. Aiken, S. Schleimer, D. Wikerson* // Proceedings of ACM SIGMOD Int. Conference on Management of Data. – San Diego, 2003. – P. 76-85.
2. *Wise, M.J.* String similarity via greedy string tiling and running Karp-Rabin matching / *M. J. Wise* // Dept. of CS, University of Sydney. – 1993. – P. 34-47.

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЕЖЕДНЕВНОЙ АКТИВНОСТИ НА НОСИМЫХ УСТРОЙСТВАХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ IOS

Д. А. Семенович

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*dima.semenovich.01@icloud.com;*

*науч. рук. – М. И. Давидовская, ст. преп.*

Статья посвящена исследованию обучения нейронных сетей для классификации пользовательской активности на основе показателей с сенсоров мобильных носимых устройств и использование классифицированных данных для демонстрации пользователю в прикладном мобильном приложении под управлением iOS и watchOS.

**Ключевые слова:** iOS; watchOS; нейронные сети; классификация активности; мобильное приложение.

## ВВЕДЕНИЕ

На данный момент в мире возник огромный спрос на услуги сферы здравоохранения и ухода за собой. Активный образ жизни — один из способов сохранить свое долголетие, поддержать свое физическое и ментальное здоровье. В связи с этим фактором чрезвычайно перспективным направлением является разработка мобильных приложений для поддержания здорового образа жизни.

При помощи мобильных программ можем считать количество пройденных шагов, оптимальное время сна и спортивных занятий, потраченные калории, измерять пульс и давление. Также существуют цифровые продукты, которые напоминают о необходимости принять лекарство, улучшают жизнь диабетикам, контролируя уровень сахара, и отправляют врачам данные о работе сердца пациентов с сердечными заболеваниями. Мобильные приложения, которые помогают следить за здоровьем, относятся к категории Health-приложений. При помощи Health-приложений уже сейчас человечество собирает огромные массивы данных о здоровье по всей планете, а нейросети учатся их анализировать. Искусственный интеллект помогает по-новому взглянуть на медицину и методы лечения людей.



## **ДАТЧИКИ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Большинство современных смартфонов оснащается акселерометром. Акселерометр или G-сенсор — это датчик, определяющий угол наклона электронного устройства по отношению к земной поверхности. На основании данных от датчика программное обеспечение понимает положение смартфона, и поворачивает изображение на дисплее. Иными словами, именно акселерометр способствует автоматическому повороту экрана в альбомную ориентацию при повороте телефона.

Также этот датчик фиксирует ускорение перемещения устройства в пространстве, одновременно сопоставив три пространственные координаты. В рамках проведённого исследования показания акселерометра применяются для классификации пользовательской активности.

Дополнительно в работе был задействован сенсор частоты сердечных сокращений. Это специальный тип датчика, который размещается с обратной стороны умных часов, например Apple Watch. Данный датчик работает по принципу фотоплетизмографии.

Датчик имеет зелёный светодиод, который подсвечивает кровь и фотодиод, который считывает отражение. Во время каждого сокращения сердца объем крови, поступающий в сосуды, увеличивается, а в промежутке, наоборот, уменьшается. Эти параметры и регистрирует датчик. Такой метод позволяет определять количество сердечных сокращений в диапазоне от 30 до 210 ударов в минуту.

В 2017 году Стэнфордский университет провёл исследование [4], где подробно описал качество работы измерителей пульса в носимых устройствах. Оказалось, что в погрешность Apple Watch составляет 2%, что является весьма высоким показателем.

В рамках данной работы была поставлена задача классификации стадий сна. Исследуемая задача относится к задаче классификации, так как имеется изначально определённый набор классов, к которым необходимо соотнести фазы сна, в которых пользователь на основе показаний акселерометра и пульсометра находится в данный момент.

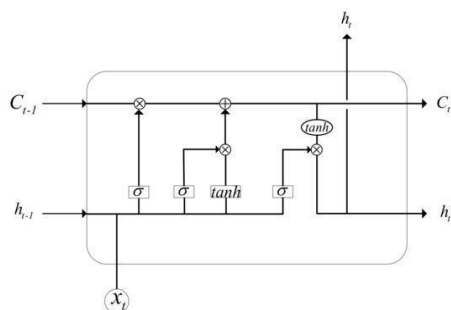
## **РЕКУРРЕНТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ LSTM**

В нашей задаче среди потока данных нет точного разделения, когда и какая фаза сна происходит. Продолжительность колебаний и количество сокращений сердца будет отличаться, а переход из одной стадии к другой будет неявным. Анализ данных построчно будет неэффективным. Следовательно, необходимо анализировать данные

«блоками». Иными словами, разделим данные, получаемые с датчиков на части фиксированной длины и фиксированное количество записей.

Для анализа блоков данных используем рекуррентные нейронные сети. Их особенность заключается в том, что позволяют обрабатывать серии событий во времени. Рекуррентные нейронные сети LSTM — нейронные сети с долгой краткосрочной памятью. В них присутствуют циклы, сохраняющие информацию. Рекуррентную нейронную сеть можно развернуть, как цепочку повторяющихся слоёв нейронной сети.

Сети LSTM содержат нейроны для выполнения вычислений, которые называют ячейками памяти. Эти ячейки содержат веса и гейты или ворота; гейты являются отличительной чертой моделей LSTM. Внутри каждой ячейки есть 3 гейта (gate): входной гейт (input gate), гейт утраты (forget gate) и выходной гейт (output gate) (см. Рис. 1).



Структура нейрона нейронной сети LSTM

$C_{t-1}$  - Состояние предыдущей ячейки

$C_t$  - Состояние текущей ячейки

$h_{t-1}$  - Входной результат предыдущей ячейки

$h_t$  - Входной результат текущей ячейки

$x_t$  - Входные данные

$\sigma$  - Сигмоидная функция активации

$\tanh$  - Гиперболическая функция активации

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные используемые нами при обучении модели были собраны в Мичиганском университете с июня 2017 года по март 2019 года, и в общей сложности состоят из 31-го эксперимента. Набор данных состоит из класса стадии сна, времени замера показателей, идентификатора эксперимента и значения акселерометра по трём осям, количества

шагов, показателей пульса. Классы активности включают в себя 5 классов: wake (пользователь не спит), N1, N2, N3, REM.

Обучение нейронной сети происходило при помощи фреймворка iOS SDK Core ML. По результатам тестирования нейронная сеть показала точность 80% для показателя отличия сна от пробуждения. Также при тестировании классификации 5-ти классов (awake, N1, N2, N3, REM) была достигнута точность 58%. Проведя исследование специфики каждой из стадий возможно достичь большей точности, объединив классы N1 и N2 в один и сузив задачу до 4-х классов (awake, N1+N2, N3, REM), так как два данных класса представляют собой быструю стадию сна, а также возможно объединить классы до 3-х (awake, NREM, REM).

#### **Библиографические ссылки**

1. Семенович Д. А. Проектирование и реализация мобильного приложения отслеживания ежедневной активности для iOS. / Д. А. Семенович, М. И. Давидовская, НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ XXI ВЕКА, № 1 (15), 2022. — С. 15-20. URL — <http://scientific-research.ru/files/JOURNAL--1--15-.pdf>
2. Hermans M. and Schrauwen B. Training and analyzing deep recurrent neural networks, 2013.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning, 2016
4. Shcherbina A., et al. Accuracy in wrist-worn, sensor-based measurements of heart rate and energy expenditure in a diverse cohort. J. Personal. Med. 7, 3 (2017). <https://doi.org/10.3390/jpm7020003>.

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ПОИСКА «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Д. В. Сизова

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*darya.sizova31@gmail.com;*

*науч. рук. – В. А. Ковалев, канд. техн. наук*

В последние годы остро стоит проблема защиты личных данных, к которым, в свою очередь, относятся медицинские изображения. Ввиду человеческого фактора, не исключены ошибки при внесении изображений врачом в базу данных, что влечет за собой необходимость разработки алгоритма, позволяющего извлекать из базы изображения, принадлежащие одному человеку. Целью данной работы является разработка и сравнение алгоритмов поиска похожих изображений в базе данных на примере рентгеновских снимков легких.

**Ключевые слова:** рентгеновские изображения; сиамские нейронные сети; сопоставление изображений; мешок визуальных слов; ключевые точки.

В настоящее время существует ряд алгоритмов для сопоставления изображений, различающихся по точности и производительности, начиная с поиска классических признаков изображения, заканчивая моделями глубокого обучения, на которых основано большое количество современных алгоритмов компьютерного зрения.

В основу первого алгоритма сопоставления изображений легла сиамская нейронная сеть [1]. Она представляет собой две идентичные подсети, выходами которых являются вектора признаков, за которыми следует слой вычисления Евклидова расстояния между полученными векторами. Для изображений базы данных хранятся заранее найденные вектора признаков, которые попарно сравниваются с вектором признаков входного изображения. Обучение сети происходит посредством минимизации функции контрастных потерь.

Вначале модель была обучена на положительных и случайно составленных отрицательных парах изображений. В силу того что изображения негативных пар были слишком различными, сеть не различала похожие изображения, принадлежащие разным людям. Таким образом, появилась необходимость составления более сложных негативных пар изображений [2]. Получить такие пары удалось итеративно: с помощью уже обученной модели для снимков находятся ближайшие к ним среди тех, что принадлежат другим людям, и из них составляется пара. Затем модель обучается на новых парах, и по тому же принципу составляются еще более сложные пары. Также были применены аугментации к тренировочному набору.

Для сравнения моделей был произведен поиск пары для 250 тестовых изображений среди 15000 снимков базы данных, результаты представлены на рисунке 1.

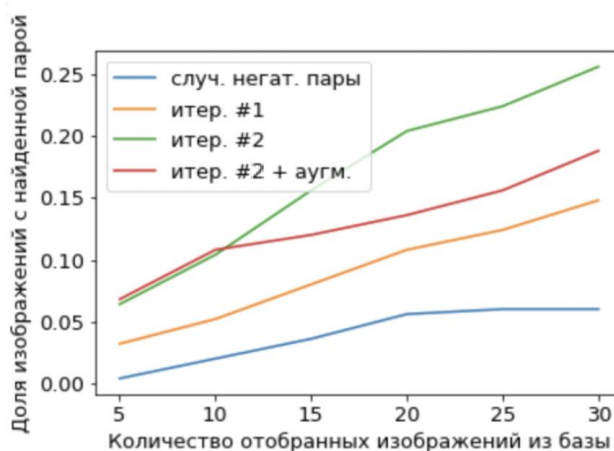


Рис 1. Сравнение нейросетевых моделей

Следующим подходом являлся «мешок визуальных слов», истоки которого лежат в области обработки текстов. Метод основан на поиске ключевых точек и их дескрипторов, в данной работе был выбран алгоритм SIFT (англ. Scale-Invariant Feature Transform) [3].

Дескрипторы различных точек могут описывать похожие ключевые точки, поэтому их можно кластеризовать каким-либо алгоритмом кластеризации получив словарь, элементами которого являются часто повторяющиеся элементы изображения. т.н. «визуальные слова». Для кластеризации в данной работе был выбран мини-пакетный метод  $k$ -средних (англ. mini batch  $k$ -means), который заключается в кластеризации векторов, случайно выбираемых на каждой итерации в заданном количестве [4]. Каждое изображение может быть представлено вектором-гистограммой частот визуальных слов.

Поиск изображений производился по алгоритму, аналогичному тому, что использовался в нейросетевом подходе. В качестве векторов признаков были взяты полученные гистограммы. Было проанализировано влияние количества кластеров на точность модели. Как видно на рисунке 2, точность оказалась не выше точности, полученной с нейросетевой моделью.

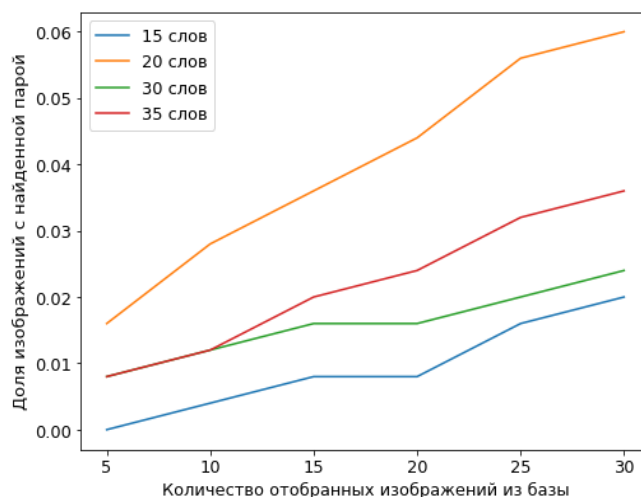


Рис 2. Сравнение моделей метода «мешка визуальных слов»

Вместо вычисления частот встречаемости дескрипторов ключевых точек, можно сравнивать изображения путем сопоставления ключевых точек двух снимков. В нашем случае использовался детектор ORB (англ. oriented FAST and rotated BRIEF) [5] и SIFT. Сопоставление точек происходило путем попарного сравнения дескрипторов обоих изображений.

Расстояние между снимками вычислялось как среднее расстояние между сопоставленными парами точек. Для вычисления среднего выбирались не все пары, так как в таком случае было сильное влияние шума. Поэтому на тренировочном наборе был произведен подбор параметра  $n$  – количества самых близких пар точек. Наилучших результаты удалось достигнуть при  $n = 10$ . Результаты представлены на рисунке 4.

Несмотря на высокую точность, у данного подхода есть существенные недостатки: большой объем занимаемой памяти для хранения дескрипторов изображений и низкая скорость поиска. Для оптимизации было уменьшено количество хранимых дескрипторов, что позволило сократить объем занимаемой памяти в 2.5 раза и получить ускорение в 2 раза. Для этого из 10000 тренировочных изображений были составлены случайные пары, найдены ключевые точки соответствующих изображений, их дескрипторы, и произведено сопоставление точек. Для точек из топ-10 с помощью ранее обученной модели  $k$ -средних были найдены кластеры. Оказалось, что абсолютное большинство таких точек принадлежит 7 кластерам из 20. Таким образом, для изображений базы данных хранились только дескрипторы принадлежащие данным кластерам.

Как видно на графике 3, ценой меньшего потребления памяти и скорости поиска точность снизилась.

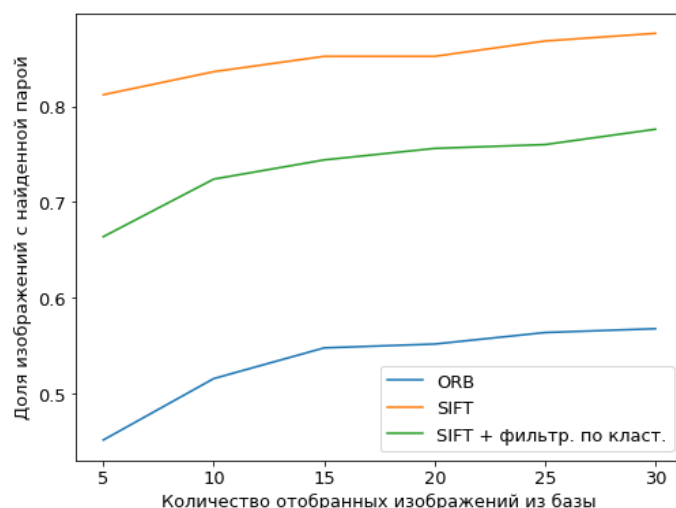


Рис 3. Сравнение моделей, основанных на сопоставлении ключевых точек

В данной работе были рассмотрены три подхода к сопоставлению изображений: нейросетевой, метод мешка визуальных слов и метод сопоставления ключевых точек. Также было произведено сравнение данных методов. Наилучших результатов удалось достигнуть путем сопоставления ключевых точек, такой метод показал точность 87,6% при поиске пары для 250 изображений среди базы данных в 15000 снимков при выборе топ-30 ближайших изображений. Полученные результаты можно использовать как основу для дальнейших исследований и улучшения алгоритма поиска «цифровых двойников».

#### Библиографические ссылки

1. *Melekhov I., Kannala J., Rahtu E.* Siamese network features for image matching // 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – IEEE, 2016. – P. 378-383.
2. *Li M. et al.* Deep instance-level hard negative mining model for histopathology images // International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. – Springer, Cham, 2019. – P. 514-522.
3. *Xie B. et al.* An Image Retrieval Algorithm Based on Gist and Sift Features // Int. J. Netw. Secur. – 2018. – Vol. 20. – №. 4. – P. 609-616.
4. *Sculley D.* Web-scale  $k$ -means clustering // Proceedings of the 19th international conference on the World wide web. – 2010. – P. 1177-1178.
5. *Luo C. et al.* Overview of image matching based on ORB algorithm // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1237. – №. 3. – 032020.

# РАСПОЗНАВАНИЕ РУКОПИСНОГО ТЕКСТА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д. В. Солодуха

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*dsoloduha@gmail.com;*

*науч. рук. – И. С. Войтешенко, канд. техн. наук, доц.*

В данной работе рассматриваются нейросетевые подходы распознавание рукописного текста в режиме офлайн. В качестве основных нейросетевых подходов перевода одной последовательности в другую были рассмотрены и реализованы подходы с вниманием, использованием временной классификации по рейтингу, а также с использованием модели рекуррентного трансдюсера. Для обучения моделей использовались общедоступные выборки, а также генеративно-сопоставительные модели, которые позволяют генерировать рукописный текст. В результате анализа моделей были выделены основные достоинства и недостатки, а в результате вычислительного эксперимента с обучением моделей были получены значения метрик, описывающих качество распознавания рукописного текста такими моделями. Полученные модели можно использовать в качестве одной из основных составных частей системы распознавания рукописного текста.

**Ключевые слова:** машинное обучение; компьютерное зрение; нейронные сети; задача распознавания; язык программирования Python.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире рукописные тексты появляются все реже и реже в повседневной жизни человека. Может показаться, что они и вовсе могут быть вытеснены цифровыми текстами. Однако проблема распознавания рукописного текста всё ещё является непременно важной. Ведь имеется множество различных источников информации, которые фактически полностью состоят из рукописного текста, а текст, который получен в результате сканирования данных источников хранится в виде изображения, что очень часто не позволяет работать с ним в полной мере, например, используя поиск по документу или возможность редактирования. Поэтому в настоящее время их распознавание является достаточно важной проблемой. Сюда также можно отнести и распознавание различных форм и бланков, которые частично заполнены «от руки», и использования распознавания в электронных записных книжках, и многое другое.

Если раньше такая задача могла выглядеть неподъёмно, как с теоретической точки зрения — не было придумано достаточно хороших алгоритмов, так и с практической — для реализации потенциально хороших алгоритмов не хватало вычислительных ресурсов, то на данном



этапе разработано уже множество подходов для её решения, а современные вычислительные ресурсы позволяют их эффективно использовать. Существует целый класс методов, которые позволяют решать схожие задачи — машинное обучение и компьютерное зрение.

В данной работе основное внимание было уделено распознаванию рукописного текста в режиме офлайн.

## ОПИСАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Наиболее поддерживаемой и вариативной выборкой для обучения является база рукописных текстов *IAM Handwriting 3.0*. Она содержит рукописные записи от 657 различных авторов 48 и насчитывает порядка 13 тысяч размеченных рукописных строк. Эти 13 тысяч строк также разбиты на обучающую, валидационные и тестовую выборку, что позволяет достаточно честно сравнивать работу своего алгоритма с другими. Помимо этого, в базе проведена сегментация строк на предложения и слова, что тоже можно использовать в обучении нейронной сети.

Однако такой обучающей выборки для современных нейронных сетей может быть мало, поэтому в данной работе для увеличения обучающей выборки применялись следующие подходы:

- *Использование генеративно-состязательных сетей (Scrabble GAN) для генерации изображения по входному тексту;*
- *Использование большого числа различных аугментаций;*
- *Использование шрифтов, которые напоминают рукописный текст.*

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

В работе использовались современные архитектуры, которые используются для работы с последовательностями. В качестве основных архитектур были рассмотрены:

- Кодировщик-декодировщик
- Кодировщик-декодировщик с вниманием
- Модель основанная на временной классификации по рейтингу
- Рекуррентный трансдьюсер

В качестве сети-кодировщика для всех архитектур использовалась схожая модель, что позволило достаточно честно сравнивать между собой подходы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Обучение производилось на вышеописанной обучающей выборке с использованием стандартных подходов к обучению глубоких нейронных сетей.

Каждая из нейронных сетей обучалась до сходимости в течении нескольких дней.

Для основной метрики качества использовался Char Error Rate (процент посимвольных ошибок), который равен нормированному на длину расстоянию Левенштейна.

Итоговые результаты обучения приведены в таблице:

**Итоговые метрики**

Модель	Кодирущик-декодировщик	Временная классификация по рейтингу	Модель с вниманием	Рекуррентный трансдьюсер
Процент посимвольных ошибок	14.5	5.0	5.5	5.7

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном мире, где доминируют человеко-машинные интерфейсы, которые часто могут быть основаны на рукописном вводе, задача распознавания рукописного текста вместе с задачей распознавания речи является очень важной. Обработка и перевод такой информации может сильно облегчить общение человека с различными компьютерными устройствами. И поэтому успехи в данной области могут оказать огромное влияние.

Помимо этого, практика показывает, что в реалиях текущих вычислительных возможностей, такие системы вполне себе реализуемы. Всё это позволяет активно внедрять системы распознавания в повседневные задачи.

В ходе данной научной работы был проведён анализ нейросетевых подходов для решения задачи распознавания рукописного текста. Были проведены вычислительные эксперименты и получены метрики итогового распознавания.

### Библиографические ссылки

1. *Graves A. et al.* Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks //Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. – 2006. – С. 369-376..

2. *Graves A.* Sequence transduction with recurrent neural networks //arXiv preprint arXiv:1211.3711. – 2012.
3. *Kang L. et al.* Convolve, attend and spell: An attention-based sequence-to-sequence model for handwritten word recognition //German Conference on Pattern Recognition. – Springer, Cham, 2018. – C. 459-472.
4. *Scheidl H., Fiel S., Sablatnig R.* Word beam search: A connectionist temporal classification decoding algorithm //2018 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR). – IEEE, 2018. – C. 253-258.

## РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА АРХИТЕКТУРЫ Java-ПРИЛОЖЕНИЙ

Д. А. Тарасенко

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*Dmitriy.tarasienko@gmail.com;*

*науч. рук. – М. И. Давидовская, ст. преп.*

Данная статья посвящена способам оценки архитектуры кода Java-приложений. Рассмотрены такие понятия как архитектура программного обеспечения (ПО), модульность, компоненты и сложность программной системы. Проанализированы основные метрики архитектуры кода и представлены алгоритмы их подсчета. В практической части рассмотрен алгоритм распределения классов по компонентам и реализовано приложение-анализатор. Данное приложение позволяет получить оценку по метрикам архитектуры кода программных систем и предложить вариант оптимизации программного проекта с разбиением на компоненты и уровни архитектуры.

**Ключевые слова:** архитектура кода; анализатор; компонент; Java; модуль; метрики.

На сегодняшний день язык Java является одним из наиболее распространенных средств разработки ПО. Причём это часто крупные проекты, разработанные большими командами, рассчитанные на длительную эксплуатацию. Для таких проектов очень важно наличие качественной архитектуры. В противном случае поддержка большой кодовой базы становится весьма затратной, а реализация новых функций затруднительна.

Архитектуру ПО важно не только изначально правильно спроектировать, но и постоянно поддерживать в актуальном состоянии, а также контролировать соответствие ей реального кода. На текущий момент большинство существующих средств позволяют визуализировать связи между отдельными частями кода, не предоставляя при этом конкретных количественных метрик, позволяющих отслеживать изменения качества кода во времени. С другой стороны, существуют также средства статического анализа, умеющие выявлять конкретные фрагменты кода, потенциально влияющие на правильность и безопасность функционирования приложения. Наличие большого числа предупреждений статического анализатора, относящихся к определенной части кода, позволяет косвенно судить о качестве конкретной реализации, но плохо коррелирует с дефектами архитектуры.

Модульность — один из ключевых элементов архитектуры ПО. Для облегчения управления программной системой она может разбиваться

на модули — некоторые подпрограммы, которые могут вызываться из другого модуля системы. Высокая степень независимости модулей между собой достигается за счёт усиления внутренних взаимосвязей и ослабления связей между модулями.

Существуют оценки, базирующиеся на связности и сцеплении каждой отдельной пары модулей. Рассмотрим подробнее характеристики связности и сцепления каждого модуля, используя понятия силы связности (СС) и силы сцепления (СЦ) [2].

Для подсчета сложности программной системы в диапазоне от 0 до 1, изменим эти коэффициенты, разделив их на 10. Пусть зависимость первого порядка между парой модулей определяется по формуле:

$$d_{ij} = \begin{cases} 0,15(s_i + s_j) + 0,7c_{ij}, & \text{если } c_{ij} \neq 0 \\ 0, & \text{если } c_{ij} = 0 \\ 1, & \text{если } i = j \end{cases} \quad (1)$$

Величина  $d_{ij}$  определяет вероятность того, что модуль  $j$  придётся изменить, если будет изменён модуль  $i$ . Величины  $s_i$  и  $s_j$  равны связности данных модулей, а  $c_{ij}$  — сцеплению между ними. Если сцепления нет, то  $d_{ij} = 0$ .

Компоненты представляют собой независимую систему, которая может быть использована повторно за счёт независимого развёртывания. Для выявления компонентов используется метод декомпозиции сложной системы, как и в случае с модульным подходом. Преимущество подхода заключается в том, что как только компоненты будут определены, каждый из них может быть назначен отдельной команде разработчиков, при этом проектировщики являются свободным в реализации внутренней организации компонент, каждый из которых является отдельной подсистемой [1].

Для эффективности обработки и упрощения представления программы на этапе использования обработчиков узлов синтаксического дерева, построенного библиотекой Spoon, построим собственное представление графа зависимостей с использованием списков связности. В результатах обработки для удобства создадим два представления, одно из которых включает в себя зависимости классов, другое — пакетов, так как неизвестно, какой уровень компонентов и само понятие компонента рассматривает пользователь. Для исследования данных представлений на наличие циклов используем стандартный механизм, основанный на поиске в глубину: из каждой вершины ориентированного графа

запускается поиск в глубину, если в ходе поиска найден путь в стартовую вершину, значит, граф содержит цикл.

Одной из основных задач при проектировании приложения либо системы является определение компонентов, то есть, классов, пакетов и внешних зависимостей, которые должны быть распределены по отдельным модулям. Для выделения компонент воспользуемся рядом принципов:

- Классы, которые имеют общие зависимости либо зависят друг от друга, логичнее располагать в одном компоненте.
- Абстракции могут быть вынесены в отдельный компонент для обеспечения выполнения принципа открытости/закрытости.
- Если изменения в наборе классов могут быть инициированы одним актором, данные классы с более высокой вероятностью принадлежат одному компоненту при наличии зависимостей между ними.

Приведённые выше принципы позволяют разработать алгоритм разбиения по компонентам, который состоит из следующих шагов:

7. Построить пары компонентов (классов либо пакетов), которые имеют зависимости друг от друга в виде наследования, типа полей, переменных либо вызове статического метода другого класса.

8. Удалить из построенных пар те, где внедрённая зависимость является абстракцией.

9. Удалить из зависимостей те, где параметр неустойчивости превышает некоторое пороговое значение.

10. Построить систему непересекающихся множеств, элементами которой является некоторое представление компонент, а принадлежность классов одному множеству определяется наличием зависимостей между ними.

11. Представить построенные множества пользователю как возможный вариант распределения компонентов по более массивным (например, модулям).

Шаг 2 обусловлен тем, что абстракции могут быть помещены в отдельный компонент (за исключением наследования). Шаг 3 же следует из того, что классы, которые инициализируются за счёт вызова фабричных методов или присваивания, генерируют зависимость вызывающего класса от конкретных реализаций, избежать которую невозможно [3].

Метод оценки вероятности того, что в модуле потребуются изменения при изменении некоторого другого модуля, также имеет большое значение в отношении классов, поскольку позволяет спроектировать механизм распределения классов на компоненты,

основанный на данной вероятности (так, имеет смысл располагать классы, изменения в которых с высокой долей вероятности зависят друг от друга, в одном компоненте). Главным преимуществом алгоритма, базирующегося на данной концепции, является возможность искусственно регулировать приблизительное число компонент, на который алгоритм осуществит разбиение. За счет разных показателей сцепления между компонентами он учитывает множество факторов, таких как связь исключительно с использованием статических переменных и методов, наличие управляющих переходов, использование примитивных либо сложных типов данных.

По формуле 1 для каждой пары компонентов требуется рассчитать значения связности для каждого класса и сцепления для каждой рассматриваемой пары. Так, связность уровня  $CC = 5$  означает, что некоторый класс в рамках своих методов вызывает все публичные методы класса-зависимости. В свою очередь,  $CC = 7$  означает, что вызываемый метод имеет те же параметры, что и некоторый другой метод, который уже вызывался у данного класса. Значение  $CC = 9$  зависит от возвращаемого при вызове метода значения,  $CC = 10$  означает, что класс имеет не более одного вызываемого метода. Таким образом, значения связности для каждого из компонентов могут быть получены на этапе построения графа без дополнительной обработки — при добавлении каждой зависимости по вызову метода необходимо пересчитывать значение связности и увеличивать его, если необходимо.

В случае сцепления значения  $CC = 1$  и  $CC = 9$  данные, касающиеся компонентов, такие как наличие статических методов и полей, заполняются на этапе построения модели по мере разбора классов. Значение  $CC = 3$  означает, что оба класса имеют зависимость от некоторого внешнего, причем выражается она в доступе к статическому его полю либо методу. Значение  $CC = 5$  означает, что классы имеют в своем коде выражение, содержащее статическую переменную в правой части, либо вызывают метод, который на этапе разбора обозначен в данных о компоненте как метод, в ходе выполнения которого может быть задано значение статической переменной. Аналогичным образом определяется значение  $CC = 10$ . Значение  $CC = 7$  выявляется по наличию в теле метода некоторого ветвления, которое в условии использует параметр, переданный в метод. Это может означать как прямое обращение к логической переменной, так и цепочку вызовов методов, где в качестве объекта либо параметра вызова выступает параметр метода, от которого внешний компонент имеет зависимость.

Анализатор, разработанный в представленном исследовании, на данном этапе включает в себя стандартный функционал для

компонентов: подсчёт базовых характеристик в виде устойчивости, абстрактности, числа входящих и исходящих зависимостей, цикломатической сложности; обнаружение циклических зависимостей среди пакетов и классов, а также способен определить простейшее разбиение анализируемого проекта на компоненты и уровни архитектуры. Согласно обнаруженным недостаткам для успешной работы анализатора возможно расширить его функционал за счёт предоставления рекомендаций по улучшению архитектуры и внесения изменений в проект самим анализатором.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Мартин Р.* Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. — СПб.: Питер, 2018. — 352 с.
2. *Назаров С. В.* Архитектура и проектирование программных систем. — М.: ИНФРА-М, 2013. — Гл. 2, 4, 6. — С. 115-320.
3. *Тарасенко Д. А., Полойко Д. К.* Разработка анализатора архитектуры java-приложений/ Д. А. Тарасенко, Д. К. Полойко // НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ XXI ВЕКА. — 2022. — № 1 (15). — С. 76–80.



# МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОБЛАЧНЫХ РЕСУРСОВ

**А.В. Шанцов**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*ShantsovAV@bsu.by;*

*Кочин Виктор Павлович, канд. техн. наук, доц.*

Рассмотрены принципы построения системы защиты информации в традиционных вычислениях. Выделены основные особенности облачных вычислений, влияющие на защищенность информационных ресурсов, такие как: модель совместной ответственности провайдера и клиентов облака по обеспечению информационной безопасности; необходимость в защите среды виртуализации и изоляции виртуальных ресурсов клиентов облака; необходимость доработки архитектур ресурсов и средств безопасности для их функционирования в облачной среде; необходимость налаженного взаимодействия между провайдером и клиентами облака при организации аудита и реагировании на инциденты. Определена невозможность применения системы защиты информации традиционных вычислений для облачных ресурсов. Предложена модель архитектуры системы защиты информации облачных ресурсов, рассмотрены ее особенности и отличия от традиционных систем защиты информации.

**Ключевые слова:** информационные технологии; информационная безопасность; защита информации; облачные вычисления.

## АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ТРАДИЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

Защита от угроз информационной безопасности (далее – ИБ) информационных ресурсов осуществляется с помощью системы защиты информации (далее – СЗИ). В зависимости от структурного построения информационного ресурса СЗИ адаптируется для обеспечения максимально возможной эффективности процесса защиты информации. Так, в традиционных вычислениях используется многоуровневая СЗИ, обеспечивающая защиту «в глубину». Под традиционными вычислениями понимается такая модель развертывания информационного ресурса, при которой можно выделить периметр защиты, а владелец информационного ресурса осуществляет полное управление информационным ресурсом, его инфраструктурой и средствами защиты.

СЗИ традиционных вычислений имеет многоуровневую структуру, обеспечивающую защиту информации на физическом уровне, сетевом уровне (уровне инфраструктуры), уровне программного обеспечения и уровне защиты данных.

Для традиционных вычислений указанная архитектура СЗИ обеспечивала требуемый уровень защищенности, однако при переходе от парадигмы традиционных вычислений к облачным вычислениям, данная архитектура СЗИ из-за особенностей облачных вычислений [1] теряет свою эффективность и не обеспечивает необходимый уровень защиты.

## **ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ИНФОРМАЦИОННУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ**

В основе облачных вычислений лежит модель совместного использования масштабируемого общего пула физических или виртуальных ресурсов с предоставлением самообслуживания и администрирования по требованию [2]. Особенности облачных вычислений оказывают существенное влияние на процесс защиты информации, среди них отдельно выделяют:

1. Наличие «третьей стороны» – облачного провайдера. Наличие облачного провайдера является одной из основных особенностей в облачных вычислениях, которая изменяет модель распределения ответственности по обеспечению ИБ информационных ресурсов [3].

2. Необходимость изменения архитектуры информационных ресурсов при их переносе на облачные платформы [4, с 108-118].

3. Особенности функционирования средств защиты информации в облачных вычислениях [4, с 77-90].

4. Угрозы утечки информации при совместном использовании физических ресурсов. [4, с 91-99].

5. Необходимость защиты платформы виртуализации.

6. Особенности аудита и реагирования на инциденты в облачных ресурсах [4, с 57-59, 101-107].

7. Вопросы юрисдикции. При использовании облачных услуг данные клиентов могут обрабатываться в иностранных юрисдикциях. В связи с этим возникает ряд вопросов по доступности данных, возможности их раскрытия третьим сторонам и т.д. [5].

## **МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОБЛАЧНЫХ РЕСУРСОВ**

Особенности облачных вычислений приводят к необходимости перехода от «плоских» многоуровневых СЗИ традиционных вычислений к трехмерной структуре СЗИ для облачных ресурсов. Предлагаемая модель архитектуры СЗИ структурно включает три плоскости обеспечения ИБ:

«вертикальная плоскость» – определяет требования к средствам защиты информации;

«горизонтальная плоскость» – определяет требования по обеспечению защиты от составных атак и требования по безопасному взаимодействию между составными частями информационных ресурсов;

«плоскость взаимодействия» – определяет требования к безопасному взаимодействию субъектов облачных вычислений.

Предлагаемая модель архитектуры СЗИ для облачных ресурсов представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Модель архитектуры СЗИ облачных ресурсов

Структура СЗИ в «вертикальной плоскости», по сравнению со структурой СЗИ традиционных вычислений, претерпевает следующие изменения:

- наличие дополнительных уровней защиты: уровня защиты виртуализации и уровня соответствия юридическим требованиям;
- границы между уровнями защиты «размываются» по причине разнообразия облачных архитектур.

Структура СЗИ в «вертикальной плоскости» представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Структура СЗИ в «вертикальной плоскости»

Особенности предлагаемой модели СЗИ в «горизонтальной плоскости» и «плоскости взаимодействия» заключаются в том, что обе плоскости практически повторяют структуру «вертикальной плоскости». Т.е., помимо технических требований к средствам защиты информации на каждом уровне, в зависимости от конкретной модели развертывания облачного ресурса, рассматриваются вопросы безопасного взаимодействия между составными частями информационных ресурсов и вопросы безопасного взаимодействия между субъектами облачных вычислений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагаемая модель архитектуры СЗИ помимо технических аспектов обеспечения ИБ затрагивает вопросы безопасного взаимодействия информационных ресурсов, юридические аспекты и аспекты взаимодействия между субъектами облака, что позволяет повысить уровень защищенности информационных ресурсов в облачных вычислениях до необходимого. Данная модель является «объемной» и структурно содержит три плоскости обеспечения ИБ, что в отличие от «плоских» архитектур СЗИ позволяет обеспечивать защиту не только от непосредственных угроз различного характера, но и от составных атак, использующих уязвимости в вспомогательном оборудовании, средствах защиты информации и программном обеспечении, а также при несогласованности действий субъектов облачных вычислений по вопросам обеспечения ИБ.

### **Библиографические ссылки**

1. В.П. Кочин, А.В. Шанцов. Проблемы проектирования комплексной системы защиты информации облачных ресурсов в Республике Беларусь // *Цифровая трансформация*. 2021; № 3: 34-39.
2. Информационные технологии. Облачные вычисления. Общие положения и терминология. Межгосударственный стандарт: ГОСТ ISO/IEC 17788-2016. – Введ. 01.04.2018 – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь.
3. National Institute of Standards and Technology, Special Publication 500-299 «Cloud Computing Security Reference Architecture».
4. Cloud Security Alliance. Security Guidance for Critical Areas of Focus in Cloud Computing.
5. Шекель Н.В. Юридические аспекты использования облачных технологий // *Журнал международного права и международных отношений*. 2014. Т. 4(71): 3-7.

# РАЗРАБОТКА ИГРЫ В ШВЕДСКИЕ ШАХМАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**М. А. Филиппов**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
filippov.maxim52@gmail.com;  
науч. рук. – Г. Г. Трубач, ст. преп.*

На сегодняшний день существует множество сильных шахматных программ, которые уже давно обыгрывают человека в обычные шахматы. Но совсем немногие из существующих программ умеют играть в другие виды шахмат, например, в шведские шахматы. Цель данной работы – адаптировать существующие шахматные алгоритмы для шведских шахмат. В работе рассматриваются алгоритмы как генерации ходов, так и поиска лучшего из них.

Шведские шахматы – командная игра. К тому же для игры в шведские шахматы, компьютеру требуется обрабатывать большее количество ходов, чем для игры в обычные. Поэтому указанные в работе идеи могут быть полезны для улучшения работы шахматных алгоритмов и изучения возможностей взаимодействия искусственных интеллектов друг с другом.

**Ключевые слова:** шведские шахматы; командная игра; сокращение перебора; генерация ходов; эвристика.

## ВВЕДЕНИЕ

Чтобы иметь возможность говорить об алгоритмах, используемых в шведских шахматах, необходимо ознакомиться с основными особенностями этой игры:

- шведские шахматы – командная игра 2 на 2 на двух шахматных досках.
- у каждого из 4-ёх игроков, помимо изначального комплекта фигур, есть «резерв». Резерв изначально пуст, но постоянно пополняется в процессе игры при взятиях на соседней доске.
- фигуры из резерва можно выставлять на игровое поле, практически на любую пустую клетку.
- при превращении пешки в другую фигуру, эта фигура не берется из ниоткуда. Она снимается с соседней доски. При этом снимаемая фигура не должна ставить шах, или защищать от него [1].

## ХРАНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИГРЫ

При разработке алгоритмов как генерации ходов, так и поиска лучшего из них, существенным является то, как состояние игры

представлено в памяти компьютера. Самым распространенным и эффективным вариантом является представление в виде последовательностей битов. Состояние каждого бита, в таком случае, показывает занятость/незанятость каждой клетки игрового поля, той или иной фигурой. Такой способ позволяет очень быстро вычислять положение каждой отдельно взятой фигуры, а соответственно и быстро генерировать массивы возможных ходов [2].

### **АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ХОДОВ**

Генерацию доступных ходов можно разделить на 3 основных этапа:

- первый – генерация ходов фигур, находящихся на доске. Здесь нет никаких отличий от алгоритмов, применяемых в обычных шахматах. Разбивая битовую последовательность, отображающую положение каждого типа фигур, получим местоположение каждой фигуры в отдельности. Зная положение фигуры и то, как она ходит, можно легко сгенерировать доступные ходы с помощью операций сдвига.

- второй – генерация ходов фигур, находящихся в резерве. Для быстрой генерации этих ходов, достаточно поддерживать битовую последовательность, отображающую все пустые клетки. Каждая пустая клетка – возможный ход для каждой фигуры из резерва. Исключение – пешки, которые нельзя ставить на 1-ую и 8-ую горизонтали.

- третий – валидация ходов-превращений. Такие ходы уже были сгенерированы на первом этапе, но без учета позиции на второй доске. Необходимо удалить превращения в те типы фигур, которые отсутствуют на второй доске, ставят там шах или защищают от него. Чтобы проверить существование типа фигуры достаточно проверить состояние соответствующей битовой последовательности. Для проверки на шах, необходимо временно снять фигуру с доски и проверить состояние обеих королей. Если один из них был под шахом, а после снятия фигуры вышел из под него либо наоборот – фигуру снимать нельзя.

В общем случае, игра в шведские шахматы на двух досках идет асинхронно. Это значит, что пока на одной доске игроки делают 1 ход, на второй может быть сделано значительно больше. В связи с этим, важной особенностью является необходимость генерации ходов на обеих досках сразу, после каждого хода. Это обязательно, поскольку пополнение резерва может расширить список возможных ходов на соседней доске, а превращение пешки его сократить.

## АЛГОРИТМ ПОИСКА ЛУЧШЕГО ХОДА

В основе подавляющего большинства шахматных программ лежит алгоритм минимакса с альфа-бета отсечением. Однако несмотря на то, что этот алгоритм уже позволяет отсекалть более 95% бесперспективных ветвей дерева игры, этого может быть недостаточно для обработки партии в шведские шахматы [3]. Для улучшения работоспособности этого алгоритма, необходимо воспользоваться существующими надстройками и эвристиками, которые, в свою очередь, адаптировать под увеличенный объем обрабатываемых данных.

В программе использовались следующие надстройки и эвристики:

- итеративное углубление и хеш-таблицы. Суть итеративного углубления – запуск алгоритма поиска лучшего хода несколько раз, постоянно увеличивая глубину. Это позволяет получить качественные оценки для сортировки массива доступных ходов. В комбинации с хеш-таблицей, которая хранит оценки для уже вычисленных позиций, итеративное углубление значительно увеличивает количество отсечений. В программе хеш вычисляется по методу Zobrista с учетом дополнительных ключей, представляющих резерв. Помимо хеш-таблицы для оценок позиций, есть и хеш-таблица, в которой хранятся массивы доступных ходов, поскольку их генерация – довольно дорогостоящая операция.

- эвристика убийцы – метод улучшения сортировки ходов, который заключается в том, чтобы продвигать вперед списка те ходы, которые вызвали отсечение в другой ветке дерева игры на той же глубине. Это позволяет увеличить количество отсечений.

- «тихие» ходы (ходы, не являющиеся шахами или взятиями) не так часто бывают лучшими в той или иной позиции, поэтому ими можно довольно смело пренебрегать. В программе реализовано 2 способа отсечения таких ходов. Первый – по счетчику: для каждой позиции просчитывается лишь фиксированное количество тихих ходов. В программе это количество зависит от количества доступных «резервных» ходов. Второй – по отклонению оценки: вводится специальное число – отклонение, смысл которого – прирост оценки, достаточно большой, что по определенным соображениям будем считать его недостижимым, при увеличении глубины поиска на 1. Тогда если в результате расчетов получается, что оценка отклоняется от окна перебора на число большее, чем задано, то можно выполнить досрочное отсечение.

Асинхронность игры создает определенные проблемы и здесь. Поскольку на каждый ход на первой доске мы обязаны заново генерировать доступные ходы и на второй доске, нам придется также заново запускать алгоритм поиска. В итоге может получиться ситуация, когда партия на одной доске идет полным ходом, а на второй стоит,

потому что программа не успевает рассчитать свой ход. Для решения этой проблемы, в программе была установлена строгая очередность ходов: сначала ходят белые на первой доске, белые на второй, черные на первой и наконец черные на второй доске.

## РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕННОЙ ПРОГРАММЫ

Для оценки результативности шахматной программы был проведен подсчет количества отсечений на различных глубинах поиска в среднем (таблица 1) и в худшем случае (таблица 2).

Таблица 1

### Эффективность отсечений в среднем

Глубина	Среднее количество просчитанных позиций за ход	Среднее количество просчитываемых позиций в случае полного перебора	Эффективность отсечений
2	≈ 180	≈ $1.4 \cdot 10^3$	≈ 86.8517%
3	≈ 1000	≈ $1.25 \cdot 10^5$	≈ 99.2%
4	≈ 3000	≈ $3.4 \cdot 10^6$	≈ 99.9122%

Таблица 2

### Эффективность отсечений в худшем случае

Глубина	Количество просчитанных позиций за ход	Количество просчитываемых позиций в случае полного перебора	Эффективность отсечений
2	≈ 540	≈ $4 \cdot 10^4$	≈ 98.65%
3	≈ 850	≈ $8 \cdot 10^6$	≈ 99.9894%
4	≈ 13000	≈ $1.6 \cdot 10^9$	≈ 99.9992%

Худший случай достигается тогда, когда оба игрока на одной из досок имеют в своем в резерве все 5 типов фигур. Тогда количество, возможных ходов может достигать 200. Результаты работы программы демонстрируют процент отсечений выше 95%, что говорит об эффективности примененных эвристик.

### Библиографические ссылки

1. Как играть в шведские шахматы? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.gambler.ru/Chess\\_bughouse\\_regulations](https://www.gambler.ru/Chess_bughouse_regulations) (дата обращения: 28.10.2021).
2. Efficient Generation of Sliding Piece Attacks [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.chessprogramming.org/Efficient\\_Generation\\_of\\_Sliding\\_Piece\\_Attacks](https://www.chessprogramming.org/Efficient_Generation_of_Sliding_Piece_Attacks) (дата обращения: 15.01.2022).
3. Альфа-бета отсечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://works.doklad.ru/view/hDCQHsaCLSI.html> (дата обращения: 08.11.2021).



# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИРУСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

**Р. Е. Шарыкин**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*sharykin@bsu.edu;*

*науч. рук. – А. Н. Курбацкий, д-р. техн. наук, проф.*

Описывается разработка системы стохастической гибридной защиты от вирусов на основе предлагаемой в работе методологии разработки сложных стохастических систем с асинхронной коммуникацией. В соответствии с методологией строится предварительная математическая модель системы защиты в рамках модели Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем посредством спецификации модели на языке SHYMaude. Далее следуют этапы апробации и реализации. На каждом из этих этапов проводится статистический анализ модели или имплементации модели для целей апробации и реализации. Результаты анализа используются для доработки исходной модели. В результате применения методологии разработчик получает как программное обеспечение реализующие систему, так и ее математическую модель.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, стохастические гибридные системы, статистический анализ, верификация моделей, разработка программного обеспечения

## **ВВЕДЕНИЕ**

Ввиду растущей важности и сложности современных распределенных систем защиты от вирусов, разработка методологии ориентированной на применение формальных методов на всех этапах разработки, от модели до ее реализации в виде приложения представляется важной задачей.

В данной работе предлагается методология разработки сложных систем с асинхронной коммуникацией с «привязкой» математической модели к разрабатываемому программному обеспечению на всех этапах его разработки, и описывается ее применение к разработке коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов.

Такой подход позволяет получить на выходе не только готовое программное обеспечение, но и математическую модель с изученными свойствами, реализацией которой является получаемое программное обеспечение.

## МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ

В качестве математической модели предлагается использовать модель РООСГС [1], разработанную для моделирования сложных распределенных стохастических систем с асинхронной коммуникацией. Для спецификации РООСГС предлагается использовать язык SHYMaude [2], который, после трансляции, может выполняться в системе Maude [3]. Для формального задания свойств исследуемой системы предлагается использовать язык QuaTEh [4]. Для статистического анализа системы предлагается использовать инструмент MultiVeStA [5].

Методология разработки описывается следующим образом:

1. Строится модель РООСГС системы посредством ее спецификации на языке SHYMaude.

2. Выбираются и специфицируются на языке QuaTEh метрики, оценки которых представляются важными.

3. С помощью системы MultiVeStA проводится статистическая оценка метрик.

4. В случае обнаружения недочетов в спецификации и/или способов ее «улучшения», спецификация корректируется и переходим к шагу 3. Если результаты удовлетворительны, то переходим к шагу 5.

5. Проводится апробация. Система реализуется на языке, предпочтительно имеющим известное представление в переписывающей логике (например Java). В случае обнаружения аспектов системы, требующих коррекции и/или дополнительного анализа, производится коррекция и/или дополнительный анализ исходной модели и переходим к шагу 3. Если результаты удовлетворительны, переходим к шагу 6.

6. Имеется две возможности усиления полученных результатов: *аналитическое исследование свойств* аналитическими методами и *автоматическое доказательство свойств* с помощью системы автоматического доказательства теорем системы Maude [6].

7. Реализация системы на практике. На данном этапе возможен фоновый статистический анализ для оценки основных метрик системы в реальных условиях.

## РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОЙ ГРУППОВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ВИРУСОВ

Первый этап разработки описан в [7], где рассматривается построение предварительной математической модели коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов. За основу рассматриваемой

системы защиты взята система, предложенная в [8]. Данная система имела недостаток, который заключался в возможности нахождения «успешной» атаки. В [9] была предложена методика построения атаки [9], следуя которой вирус имел возможность заразить все узлы системы. В [7] данная проблема была решена посредством введения вероятностей в модель. Был проведен статистический анализ метрик, обычно используемых для анализа систем подобного типа и изучено влияние алгоритма выбора групп оповещения на эффективность системы защиты.

Второй этап разработки описан в [10], где описывается апробация полученной системы защиты. Модель системы транслируется в приложение Java, которое разворачивается на виртуальных машинах, имеющих общую сеть, и проводится ее статистический анализ по метрикам, аналогичным использованным на первом этапе разработки с целью выявления аспектов системы, значимость которых проявляется при создании прототипа системы. В процессе апробации было обнаружено преимущество протокола UDP по сравнению с протоколом TCP/IP. Для оценки максимально возможной выгоды от использования UDP был произведен статистический анализ исходной модели РООСГ с соответствующими протоколам значениями параметров. Также было оценено влияние размера групп оповещения и общего количества узлов, и рассмотрен вопрос масштабируемости системы.

В данный момент ведутся работы по реализации системы для целей практического внедрения. Система защиты будет представлять собой сервис, реализованный на языке С и сервисное приложение, которое будет предоставлять информацию о состоянии узлов сети в реальном времени и позволять запускать статистический анализ многократного тестового прогона заражения для оценки функционирования системы на практике.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе была предложена методология разработки сложных систем с асинхронной коммуникацией и описана разработка коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов в соответствии с предлагаемой методологией. На первом этапе разрабатывается предварительная математическая модель системы, которая дорабатывается на основе результатов проводимого статистического анализа модели. На втором этапе производится апробация модели в условиях, приближенных к реальным, статистический анализ реализации модели и доработка исходной модели

на основе полученных результатов. На третьем этапе ведутся работы по реализации модели для целей практического внедрения системы. Полученная система также будет анализироваться статистическими методами до ее ввода в эксплуатацию.

#### Библиографические ссылки

1. Шарыкин Р.Е., Курбацкий А.Н. Модель распределенных объектно-ориентированных стохастических гибридных систем // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2019, № 2. – С. 52-61.
2. Шарыкин Р.Е., Курбацкий А.Н. Верификация Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем // Вестник Гродненского Государственного Университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 123-133.
3. Clavel M. [et al] Maude: Specification and programming in rewriting logic // Theoretical Computer Science. – 2002. – Vol. 285, iss. 2. – P. 187-243.
4. Clavel M. [et al] Building equational proving tools by reflection in rewriting logic // CAFE: An Industrial-Strength Algebraic Formal Method / K. Futatsugi [et al]. – Amsterdam, 2000. – Ch. 1. – P. 1-31.
5. Sen K., Viswanathan M., Agha G. On statistical model checking of stochastic systems // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3576. – P. 266-280.
6. Sebastio S., Vandin A. MultiVeStA: Statistical model checking for discrete event simulators // Proceedings of the 7th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Torino, 10-12 December, 2013 ; eds.: A. Horvath [et al]. – Torino, 2013. – P. 310-315.
7. Шарыкин Р.Е., Курбацкий А.Н. Применение Формальных Методов при Проектировании Коллаборационной Системы Противовирусной Защиты // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2020. – Т. 1. – С. 59-69.
8. Briesmeister L., Porras P. Microscopic simulation of a group defense strategy // Proceedings of Workshop of Principles of Advanced and Distributed Simulation, Monterey, California, US, 1-3 June, 2005 / Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society ; eds.: D. Nicol [et al]. – 2005. – P. 254-261.
9. Briesmeister L., Porras P. Automatically deducing propagation sequences that circumvent a collaborative worm defense // Proceedings of International Performance Computing and Communications Conference, Phoenix, Arizona, US, 10-12 April, 2006 / Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society ; eds.: H. Hassanein [et al]. – Phoenix, 2006. – P. 587-592.
10. Шарыкин Р.Е. Апробация модели стохастической коллаборационной защиты от вирусов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2021, № 4. – P. 62-70.

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗЕРНА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

**Н. А. Шляго**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*nikkitash01@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. И. Пириштук, ст. преп.,*

*А. Н. Чичко, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Работа ставит своей целью разработку программного обеспечения для анализа качества зерна в процессе его уборки с применением нейронных сетей. Качество зерна определяется объемом мусорных объектов, недомолотого зерна, дробленого зерна в чистом объеме, что в дальнейшем определяет объем продукции, которая разрешена к продаже. В ходе работы было обучено и протестировано несколько нейросетевых и классических алгоритмов, из которых впоследствии были выбраны модели для внедрения в программное обеспечение. Разработанное программное обеспечение протестировано в реальных условиях. Тестирование показало наличие практически линейной зависимости между измеряемыми показателями нейросетевых моделей и объема содержания примесей, что показывает применимость предложенного метода и возможность его дальнейшего внедрения.

**Ключевые слова:** зерно; набор данных; нейронные сети; качество зерна; детекция; сегментация.

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Эта задача является одной из задач агротехники, решение которой позволяет решить ряд проблем:

- 1.обеспечить рост производительности труда в сельском хозяйстве;
- 2.оптимизировать экономические затраты на технологию производства сельхозпродукции;
- 3.повысить уровень культуры агрономического производства, снизив потери урожая;
- 4.сократить время уборки урожая за счет использования роботизированных комплексов, увеличивающих время работы.

Поэтому ПО, способное решать подобные задачи, продолжает улучшаться и поступать на рынок [1].

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

### **Подготовка данных**

Для обучения нейросетей были созданы синтетические образцы из семенной пшеницы с различным содержанием битого зерна, недомолота и мусора. С помощью специальных макетов были сделаны фотографии зерна. На текущий момент обучающая выборка состоит из более 1000 полностью размеченных изображений. На первом этапе были выделены три класса объектов для разметки: битое зерно, недомолотое зерно и мусор. После анализа полученных результатов было принято решение разделить классы недомолота и мусора. На следующем этапе были определены для разметки следующие восемь классов различных:

- битое зерно;
- недомолотое уверенное зерно;
- недомолотое неуверенное зерно;
- зерно, напоминающее недомолотое;
- круглый мусор;
- мусор-палка;
- мусор-шелуха;
- остальной мусор.

### **Результаты работы нейронных сетей, анализ и сравнение**

Для решения задачи анализа качества зерна из предложенных методов были использованы различные нейронные сети. Из всех использованных сетей была отобрана сеть YOLOv4-tiny - нейронная сеть для задачи детекции объектов на базе фреймворка Darknet [3]. Была использована облегченная версия YOLOv4 [2], которая содержит около 30 слоев. Это позволяет достаточно быстро учить подобную модель, а после обучения тестировать. Данное свойство позволяло выявлять неточности в разметке за счет того, что на достаточно простых задачах, где достигалось ранее высокое качество. Для решения задачи использовались две одноклассовые и одна трехклассовая нейронные сети YOLOv4-tiny. Первая сеть детектировала только один класс, «битое зерно», для обучения использовался класс «битое зерно» из разметки. Вторая сеть детектировала только один класс «недомолот», для обучения использовался класс «недомолотое уверенное зерно». Третья нейронная сеть детектировала и классифицировала три класса: «мусор-палки», «круглый мусор», «остальной мусор».

Сеть YOLOv4 была отобрана по следующим причинам:

1. Качество работы удовлетворяет требуемым критериям качества.

2.Создание обучающей выборки для нейронных сетей для задачи детекции является менее трудозатратной задачей, что позволяет за небольшое время собрать достаточно много данных.

## **СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

### **Программное обеспечение для обучения нейронных сетей**

Для создания ПО анализа качества зерна в первую очередь необходимо иметь модели, которые позволяют собирать данные о примесях по изображению. В качестве такой в главе 3 была выбрана нейронная сеть YOLOv4. Для анализа объектов зеренной структуры было принято решение использовать небольшие нейронные сети, каждую для своей примеси, то есть одна сеть для битого зерна, одна - для недомолотого, одна - для мусора. Как уже было сказано, выборка размечалась с помощью CVAT [4], поэтому необходимо было создание перехода от разметки CVAT, которая могла включать разметку нескольких задач, в одну общую разметку. Для этих целей был создан Jupyter Notebook, который решает следующие задачи:

- 1.Объединение выборки из различных задач CVAT в единую выборку.
- 2.Задание только тех классов, что необходимо оставить в выборке с соответствующим изменением в самой выборке. Это необходимо в силу факторов, описанных выше: существуют классы, разметка для которых имеют большую дисперсию среди разметчиков и их отбрасывание способствует улучшению качества работы сети.
- 3.Сборка фреймворка Darknet с поддержкой CUDA и CuDNN.
- 4.Обучение нейронной сети YOLOv4 из заданного конфига с сохранением весов на Google Drive.

### **Программное обеспечение для анализа работы нейронных сетей**

Для анализа качества работы выбранной нейронной сети YOLOv4 необходимо написание приложения обработки произвольного количества экспериментов, каждый из которых состоит из своего источника данных и имеет свои настройки.

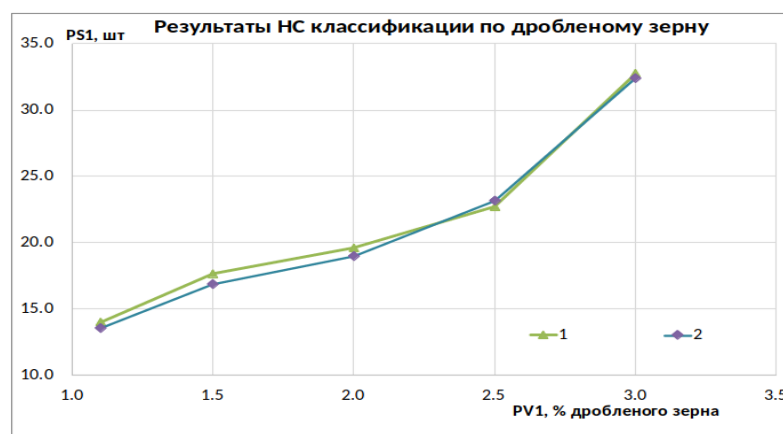
Для написания подобного приложения был выбран язык программирования C++, для работы с нейронной сетью фреймворк Darknet. Для гибкого ввода различных параметров было решено использовать файлы конфигурации в формате JSON.

Результатами работы программы является проанализированное произвольное количество экспериментов с разметкой найденных объектов и рассчитанными статистическими значениями по сериям.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Было проведено исследование взаимосвязей между усредненными метриками нейронной сети и концентрациями не зерновых и дробленых компонентов зерновой массы. В исследовании использовались синтетические образцы зерновой массы.

На рисунке представлены результаты этого исследования. По оси ординат представлены показатель нейронной сети PS1, который был рассчитан по видеорядам для объектов не зерновых и дробленных компонентов зерновой массы с помощью нейронной сети YOLOv4. По оси абсцисс представлены величины PV1, которые являлись фактической объемной концентрацией объектов не зерновых и дробленных компонентов зерновой массы. Следует отметить, что данные оси абсцисс получены ГОСТ 30483-97 методом на пробах 50 грамм.



Взаимосвязь PS1 –PV1 для определения объемной доли дробленого зерна в движущемся зерновом образце, полученные с помощью нейронной сети YOLOv4 (1 – 20 серий или 180 фото, 2 – 30 серий или 270 фото) для экспериментов с разной долей недомолота: 0,5 \% недомолота (а), 0,7\% (б)

### Библиографические ссылки

1. John Deere products [Electronic resource]. - 2021. - Mode access: <https://www.deere.ru/ru/> (11 декабря 2021).
2. Alexey Bochkovskiy, Chien-Yao Wang, Hong-Yuan Mark Liao YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Electronic resource]. - 23 Apr 2020- Mode access: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (11 декабря 2021).
3. Darknet framework [Electronic resource]. - 2021. - Mode access: <https://github.com/AlexeyAB/darknet> (11 декабря 2021).
4. Computer Vision Annotation Tool [Electronic resource]. - 2021. - Mode access: <https://github.com/openvinotoolkit/cvat> (11 декабря 2021).



# IDENTIFICATION OF GENOMIC MUTATIONS ASSOCIATED WITH DRUG-RESISTANT TUBERCULOSIS

**Yuxiang Chen**

*Belarusian State University, Minsk;*

*c894424323@outlook.com ;*

*supervisor – A.V. Tuzikov, Doctor of physic-mathematical sciences, professor*

Drug resistance in tuberculosis (TB) is a global public health issue, and resistance testing early in therapy can help prevent antibiotic abuse. Data used is from the NIAID TB Portals program (<https://tbportals.niaid.nih.gov>). Mtb whole genome sequences from 645 patients were utilized after quality inspection. To identify mutation sites associated with drug resistance, single-marker and multi-marker tests were used. Important mutation sites associated with TB drug resistance were discovered. On the one hand, these mutation sites can give important information for understanding TB resistance, and they can be utilized for a quick screening approach for various forms of TB drug resistance.

**Keywords:** drug-resistance, tuberculosis, single-marker tests, multi-marker tests.

## INTRODUCTION

Worldwide, it is estimated that between 1.7 billion and 1.8 billion individuals are infected with the causative agent, *Mycobacterium tuberculosis* (Mtb) [1]. More cases of drug resistance have emerged, the appearance including Monoresistance (MonoDR), resistance to one first-line anti-TB drug only; multi-drug resistance (MDR-TB), resistance to isoniazid and rifampicin; and extensive drug resistance (XDR-TB), one fluoroquinolone, and one second-line injectable drug [2]. For the most effective first-line drug, rifampicin, the proportion of new cases of resistance is higher [1]. Therefore, TB drug resistance is a global public health issue. Various machine learning models have been applied to determine drug resistance, e.g., logistic regression (LR) [3], and random forest (RF) [4]. The Genome-wide association analysis (GWAS) method was applied for TB drug resistance analysis in Belarus[5].

## MATERIALS AND METHODS

Data used is from the NIAID TB Portals program (<https://tbportals.niaid.nih.gov>). A total of 8 drugs were selected, four first-line drugs, Isoniazid, Rifampicin, Ethambutol Streptomycin (INH", "RIF", "EMB", "S") and four second-line drugs Ofloxacin, Amikacin, Kanamycin, Capreomycin ("OFX", "AM", "KM", "CM"). There are five drug resistance test systems: bactec, le, ipaother, hain, and geneexpert. At least one of the five tests for a drug for a sample is present, otherwise the test results for this sam-

ple are missing. TB whole genome sequences from 645 patients were utilized after quality inspection. Subsets of drug resistant and sensitive samples to the specified drugs are presented in Table 1.

Table 1

**Subsets of drug resistant (R) and sensitive (S) case**

Drug names	INH	RIF	EMB	S	OFX	AM	KM	CM
R	338	414	224	261	138	74	99	86
S	194	204	268	198	296	313	260	363

There are a total of 4,418,596 nucleotide sites in the whole genome of Mycobacterium tuberculosis. Due to the large amount of data, some unmutated sites need to be removed. Remove the nucleotide sites that have not been mutated in the sample subset. At this time, the sample's total number of sites is 253,195. Set the MAF (Minor Allele Frequency) to 0.01, and remove the sites whose mutation ratio is less than MAF. The number of mutations (SNPs) in the sample left after filtering out is 11,846.

Single-marker tests are used to test associations between observed drug resistance and individual mutations [3]. Fisher's exact test and the linear regression model were used as single-marker tests. Fisher's exact test needs Constructing the drug sensitivity test and mutation 2D contingency table of cases.

Table 2

**Contingency tables considered in single-marker tests for finding mutations associated with resistance**

Drug susceptibility	Presence of mutation		
	Present	Absent	Total
Sensitive	$n_{00}$	$n_{01}$	$n_{0*}$
Resistant	$n_{10}$	$n_{11}$	$n_{1*}$
Total	$n_{*0}$	$n_{*1}$	$n^{**}$

Linear regression model

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Y - Phenotype vector,  $\beta$ - Estimate, X- genotype vector,  $\varepsilon$ -residual vector

If resistance to the corresponding drug or drug combination is observed,  $Y_i = 1$ ; otherwise, it is equal to 0. If the genotype of this site is '0/0', means no mutation, then  $X_i = 0$ , otherwise if its genotype is '1/1', then  $X_i = 2$ . By calculating the estimate and its negative logarithm of p-values of all SNPs, and sorting them, we can finally get the relevant mutation sites for drugs.

Multi-marker test is used to select SNP combinations with forward selection method. The ratio of training set to test set is 7 versus 3. The classification model is SVM. The evaluation indicator is accuracy.

First, the p-value of a single SNP can be obtained according to the linear regression model. In order to reduce the amount of calculation, SNPs with p-values smaller than 0.05 are useful for classification. The number of useful SNPs depends on the type of drug. Then, in the second step, based on the selection of the first SNP, each SNP is re-evaluated to participate in the classification together with the first SNP, and the combination with the greatest improvement in accuracy is selected. Finally, keep iterating to add new SNPs until the accuracy no longer improves.

## RESULTS

We used the R software functions from the stats package: fisher test for Fisher's exact test and linear regression model. We calculated p-values for all corresponding mutations. The most significant mutation sites for resistance to each drug were identified.

Table 3

**The most significant mutation sites for resistance for each drug**

Drug names	Most significant Mutation sites
INH	C2155175G, C761158T
RIF	C2155175G, C761158T
EMB	C2155175G, A1473252G
S	C2155175G, C761158T, A781690G
OFX	C2155175G, C761158T
AM	G1473252A, T764844C, C2155175G
KM	G1473252A, C2155175G
CM	G1473252A, C2155175G

### Result of Multi-marker test

We use the SVM function in the 'e1071' package to complete the calculation, and the parameters kernel, c, and  $\gamma$  default values are respectively. Due to the huge amount of computation, the maximum number of combinations of mutation sites is set to 6. For each drug, we get some combination of mutation sites that can help improve classification accuracy.

Table 4

**The combination of mutation sites with the highest classification accuracy for each drug**

#### a. First-lines drugs

Combination	INH		RIF		EMB		S	
	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC
1 <sup>st</sup>	2155175	93.7%	2155175	90.8%	2155175	85.7%	2155175	87.6%
+2 <sup>nd</sup>	2715379	94.3%	761158	93.5%	2945211	87.0%	3594340	89.0%
+3 <sup>rd</sup>	3382091	95.0%	1673431	94.0%	2635600	87.8%	4247607	89.8%

Continuation Table 4

Combination	INH		RIF		EMB		S	
	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC
+4 <sup>th</sup>	3736070	95.6%	1473252	94.6%	3594340	88.4%	761143	9.05%
+5 <sup>th</sup>	2187314	96.2%	1593235	95.1%	2059530	89.1%	2747161	9.12%
+6 <sup>th</sup>			580451	95.7%			761158	91.2%

### b.Second-lines drugs

Combination	OFX		AM		KM		CM	
	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC	Positions	ACC
1 <sup>st</sup>	2155175	78.3%	1473252	92.2%	1473252	86.9%	1473252	88.9%
+2 <sup>nd</sup>	2626523	82.2%	104912	93.9%	2715379	90.7%	2155175	89.6%
+3 <sup>rd</sup>	4353537	84.5%	2155175	94.8%	2715356	93.5%	837917	90.4%
+4 <sup>th</sup>	7582	86.0%	3946824	95.7%	1789677	94.4%	761112	91.1%
+5 <sup>th</sup>	2796141	88.4%			2340112	95.3%	1091972	91.9%
+6 <sup>th</sup>	761098	89.9%					4053284	92.6%

## DISCUSSION

In this paper, we used single-marker and multi-marker tests to identify mutations associated with TB drug resistance. The results of the single marker test reflect the association of a single mutation site with resistance to each drug. We found that the mutation sites highly associated with first-line drug resistance were different from those of second-line drugs. At the same time, we found that among the same drugs, significant mutation sites are highly similar, which also reflects the existence of cross-resistance between drugs [6]. However, for some second-line drugs, the accuracy improvement of the classifier is larger with combination of mutations.

## References

1. World Health Organization et al. World Health Organization Global Tuberculosis Report 2020 // World Health Organization. – 2020. – Vol. 232.
2. for the Meta T. C. G. et al. Treatment correlates of successful outcomes in pulmonary multidrug-resistant tuberculosis: an individual patient data meta-analysis // The Lancet. – 2018. – Vol. 392. – №. 10150. – P. 821-834.
3. Farhat M. R. et al. Genetic determinants of drug resistance in Mycobacterium tuberculosis and their diagnostic value // American journal of respiratory and critical care medicine. – 2016. – Vol. 194. – №. 5. – P. 621-630.
4. Kouchaki S. et al. Multi-label random forest model for tuberculosis drug resistance classification and mutation ranking // Frontiers in microbiology. – 2020. – T. 11. – P. 667.
5. Sergeev R. S. et al. Genome-wide analysis of MDR and XDR Tuberculosis from Belarus: Machine-learning approach // IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics. – 2017. – Vol. 16. – №. 4. – P. 1398-1408.
6. Rumiantava K. et al. Search for Genomic Mutations Associated with Drug-resistant Tuberculosis. – 2021.

# ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ ПРИМЕСНЫХ ПОДЗОН В КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

**А. А. Афоненко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anatolii92111@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. В. Ушаков, канд. физ.-мат. наук*

На основе расчетов двумерных волновых функций заряженных примесей квантово-каскадных лазерных гетероструктур ТГц диапазона проведен анализ энергетического спектра примесных уровней. Найдено, что локализованные состояния возникают у каждой подзоны размерного квантования в сверхрешетке. Глубина залегания примесных состояний увеличивается с уменьшением размера локализации волновых функций.

**Ключевые слова:** квантово-каскадная гетероструктура; примесные состояния; энергия активации.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ведутся интенсивные исследования по разработке квантово-каскадных лазеров ТГц диапазона, которые могут быть востребованы в спектроскопических приложениях, оптической связи и локации, телекоммуникациях и т. д. [1]. Актуальными являются исследования по совершенствованию физических и математических моделей квантово-каскадных лазеров, которые позволяют повысить надежность и обоснованность проектируемых технических устройств [2]. Одним недостаточно изученных вопросов физики квантово-каскадных гетероструктур является влияние легирования на энергетическую структуру и процессы переноса заряда.

В работе [3] показано, что волновые функции примеси локализуются в самой широкой квантовой яме, энергия активации примесей варьируется в широких диапазонах в зависимости от положения примеси, что приводит к появлению значительных хвостов плотности состояний. Учет переноса заряда по примесным состояниям приводит к сглаживанию первого резонансного пика вольт-амперной характеристики, связанного с туннелированием электронов с уровня инжектора на нижний лазерный уровень [4]. В настоящей работе

проведен анализ плотности состояний примесных зон для различных подзон размерного квантования квантово-каскадной сверхрешетки.

## ДИЗАЙН КВАНТОВО-КАСКАДНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона обычно основаны на дизайне, который использует резонансное испускание оптических фононов для опустошения нижнего лазерного уровня. В работе анализировалась структура лазера  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  с периодом из 4-х слоев 3.26/7.99/1.90/16.46 нм, генерирующего излучение с частотой около 3.9 ТГц [1, 5]. Базисные волновые функции, полученные при решении одномерного уравнения Шредингера с последующей процедурой локализации [2], приведены на рис. 1. Работа лазера обеспечивается переносом заряда по трем нижним подзонам, которые дублируются в каждом периоде.

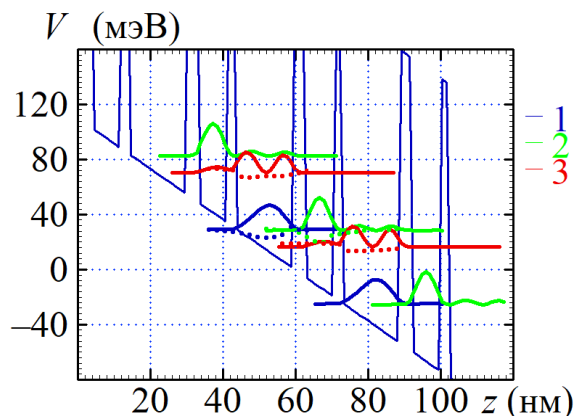


Рис. 1. Зонная диаграмма и координатные зависимости квадратов волновых функций сверхрешетки при внешнем напряжении 18 кВ/см

## РАСЧЕТ ПРИМЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ

Задача нахождения нижних состояний заряженной примеси сводится к двумерной задаче на собственные значения и собственные вектора. В цилиндрической системе координат уравнение Шредингера можно записать как:

$$E\varphi(\rho, z) = \left( -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{m_c(z)} \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\hbar^2}{2m_c(z)} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \varphi(\rho, z) + \left( V(z) - eE_e z - \frac{e^2 \exp(-q_{scr} \sqrt{\rho^2 + (z-z_0)^2})}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{\rho^2 + (z-z_0)^2}} \right) \varphi(\rho, z). \quad (1)$$

Здесь  $\varphi(\rho, z)$  – волновая функция, зависящая от координат  $\rho$  и  $z$ ,  $E$  – собственная энергия,  $m_c(z)$  – эффективная масса электрона, зависящая

от материала слоя,  $V(z)$  – потенциал, образованный гетерослоями структуры,  $E_e$  – напряженность внешнего электрического поля,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $q_{scr}$  – обратная длина экранирования,  $z_0$  – координата примеси. Заменой  $\varphi(\rho, z) \rightarrow \varphi(\rho, z)/\sqrt{\rho}$  можно преобразовать уравнение (1) к эрмитовой форме. Одномерное приближение получается из двухмерного уравнения (1) исключением кулоновского потенциала заряженной примеси и зависимости волновой функции от координаты  $\rho$ .

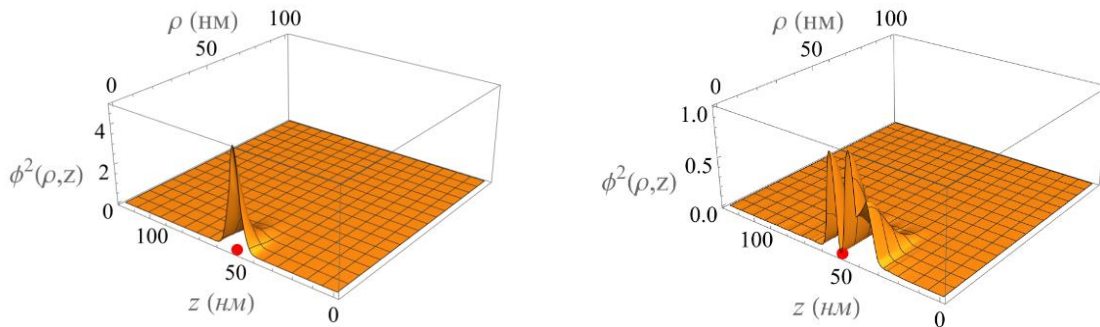


Рис. 2. Координатные зависимости квадратов волновых функций 1-го уровня примеси 1-й и 2-й подзоны сверхрешетки при расположении примеси в центре широкой квантовой ямы (показана кружком)

Локализованные примесные состояния возникают в каждой подзоне сверхрешетки (рис. 2). Квадраты двухмерных волновых функций, приведенные к одномерным путем интегрирования по радиальной плоскости, близки к зависимостям, полученным для соответствующих подзон в одномерном приближении (см. рис.1). Энергии залегания примесных состояний существенно зависят от положения примеси (Табл.). Первое значение в таблице рассчитано как разность энергий края подзоны и первого уровня примеси, второе – как разность энергий второго и первого уровней примеси. Глубина залегания максимальна при расположении примесного центра вблизи “центра тяжести” электронных плотностей соответствующих подзон. С уменьшением размера локализации волновых функций глубина залегания примесных состояний увеличивается.

Энергии примесных состояний, мэВ

Номер подзоны	Положение примеси	
	В центре широкой квантовой ямы	В центре узкой квантовой ямы
1	6.1 / 7.3	-0.7 / 1.4
2	-0.8 / 0.4	10.8 / 12.3
3	2.5 / 5.1	-2.2 / 2.6

## ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ ПРИМЕСНЫХ ПОДЗОН

Большой разброс энергий активации примеси приводит к появлению широкой примесной зоны (рис. 3). Рассчитанный в работе [6] параметр статистического уширения из-за взаимодействия с соседними примесями составил 3–4 мэВ.

Перенос заряда с участием примесной зоны можно учесть с использованием значительных хвостов плотности состояний (для лоренцевской формы основного уровня параметр уширения  $\sim 5$  мэВ), либо вводя в балансные уравнения дополнительную зону. При этом может возникать значительный канал переноса заряда с инжектора в примесную зону и далее на нижний лазерный уровень.

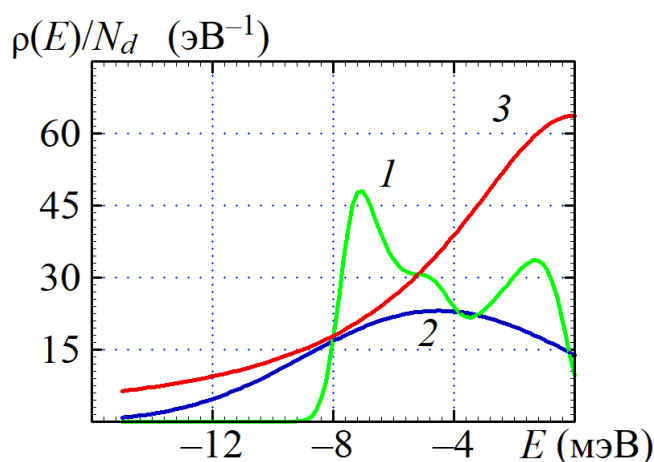


Рис. 3. Нормированная плотность заполненных состояний примесной зоны без учета (1) и с учетом (2) статистического усреднения энергий активации для 1-й подзоны сверхрешетки. Также приведена нормированная плотность заполненных состояний основного уровня квантовой ямы при лоренцевском уширении с полушириной 5 мэВ

### Библиографические ссылки

1. Bosco M., Franckie M., Scali G., et al. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K // *Appl. Phys. Lett.* 2019. Vol. 115, No. 1. P. 010601.
2. Ушаков Д. В., Афоненко А. А., Дубинов А. А. и др. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний. *Квантовая электроника*. 2019. Т. 49, № 10. С. 913–918.
3. Афоненко Ан. А., Афоненко А. А., Ушаков Д. В. Моделирование донорных состояний в квантово-каскадных гетероструктурах // *Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции*, Минск, 22–26 ноября 2021 г. — Минск: БГУ, 2021. С. 249–254.
4. Афоненко Ан. А., Афоненко А. А., Ушаков Д. В. и др. Перенос носителей заряда в квантово-каскадных гетероструктурах с участием локализованных донорных состояний // *Труды XXVI Международного симпозиума «Нанопизика и*



- нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г.) в 2 т. Том 2. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2022. С. 693–694.
5. Khabibullin, R. A., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A. Optimization of THz quantum cascade lasers with an active module based on two-quantum wells for high-temperature operation // IOP Journal of physics: Conference series. 2021. Vol. 2086, No 1. P. 012086 (1–4).
  6. Афоненко, Ан.А. Анализ статистического уширения уровней примеси в квантово-каскадных гетероструктурах / Ан.А. Афоненко, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. С. 151–154.

# ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Н. А. Гаврук, А. В. Капинос**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
rct.gavruk@bsu.by, rct.kapinos@bsu.by;  
науч. рук. – Т. П. Янукович, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Цель работы — определение оптимальной модели для решения задачи классификации. Выбраны необходимые библиотеки для реализации, произведена обработка данных, подготовлены обучающие и тестовые выборки. Был проведен анализ полученных результатов. В качестве инструмента для написания алгоритмов был выбран язык программирования — Python.

**Ключевые слова:** машинное обучение; обучение с учителем; классификация изображений; нейронные сети.

## ВВЕДЕНИЕ

Множество транспортных проблем невозможно быстро и качественно решить человеческими ресурсами. На место человека для решения таких проблем приходят технологии.

Существует огромное количество различных видов нейронных сетей[2], с разными подходами к машинному обучению. Изучая их, стоит обратить внимание на задачу, которую следует решить. В нашем случае решается задача классификации изображений. Для решения проблемы поиска парковочных мест была выбрана сверточная нейронная сеть, для классификации объектов на спутниковых изображениях использованы метод опорных векторов и остаточная нейронная сеть.

## ПРОБЛЕМА ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ

Исходными данными для решения первой задачи являются изображения, полученные со стационарных парковочных камер. Количество изображений: 1067 для свободных парковочных мест и 2195 для занятых. Предварительно изменяем размер каждого изображения (150x150 пикселей).

Для решения задачи используется сверточная нейронная сеть с параметрами обучения: количество эпох — 30, размер батча — 128.

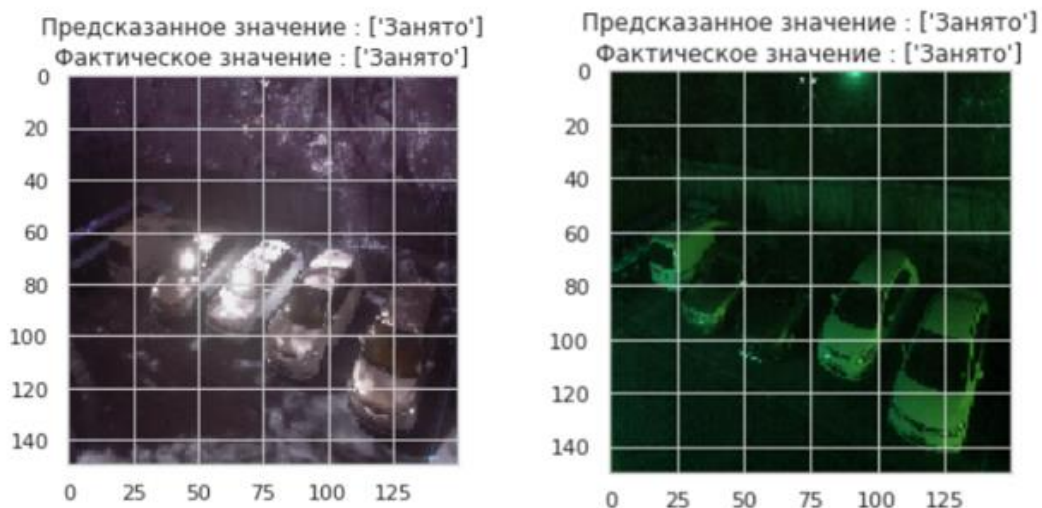


Рис. 1 Результат классификации

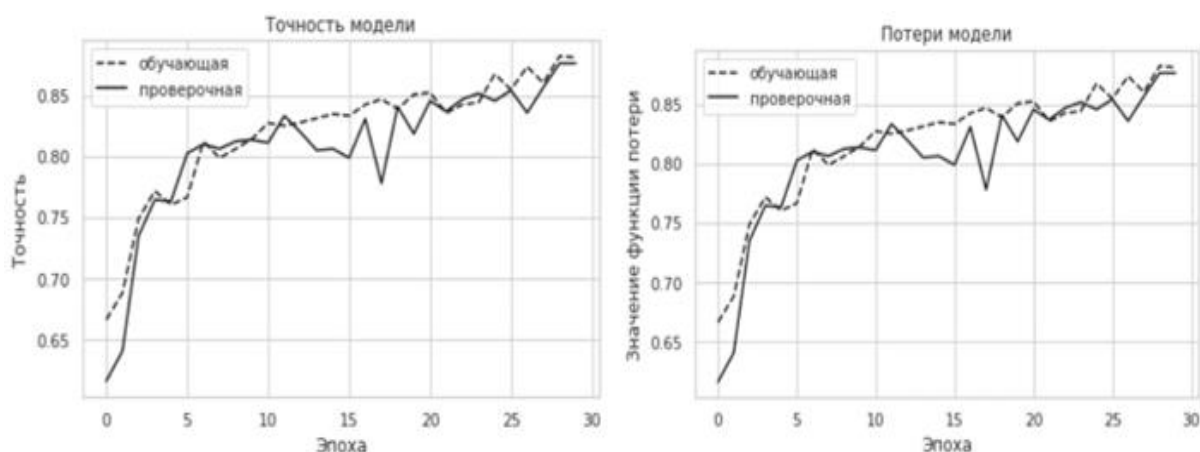


Рис. 2. Графики зависимости точности модели и значений функции потерь сверточной нейронной сети от количества эпох

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Для решения второй задачи использованы SAR-изображения (рисунок 3), полученные от спутниковой группировки Sentinel-1A/B. Задача состоит в том, чтобы классифицировать данные на два класса: айсберг или корабль. Набор спутниковых данных состоит из 1604 SAR-изображений.

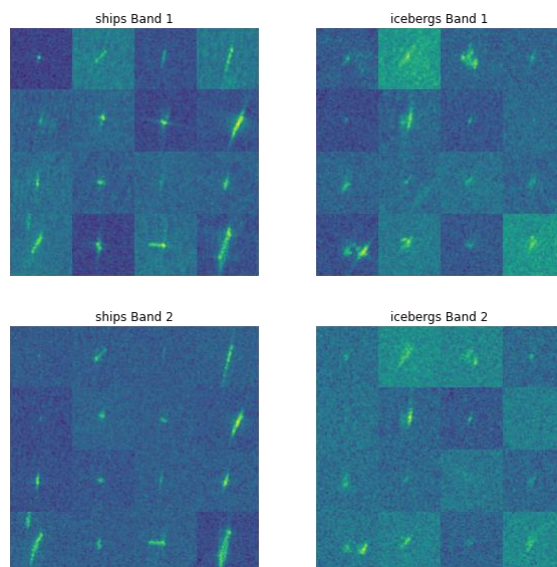


Рис. 3. Пример полученных квазиизображений

Для нахождения оптимальных параметров метода опорных векторов использована кросс-валидация. Функция близости — гауссова радиальная базисная функция, параметры:  $\gamma = 0,01$ ;  $C = 10$ .

ResNet модель может быть обучена за 35 эпох[1]. Соответственно, для нашей модели выбраны следующие параметры: количество эпох — 35, размер батча - 32. Результаты классификаторов представлены на рисунке 4.

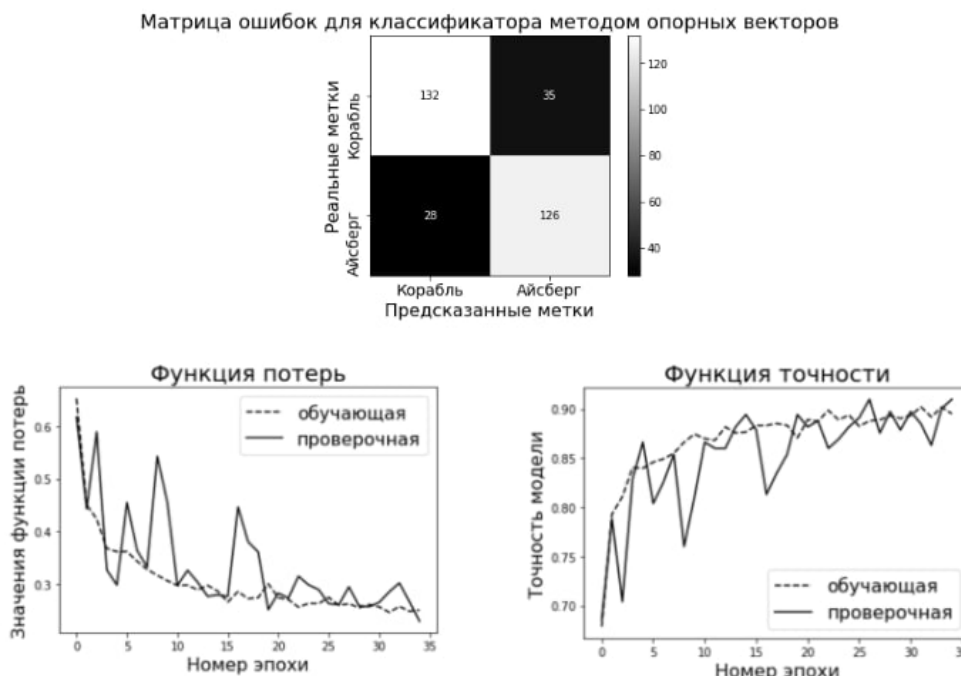


Рис. 4. Результаты классификаторов на основе метода опорных векторов (вверху) и функции потерь и функция точности модели с использованием остаточной нейронной сети (внизу)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ResNet модель большую точность, при меньшем количестве обучающей выборки с одинаковым количеством эпох. Соответственно, она является самой оптимальной.

### Точность моделей

Модель	Метод опорных векторов	Сверточная нейронная сеть	Остаточная нейронная сеть (ResNet)
Точность, %	81	87	90

### Библиографические ссылки

1. Osawa Kazuki. Second-order Optimization Method for Large Mini-batch: Training ResNet-50 on ImageNet in 35 Epochs / Kazuki Osawa, Yohei Tsuji, Yuichiro Ueno, Akira Naruse, Rio Yokota, Satoshi Matsuoka // CoRR. — 2018. — Т. abs/1811.12019. — arXiv: 1811 . 12019. — Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1811.12019>.
2. Schmidhuber Jürgen. Deep learning in neural networks: An overview / Jürgen Schmidhuber // Neural Networks. — 2015. — Т. 61. — С. 85—117. — ISSN 0893-6080. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608014002135>.

# ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ РАКА ГРУДИ ПО ГЕНОМНЫМ ДАННЫМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ

**А. А. Горбунова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anastasia.gorbunova.so@yandex.ru;*

*науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе представлены результаты сравнительного анализа алгоритмов равномерного приближения и проекции, нейронной сети прямого распространения, ансамблевого алгоритма на основе методов главных и независимых компонент, стохастического вложения соседей с t-распределением, равномерного приближения и проекции, многомерного шкалирования, неотрицательного матричного разложения для классификации данных об экспрессии генов в заболевании рака груди. Выполнен анализ данных экспрессии микро- и информационной РНК молекул. Наиболее точным алгоритмом является нейронная сеть прямого распространения, точность классификации микроРНК – 69%, информационной РНК – 83%.

**Ключевые слова:** экспрессия генов; микроРНК; информационная РНК; алгоритмы снижения размерности данных; ансамблевые алгоритмы; нейронные сети.

## ВВЕДЕНИЕ

Многомерные мультиомные данные являются стандартом в области исследования рака [1]. Новейшие геномные секвенаторы позволяют регистрировать большие наборы экспериментальных данных о нуклеотидном составе молекул ДНК/РНК, что усложняет визуализацию, интерпретацию и понимание результатов [2]. Алгоритмы снижения размерности данных устраняют указанные ограничения, при этом сохраняя важные свойства объекта исследования [3].

Наиболее перспективными методами снижения размерности данных являются: главных компонент (далее используется аббревиатура PCA от англ. principal component analysis), независимых компонент (ICA от англ. independent component analysis), стохастического вложения соседей с t-распределением (tSNE от англ. t-distributed stochastic neighbor embedding), равномерного приближения и проекции (UMAP от англ. uniform approximation and projection), многомерного шкалирования (MDS от англ. multidimensional scaling), неотрицательного матричного разложения (NMF от англ. non-negative matrix factorization), архитектура искусственных нейронных сетей автоэнкодер, а также варианты ансамблевых методов, основанных на стеккинге [1,4].

Рак груди – один из наиболее распространенных видов рака, являющийся гетерогенным заболеванием в отношении молекулярных изменений, клеточного состава и клинического исхода. Это разнообразие создает проблему при классификации опухолей, которые клинически полезны с точки зрения прогноза, что создает необходимость разработки предсказательных моделей заболевания по геномным данным. Большинство молекулярных исследований рака молочной железы сосредоточено на платформах с высоким содержанием информации, чаще всего на профилировании экспрессии мРНК или анализе числа копий ДНК, а в последнее время – на массовом параллельном секвенировании.

Цель работы – установить наиболее эффективный метод снижения размерности данных, регистрируемых в экспериментах геномного секвенирования по исследованию рака груди BRCA (от англ. Breast Cancer).

### **АЛГОРИТМЫ СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ДАННЫХ**

Рассмотрены нейронные сети автоэнкодеры. Автоэнкодер – нейронная сеть, состоящая из однослойного кодера с функцией активации гиперболический тангенс (Tanh от англ. TanhyPerbolic), которая сжимает данные до более низких измерений, и однослойного декодера с функцией активации Tanh, восстанавливающей исходный набор данных. Выходной слой кодера содержит сжатое представление исходных данных.

Стеккинг – технология ансамблевых алгоритмов, суть которой состоит в комбинировании результатов работы набора алгоритмов, в частности PCA, ICA, tSNE, UMAP, MDS, NMF [5]. После комбинирования результатов работы алгоритмов снижения размерности данных интегрированный набор проходит проверку на коррелированность признаков. Удаляются признаки с корреляцией выше 0.75. Полученный набор данных анализируется с помощью наилучшего, по результатам опубликованных работ [5], алгоритм снижения размерности данных UMAP [6].

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

Исследованы данные об экспрессии генов опухолей рака груди, представленные наборами микроРНК и информационной РНК для различных групп пациентов. Исследование является практически значимым в области диагностики рака груди. Наборы данных

различаются по числу генов и пациентов, степени зашумленности, что позволяет точно оценить эффективность алгоритмов. Наборы данных содержат пять подтипов рака груди BRCA, LumA, LumB, Basal, Her2, и данные Normal для эталонной группы здоровых людей (таблица 1). Подтип заболевания используется для оценки эффективности алгоритмов снижения размерности данных при разделении пациентов на кластеры.

Таблица 1

Количество пациентов и генов в наборах данных BRCA

Вид молекулы	Число пациентов					Число генов
	LumA	LumB	Basal	Her2	Normal	
иРНК	579	219	191	82	141	20126
микроРНК	407	139	133	58	110	625

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Выполнен анализ данных о микроРНК и информационной РНК молекулах с использованием методов снижения размерности данных и стэкинга. Эффективность алгоритмов оценена по трём критериям качества: 1) отношение средних внутрикластерных и межкластерных расстояний  $Q_1$ , 2) отношение суммы квадратов внутрикластерных и межкластерных расстояний  $Q_2$ , 3) точность классификации наборов данных в сниженном пространстве с использованием алгоритма случайного леса (с англ. – «Random forest»)  $acc_{RF}$  [7].

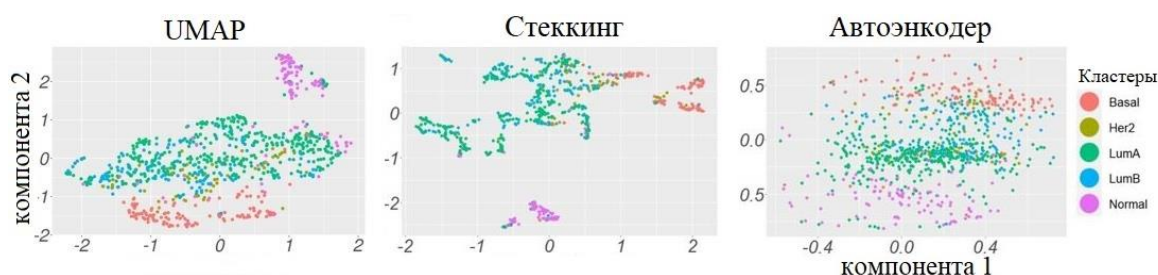
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализованы ансамблевый алгоритм стеккинга на основе результатов методов PCA, ICA, tSNE, UMAP, MDS, NMF и сети автоэнкодер. Результаты сравнительного анализа алгоритмов для двух наборов данных представлены в таблице 2, диаграммы наиболее информативных компонент. Наилучшие результаты для данных микроРНК по критериям  $Q_1$  и  $Q_2$  получены в результате стеккинга:  $Q_1 = 32$  и  $Q_2 = 29$ , по критерию точности – в результате работы автоэнкодера:  $acc_{RF} = 69\%$ , что ненамного ниже, чем в исходном пространстве признаков (74%). В результате стеккинга установлено более четкое разделение подтипов рака Basal, Normal и Her2, в сравнении с другими алгоритмами.



**Оценки критериев качества работы алгоритмов  
на экспериментальных наборах данных**

Набор BRCA	$Q_1$			$Q_2$			acc <sub>RF</sub> , %		
	UMAP	Стеккинг	Автоэнкодер	UMAP	Стеккинг	Автоэнкодер	UMAP	Стеккинг	Автоэнкодер
иРНК	25	<b>25</b>	32	15	<b>14</b>	24	79	78	<b>83</b>
микроРНК	38	<b>32</b>	45	37	<b>29</b>	50	69	67	<b>69</b>



Диаграммы разброса для кластеров данных miRNA в координатах двух наиболее информативных компонент, вычисленных методами UMAP, стеккинга и автоэнкодером

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ методов снижения размерности данных для исследования экспрессии генов данных рака груди. Оптимальным алгоритмом является метод ансамблевый метод на основе стеккинга, точность которого на данных об экспрессии микроРНК – 69%, экспрессии информационной РНК – 83%.

### Библиографические ссылки

1. *Cantini, L., Zakeri, P., Hernandez, C. et al.* Benchmarking joint multi-omics dimensionality reduction approaches for the study of cancer / *L. Cantini, P. Zakeri, C. Hernandez* // *Nature Communications*, 2021. № 12. P. 124.
2. *Grinev V. V., Yatskou M. M., Skakun V. V., Chepeleva M. K., Nazarov P. V.* ORHunter: an accurate approach for the automatic identification and annotation of open reading frames in human mRNA molecules // *Software Impacts*. – 2022.
3. *Яцков, Н. Н.* Комплексный анализ данных при исследовании сложных бимолекулярных систем / *Н. Н. Яцков, В. В. Ананасович* // *Информатика*. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 105–122.
4. *Espadoto, M., Hirata, N. S. T., & Telea, A. C.* Self-supervised Dimensionality Reduction with Neural Networks and Pseudo-labeling. In *C. Hurter, H. Purchase, J. Braz, & K. Bouatouch*, IVAPP, 2021. P. 27-37.

5. *Gorbunova, A.* Comparative study of dimensionality reduction methods for multi-omics data / Anastasiya Gorbunova, Mikalai Yatskou, Petr Nazarov // Tumor Heterogeneity, Plasticity and Therapy. 5-6 May 2021. P. 77.
6. *McInnes, L. & Healy, J.* Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction. arXiv – 2018. – № 18. – P. 1802.
7. *Горбунова, А.А.* Разработка и программная реализация алгоритмов снижения размерности данных биофизических экспериментов // 78-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета: материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021.

# МОДИФИКАЦИЯ МАШИНЫ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ И СТАДИЙ НЕМЕЛКОКЛЕТОЧНОГО РАКА ЛЕГКИХ

М. А. Демидик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*marydemidik@gmail.com;*

*науч. рук – Н.Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В настоящее время молекулярные механизмы возникновения и развития онкологических заболеваний изучены не до конца. Существующие модели анализа геномных данных не учитывают взаимодействия в генных сетях. Использование методов машинного обучения на основе машины Больцмана позволяет учитывать влияние генных регуляторных механизмов и повысить точность классификации подтипов и стадий немелкоклеточного рака лёгких.

**Ключевые слова:** классификация, машина Больцмана, немелкоклеточный рак легких, экспрессия генов, машинное обучение.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие онкологического заболевания связано с изменением молекулярных механизмов клеточной регуляции, которые все еще недостаточно хорошо изучены, особенно на ранних стадиях заболевания [1]. Используя методы машинного обучения возможно улучшить понимание процессов развития рака, выявить биомаркеры, ответственные за стадийность и тип опухоли, что позволяет назначать пациенту таргетированное лечение [2].

Несмотря на большое количество исследований немелкоклеточного типа рака легких, изучение подтипов данного вида онкологии продолжается [3,4]. Опубликованные работы свидетельствуют о существенных отличиях в развитии опухолевого процесса у подтипов LUAD и LUSC [2].

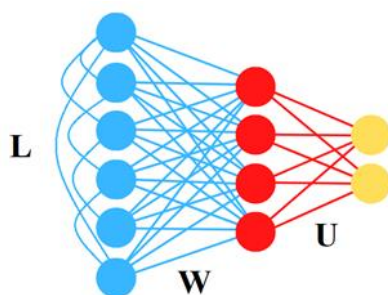
Модели анализа геномных данных основываются на учете корреляционной взаимосвязи между признаками, или регистрируемыми характеристиками объекта исследования, в качестве которых может выступать экспрессия генов. Применяются методы машинного обучения, результат работы которых сложно биологически интерпретировать [3,4]. Использование архитектуры нейронной сети в основе машины Больцмана, допускающей латеральные связи между видимыми нейронами, может позволить учесть не только вклад определенного признака в результат классификации, но и статистические взаимодействия между признаками.

Цель работы – разработать и программно реализовать нейросетевую модель классификации подтипов и стадий рака на основе машины Больцмана.

## МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МАШИНЫ БОЛЬЦМАНА

Предлагаемая модель классификации подтипов и стадий рака легких основана на машине Больцмана и является стохастической рекуррентной нейронной сетью [5]. Машина Больцмана содержит видимые бинарные нейроны  $v \in \{0,1\}^m$  ( $m$  – количество видимых нейронов) и скрытые бинарные нейроны  $h \in \{0,1\}^n$  ( $n$  – количество скрытых нейронов). Нейронная сеть моделирует распределение состояний видимых нейронов на основе состояний скрытых нейронов. В общем случае допускаются связи между нейронами всех типов. Для учета взаимодействия между признаками в модели предлагается использовать полуограниченную машину Больцмана, где установлены связи между видимыми и скрытыми нейронами, а также латеральные связи между видимыми нейронами. Для адаптации модели под задачу классификации добавляется выходной слой, результирующая функция  $y \in \{0,1\}^k$ , где  $k$  – количество классов [6].

Для обработки данных экспрессии бинарные функции активации видимых нейронов заменяются на линейные с добавлением компоненты Гауссова шума [5]. Параметры модели: матрица весовых коэффициентов  $L$ , характеризует взаимодействия видимых нейронов, матрица взаимодействий видимых и скрытых нейронов  $W$ , матрица взаимодействия нейронов выходного слоя и скрытых  $U$ , вектора  $a, b, c$  – смещения видимых, скрытых и выходных нейронов соответственно. Архитектура модели на основании полуограниченной машины Больцмана представлена на рисунке.



Архитектура нейронной сети

Энергия состояния системы выражается формулой:

$$E(v, y, h, \theta) = -a^T v - b^T h - c^T y - h^T W v - h^T U y - v^T L v, \quad (1)$$

где  $\theta = \{a, b, c, W, U, L\}$  множество параметров модели.

Для вычисления состояния нейронов используются условные вероятности того, что видимый нейрон  $i$  примет значение  $x$  [5]:

$$p(v_i = x | h, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(x - a_i - \sigma_i \sum_{j=1}^n h_j W_{ij} - \sigma_i \sum_{j=1}^m v_j L_{ij})^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратичное отклонение для видимого нейрона  $i$ .

Скрытые нейроны взаимодействуют с видимыми и выходными нейронами. Нейрон активируется, если его условная вероятность больше чем сгенерированная реализация равномерно распределенной случайной величины на отрезке от 0 до 1. Условная вероятность для скрытых нейронов:

$$p(h_i = 1 | v, y) = g(b_i + \sum_{j=1}^m v_j W_{ij} + \sum_{j=1}^k y_j U_{ij}), \quad (3)$$

где  $g$  – логистическая функция.

Условная вероятность для нейронов выходного слоя:

$$p(y_i = 1 | h) = g(c_i + \sum_{j=1}^n h_j U_{ij}), \quad (4)$$

Обучение модели происходит на основании минимизации отрицательной логарифмической функции правдоподобия:

$$-\log(p(v, y)) = F(v, y), \quad (5)$$

где  $F$  – свободная энергия системы [5]

$$F(v, y) = -a^T v - c^T y - v^T L v - \sum_{i=1}^n \log\left(1 + e^{b_i + \sum_{j=1}^m W_{ij} v_j + \sum_{j=1}^k U_{ij} y_j}\right). \quad (6)$$

Полуограниченная машина Больцмана обучается методом контрастной дивергенции [5], что требует вычисления нового состояния

системы с помощью формирования выборок (сэмплирования) по Гиббсу входного и выходного векторов  $v_p, y_p$ .

Общий алгоритм обучения модели:

1. Инициализировать  $a, b, c, W, U, L$ , задать количество эпох  $T, p$  — количество шагов сэмплирования по Гиббсу,  $\lambda$  — скорость обучения.

2. Для каждой эпохи:

2.1. Повторить  $p$  раз:

Вычислить  $h_p \sim p(h/v_p, y_p), y_{p+1} \sim p(y|h_p), v_{p+1} \sim p(v/h_p, v_p)$

2.2. Вычислить параметры  $\theta_{t+1} = \theta_t + \lambda \left( \frac{\partial}{\partial \theta} F(v, y) - \frac{\partial}{\partial \theta} F(v_p, y_p) \right)$ .

Параметры модели вычисляются с помощью стохастического градиентного спуска. Для ускорения обучения в модели используется пакетный градиентный спуск с импульсом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обучения разработанной модели классификации использовались данные экспрессии генов из открытой базы данных геномного секвенирования проекта TCGA (The Cancer Genome Atlas) о пациентах с двумя подтипами немелкоклеточного рака легких: аденокарцинома и плоскоклеточная карцинома. В ходе обработки данных были произведены логарифмирование значений экспрессии, отбор наиболее информативных признаков и стандартизация. Точность классификации стадий рака легких моделью составила 69%, что выше опубликованных значений, полученных при применении моделей машины опорных векторов 62% и случайного леса 58% [4]. Точность классификации подтипов немелкоклеточного рака легких составила 96,1%, что превышает значения опубликованных моделей [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель машины Больцмана позволяет повысить точность классификации подтипов и стадий немелкоклеточного рака легких по данным экспрессии генов. Подтверждена возможность использования матрицы весовых коэффициентов  $L$  для построения генной сети с целью изучения регуляторных механизмов. Для улучшения качества классификации перспективно построение глубоких сетей доверия путем комбинации ограниченных машин Больцмана, где первым слоем может выступать полуограниченная машина Больцмана.

### Библиографические ссылки

1. *Herbst R., Morgensztern D., Boshoff, C.* The biology and management of non-small cell lung cancer // *Nature*. 2018. V. 553. P. 446–454.
2. *Демидик М. А., Яцков Н. Н., Назаров П. В.* Исследование геномных данных в заболевании немелкоклеточного рака легких с применением алгоритмов автоматического отбора информативных признаков // *Генетика и биотехнология XXI века: мат. IV междунар. науч. конф. ИГиЦ НАН РБ*. 2020. С. 144.
3. *Rahimi A., Gönen M.* Discriminating early- and late-stage cancers using multiple kernel learning on gene sets // *Bioinformatics*. 2018. V.34. P. 412–421.
4. *Statnikov A.* A comprehensive comparison of random forests and support vector machines for microarray-based cancer classification // *Bioinformatics*. 2008. V.9. P. 319.
5. *Salakhutdinov R., Hinton G.* An Efficient Learning Procedure for Deep Boltzmann Machines // *Neural Computation*. 2012. V.24. P. 1967–2006
6. *Larochelle H., Mandel M., Pascanu R., Bengio Y.* Learning Algorithms for the Classification Restricted Boltzmann Machine // *J. of Machine Learning Research*. 2012. V. 13. P. 643-669

## РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ФУНКЦИИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ-МУЛЬТИМЕТРА В-385

А. С. Дроздов

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*antosha-02@mail.ru;*

*науч. рук – А. М. Огурцов, ст. науч. сотрудник*

На основе измерительного модуля мультиметра В-385 из состава измерительных модулей комплекса Alma-Meter2, разработанного БГУ, реализована функция измерения напряжения постоянного и переменного тока. Алгоритм функционирования арифметических блоков реализован на базе ПЛИС семейства Cyclone EP1С6Q240С8N в среде Quartus. Среда моделирования цифровых схем – ModelSim.

**Ключевые слова:** ПЛИС, ModelSim, вольтметр, АЦП, СКО, СКЗ.

В составе разработанного в БГУ многофункционального измерительного комплекса «Alma Meter 2» имеется измерительный модуль мультиметра В-385.

Прибор предназначен для измерения напряжения постоянного тока по двум каналам в диапазоне  $\pm 30\text{В}$ , а также силы постоянного тока по двум каналам в диапазоне от 10 мкА до 1А.

С целью минимизации затрат ресурсов управляющего компьютера целесообразно расширить функциональную нагрузку модуля управления и синхронизации прибора, реализованного на основе ПЛИС, разработав конвейерные арифметические блоки сумматора и умножителя, позволяющие выполнять предварительную математическую обработку измерительных данных и получение аппаратным способом готовых цифровых результатов с требуемой точностью и производительностью.

Программно-аппаратная доработка расширяет функциональное назначение прибора и позволяет вычислять среднеквадратическое значение (СКЗ), напряжение постоянного и переменного тока - соответственно среднее и среднеквадратическое отклонение (СКО).

Доработка в части расширения функциональных возможностей вольтметра заключается в реализации вычисления напряжения постоянного и переменного тока на базе вычислительных возможностей, предоставляемых архитектурой ПЛИС [1, 2].

Все операции умножения и сложения, применяемые при вычислении параметров СКО и СКЗ, реализуются на аппаратной платформе ПЛИС. Для реализации используется высокоуровневый язык описания аппаратуры VERILOG [3].





Реализация алгоритма требует изменения архитектуры арифметических модулей. Основной проблемой при их разработке стала структурная особенность выполнения арифметических операций в базовом вычислительном блоке. Используемая матрица Altera Cyclone EP1C6Q240C8N содержит в своей структуре вычислительные блоки LAB разрядность которых составляет 10 бит. Это ограничивает возможность реализации блоков сумматоров требуемой разрядности, так как быстрый перенос работает лишь в пределах одного блока LAB. Был реализован такой сумматор, который мог бы использовать блоки LAB как структурные единицы. На рисунке 2 представлена схема полного сумматора, оптимизированного под существующую аппаратную платформу ПЛИС. Как видно, сумматор разделен на блоки по 10 бит, каждый из которых полностью помещается в логическую ячейку ПЛИС. А между блоками реализована конвейерная структура. Так, один этап конвейерной обработки занимает один такт. Таким образом, удалось реализовать требуемые 32-х и 50-ти битные сумматоры.

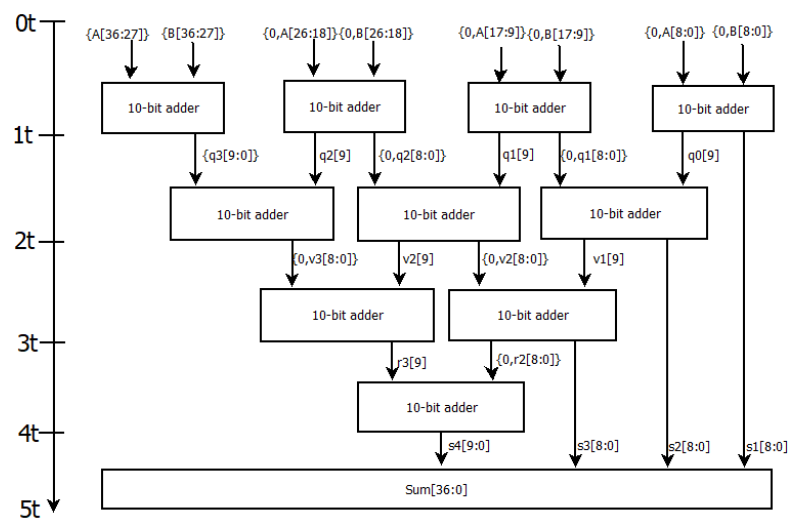


Рис. 2. Разработанная схема требуемого сумматора

При разработке арифметического блока особой проблемой стал учет коэффициента смещения относительно начала измерительной шкалы, так как все расчеты привязаны к среднему значению шкалы. Для корректировки смещения программа определяет выше или ниже среднего уровня лежит отсчет, и в зависимости от этого учитывает коэффициент смещения путем вычитания, соответствующего ему кода из отсчета, лежащего выше среднего уровня, или наоборот, вычитания отсчета из кода среднего уровня. После коррекции смещения программа переходит к операции возведения в квадрат, которая заключается в умножении числа самого на себя, используя модуль умножителя,

специально разработанный для данной задачи. Модуль умножителя работает по правилу умножения двоичных чисел.

Для оптимизации выполнения арифметических операций с 16-битными числами на аппаратной платформе ПЛИС в рамках рассматриваемой задачи предлагаемое решение представляется более оптимальным с точки зрения стоимости решения, ввиду отсутствия необходимости выбирать новейшие поколения ПЛИС с усовершенствованной архитектурой, и времени, которое потребуется на разработку.

Для отладки и проверки функционирования алгоритма и структур данных, реализующих умножитель, использовалась среда моделирования цифровых схем ModelSim [4].

На рисунке 3 представлен результат функционального и временного моделирования работы умножителя, полученный в среде моделирования ModelSim.

Отмеченная графическая область 1 соответствует зоне загрузки значений операндов. Область 2 – демонстрирует протяженность во времени (в тактах) операции умножения. Область 3 - соответствует зоне определения значения результата.

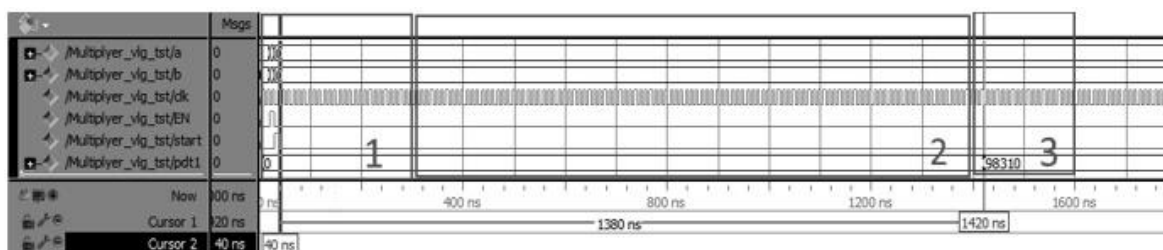


Рис. 3. Результат моделирования работы умножителя двух 16-разрядных чисел

**Вывод.** Полученные результаты позволяют без дополнительных аппаратных и финансовых затрат расширить функциональные возможности мультиметра В-385, а также произвести обновление алгоритма функционирования ранее выпущенных эксплуатируемых приборов.

#### Библиографические ссылки

1. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. М.: Горячая линия-Телеком, 2001, 636 с.
2. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы «Altera»: элементная база, система проектирования и языка описания аппаратуры. М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2002. 576 с.
3. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. М.: СОЛОН-Пресс, 2003, 320 с.
4. ModelSim-Intel® FPGA Software Support [Электронный ресурс].-Режим доступа: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/programmable/support-resources/design-software/modelsim.html#resources>. – Дата доступа 21.04.2022.

# ОРГАНИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РАМКАХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРОЕКТА "ЦИФРОВОЙ ФАКУЛЬТЕТ"

А. Д. Жалнерчик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*alexzhalnerchikz@mail.ru;*

*науч. рук. – А. В. Курочкин, преп.*

Организация совместного доступа к онлайн-ресурсам – одна из важнейших составляющих в широком диапазоне систем коллаборативного интерактивного взаимодействия, актуальность которых значительно возросла в последние годы в связи с более активным развитием технологий для удалённой работы и дистанционного обучения. Ярким представителем таких систем являются онлайн-доски – общее пространство на веб-ресурсе с организацией совместного доступа нескольких пользователей для совместной работы, визуализации информации, поддержки обсуждений в обучении и бизнесе. В рамках работы рассматривается проектирование архитектуры такой системы на базе учебного облачного центра обработки данных платформы “Цифровой факультет”. Приведен анализ основных технологий и требований, спроектирована архитектура системы и рассмотрены основные сценарии взаимодействия.

**Ключевые слова:** онлайн-доска, цифровые технологии в образовании, websocket, системы совместного визуального доступа.

## СТЕК ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Ключевой особенностью любых систем коллаборативного взаимодействия является необходимость организации двухстороннего соединения между клиентским устройством. **WebSocket** – это протокол двунаправленной передачи данных прикладного уровня через длительное соединение при помощи стека протоколов TCP/IP, обеспечивающий обмен сообщениями между клиентом и сервером в режиме реального времени.

Коммуникация между клиентом и сервером осуществляется асинхронно, путём передачи сообщений как с сервера на клиент, так и с клиента на сервер, в любое время, пока соединение активно, в отличие от традиционной модели “запрос-ответ”, характерной для протокола HTTP.

Для создания легкорасширяемого сервиса без ограничения на количество пользователей была выбрана технология NodeJs для серверной части, а также библиотека React для клиентской части приложения. Выбор данных технологий обуславливается широкой поддержке событийной модели при помощи функций обратного вызова,

что значительно упрощает коммуникацию между серверной и клиентской частью приложения в асинхронном режиме при помощи WebSocket.

## АРХИТЕКТУРА ПРИЛОЖЕНИЯ СОВМЕСТНОГО ВИЗУАЛЬНОГО ДОСТУПА

Для реализации поставленной задачи были выделены основные программные сущности:

- Пользователь (User)
- Доска (Canvas)
- Инструмент для редактирования (Tool)
- Слушатели событий для доски и инструментов (Observers)
- WebSocket

На рисунке 1 представлена схема архитектуры приложения, включающая в себя основные компоненты клиентской и серверной части.

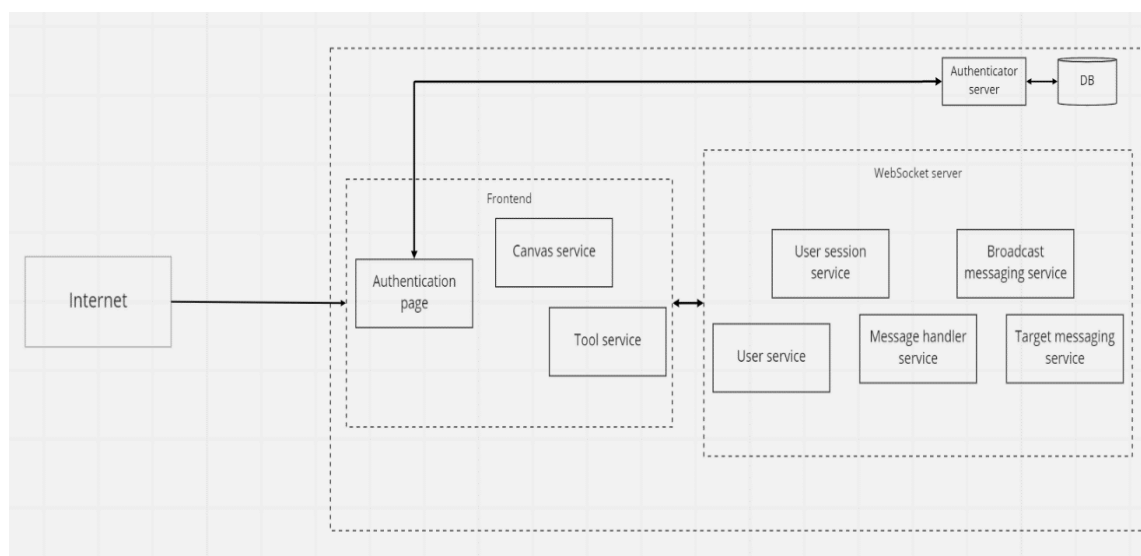


Рис. 1. Архитектура приложения

Страница аутентификации с помощью протоколов OAuth2.0 и OpenId Connect отправляет запрос на сервер аутентификации с использованием implicit схемы, которое предоставляет клиентскому приложению информацию о пользователе в идентификационном токене.

Сервисы canvas service и tool service отвечают, соответственно, за обработку событий по визуализации текущего состояния доски с помощью функций обратного вызова, и модификации этого состояния при помощи некоторых инструментов при действиях одного из пользователей с уведомлением сервера.

Сервис пользовательских сессий серверной части отвечает за хранение информации о сессии подключенных пользователей, а также за присоединение этого пользователя к некоторому экземпляру доски.

Сервис обработки сообщений серверной части отвечает за логику обработки действий пользователей в зависимости от типа сообщения. Эти сообщения актуализируют централизованное состояние экземпляра доски на сервере.

Сервис широковещательной передачи сообщений отвечает за рассылку сообщений, содержащих актуальное состояние доски, или последовательности операций по её актуализации, с серверной части на клиентскую.

Сервис целевой передачи сообщений позволяет осуществить передачу сообщений между отдельными клиентами напрямую.

Для развертывания приложения в рамках учебного облачного центра платформы “Цифровой факультет” описаны и спроектированы спецификации контейнеров для системы контейнеризации Docker.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

На рисунке 2 приведена sequence-диаграмма совместного взаимодействия двух пользователей со спроектированной системой.

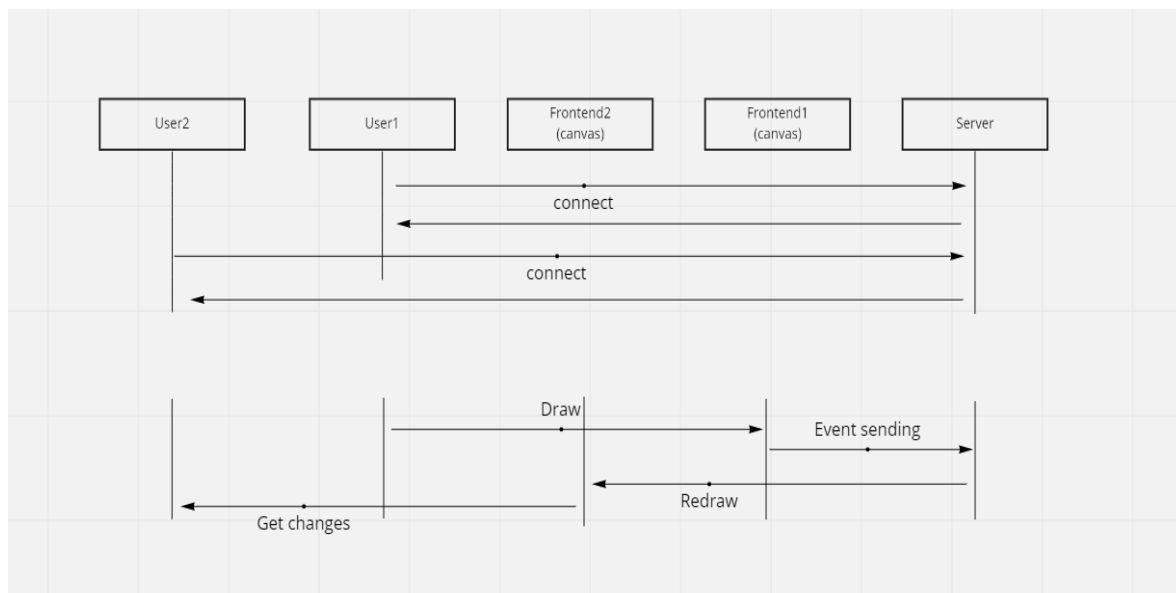


Рис. 2. Sequence диаграмма подключения двух пользователей к серверу и рисования на одной доске в режиме реального времени

На начальном этапе оба пользователя отправляют HTTP запрос серверу с целью установить соединение по протоколу WebSocket. После

того, как сервер одобрил переход на использование этого протокола, создаётся сессия, к которой присоединяются оба пользователя.

Когда один из пользователей совершает некоторое действие на своей доске, инструмент, с помощью которого осуществляется модификация, генерирует и отправляет на сервер сообщение, передавая в нем всю необходимую для повторения этой модификации информацию. Например, для инструмента “прямоугольник” сообщение содержит тип инструмента, координаты левого верхнего угла, ширину, высоту, цвет.

Сервер, получив сообщение, осуществляет актуализацию централизованного состояния со списком событий, и производит широковещательную рассылку пользователям, подключенным к данной сессии, тем самым сообщая, что произошли изменения, которые нужно применить.

Canvas каждого пользователя получает от сервера сообщение с указанными типом модификаций и параметрами, и применяет их на локальную копию доски, визуализированную у конкретного пользователя в веб-браузере.

Таким образом, представленная система позволяет поддерживать централизованное состояние доски на сервере и актуализировать и визуализировать это состояние у подключенных клиентов на основании их действий.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках проведенного исследования исследована технология WebSockets, разработана архитектура приложения для коллаборативного взаимодействия с онлайн-доской, спроектированы сценарии аутентификации с помощью внешнего источника, а также описан сценарий многопользовательского взаимодействия. Представленные результаты легли в основу прототипного приложения, подготовленного к развертыванию в рамках учебного облачного центра платформы “Цифровой факультет”.

### **Библиографические ссылки**

1. *Andrew Lombardi* WebSocket: Lightweight Client-Server Communications, 2015 Mystic coders, LLC
2. *Varun Chopra* WebSocket Essentials: Building Apps with HTML5 WebSockets, 2015 Packt Publishing Ltd.
3. *Danny Coward* Java WebSocket Programming, 2014 McGraw-Hill Education (Publisher)

# СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д. О. Захаревич

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*zahdanik@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. В. Щегрикович, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе рассмотрено решение задачи обработки большого объема данных при анализе спектров для определения состава веществ. Для достижения максимальной эффективности проанализирована работа нескольких алгоритмов машинного обучения, решающих задачу регрессии. Создана модель для определения состава сенажа злаковых трав по спектру в ближнем инфракрасном свете. Полученный алгоритм интегрирован в приложение для удобства использования.

**Ключевые слова:** спектральный анализ; регрессия; машинное обучение; дерево решений; случайный лес; SVM; гребневая регрессия; LASSO; ElasticNet.

## ВВЕДЕНИЕ

В современной науке и технике, для того чтобы определить химический состав веществ, используют множество различных методов. Минералы, найденные геологами, и новые вещества, полученные химиками, характеризуются, прежде всего, по составу. Для правильного ведения технологических процессов в разных отраслях необходимо точное знание химического состава данного сырья. Химические методы анализа не всегда соответствуют требованиям техники и науки. В связи с этим на практику внедряются физико-химические и физические методы исследования, которые являются более точными. Среди этих методов одно из значимых мест занимает спектральный анализ, имеющий множество ценностей и преимуществ. [1]

Спектральный анализ широко используется в различных отраслях промышленности и науки, и служит универсальным инструментом, который позволяет точно и оперативно исследовать элементный состав вещества. Эта информация необходима для правильного ведения технологических процессов, контроля качества исходных материалов, промежуточного и готового продуктов, а также позволяет создавать новые материалы с заданными качествами. [2]

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема спектрального анализа заключается в необходимости обработки большого объема данных, получаемых в результате



измерения спектров исследуемых веществ. Таким образом ставится задача регрессионного анализа спектра и определение состава вещества на его основе. Для достижения максимальной скорости обработки и достоверности получаемых результатов необходимо проанализировать различные методы машинного обучения и выбрать наиболее эффективный.

## СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

Данные предоставлены лабораторией skarb-lab для совместного исследования образцов. Измерения получены с помощью спектрометра в ближнем инфракрасном диапазоне. Рассматривается спектр поглощения. Инфракрасная область представляет собой часть электромагнитного спектра, соседствующего с видимым диапазоном, включающее длины волн в диапазоне от 0.8 до 1000 мкм. Данная область обладает различными свойствами в зависимости от того, какой диапазон рассматривается. Так, например, в ближнем инфракрасном диапазоне наблюдаются широкие полосы поглощения.

Чтобы понять основы инфракрасной спектроскопии, нужно обратиться к квантово-механической интерпретации молекул. Молекула воды может проявлять симметричные и асимметричные колебания и/или изгиб в своем молекулярном дипольном моменте. Взаимодействие между инфракрасным излучением и молекулой может происходить только в том случае, если частота инфракрасного излучения и молекулярного дипольного момента совпадают. [3]

Полученные данные проходят предобработку. Записи с недостающими значениями удаляются, так как при использовании большого набора данных игнорирование малой доли кортежей не окажет существенного влияния на дальнейший анализ. Таким же образом проводится удаление строк, имеющих выбросы. Следующим шагом предобработки данных – нормализация для корректировки весов значений, подаваемых на вход модели. Затем данные разделяются на обучающую и тестовую выборки.

Для решения задачи регрессии созданы несколько моделей основанные на следующих методах: SVM, дерево решений, случайный лес, гребневая регрессия, LASSO, ElasticNet. Качество моделей определяется с помощью коэффициента детерминации  $R^2$ .

Результат применения исследуемых моделей на исходных данных отображен на рисунке 1.

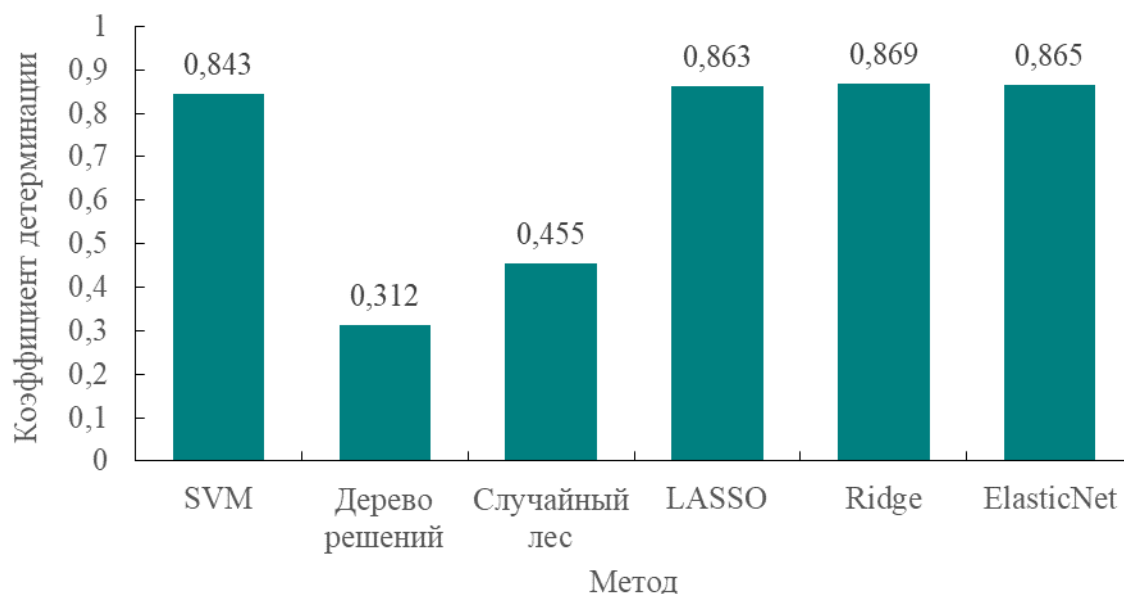


Рис. 1. Качество методов решения задачи регрессии оцененной с помощью коэффициента детерминации

## ПРИМЕНЕНИЕ RIDGE

Исходя из полученных оценок выбран метод гребневой регрессии (Ridge). Гребневая регрессия или ридж-регрессия (англ. ridge regression) — один из методов понижения размерности. Применяется для борьбы с избыточностью данных, когда независимые переменные коррелируют друг с другом, вследствие чего проявляется неустойчивость оценок коэффициентов многомерной линейной регрессии [4].

Качество работы модели дополнительно исследовано с помощью среднеквадратической ошибки (MSE). Она работает следующим образом: для каждой точки вычисляется разность квадратов между прогнозами и целью, после чего эти значения усредняются.

Значения MSE для некоторых параметров представлено в таблице. Среднее значение среднеквадратической ошибки составило 0.122

Параметр	MSE	Параметр	MSE
pH	0.107	Клетчатка	0.056
Уксусная кислота	0.440	Сахар	0.040
Молочная кислота	0.137	Хлорин	0.210
Протеин	0.028	Лизин	0.048
Жиры	0.074	Метионин	0.075

## СОЗДАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Разработанный алгоритм интегрируется в десктопное приложение, представляющее собой форму для заполнения необходимой информации и выбора файла спектра. На выходе создается pdf-файл содержащий результаты анализа.

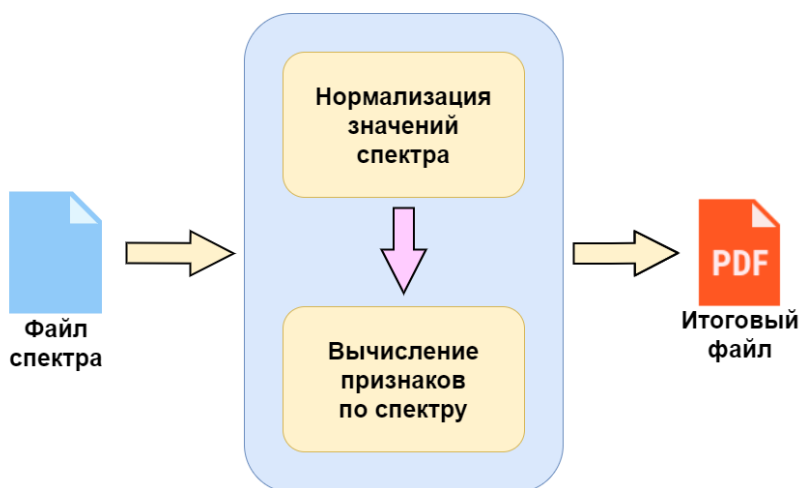


Рис. 2. Схема работы приложения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы проанализирован ряд алгоритмов машинного обучения (SVM, дерево решений, случайный лес, гребневая регрессия, LASSO, ElasticNet), решающих задачу регрессии. Наилучший результат показал метод гребневой регрессии (значение коэффициента детерминации  $R^2$  составило 0.87). На основе этого алгоритма создана модель для расчета состава сенажа злаковых трав по спектру в ближнем инфракрасном диапазоне. Полученная модель интегрирована в приложение.

### Библиографические ссылки

1. Агаркова Е. И. Спектральный анализ и его применение при проведении экспертных исследований // Студенческий научный форум, 2015.
2. Интернет-адрес: <https://www.iskroline.ru/analysis/primenenie-spektralnogo-analiza/>.
3. Интернет-адрес: <https://q-interline.com/home/technology/spectroscopy/>.
4. Интернет-адрес: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Вариации\\_регрессии](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Вариации_регрессии).

# ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

К. П. Заяц

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*zk.corpinnovation@gmail.com;*

*науч. рук. – В. Р. Ермакович, ст. преп.*

Дистанционное зондирование – один из прогрессивных современных методов исследования поверхности, определения и выделения её параметров. Своевременная и точная информация о изменениях растительного покрова Земли чрезвычайно важно для понимания взаимосвязей и взаимодействий между человеком и природными явлениями для лучшего управления процессом принятия решений. Цель данной работы рассмотреть и проанализировать различные методы количественного и классификационного определения вегетационного покрова Земли, и с помощью индекса NDVI дать оценку для двух разновременных снимков одной территории, полученных с белорусского космического аппарата (БКА), провести анализ полученных индексных изображений в ПО *ERDAS Image*.

**Ключевые слова:** NDVI, индекс растительности, вегетационный покров, дистанционное зондирование.

Дистанционное зондирование (ДЗ) – процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных *без контакта* с изучаемым объектом. Основной принцип дистанционного зондирования заключается в том, что электромагнитное излучение отражается всеми объектами, кроме идеального черного тела [1].

До появления классификации растительности с помощью дистанционного зондирования традиционная классификация занимала чрезвычайно много времени и требовала большого труда. Традиционная классификация растительности включает в себя установление набора квадратов по площади. Расположение квадратов зависит от метода отбора проб, используемого исследователями, и подходов к распределению выборок, включая случайные, стратифицированные и систематические; или, например, когда необходимо зарегистрировать большое количество видов в рамках крупного проекта по исследованию растительности. Это всегда необходимо использовать различные многомерные статистические методы для измерения сходства между наблюдениями [2]. Кластерный анализ — это метод, который рассматривает формирование групп растительности в зависимости от сходства видового состава; в то время как упорядочение заключается в сведении множества данных к нескольким индексам, для детального представления изменчивости данных [1].

Технология дистанционного зондирования способна отслеживать изменение растительности и в основном выражается в виде индекса растительности. Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) в настоящее время является наиболее широко используемым индексом, служащим для расчета средней разницы между коэффициентом отражения в красной полосе и коэффициентом отражения в ближнем инфракрасном диапазонах [3].

$$NDVI_i = \frac{NIR_i - RED_i}{NIR_i + RED_i}, \quad (1)$$

где  $NIR_i$  и  $RED_i$  - спектральная отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне (0,75 - 1,1 мкм для каналов NOAA-AVHRR) и красный (0,4 - 0,7 мкм для NOAA- AVHRR каналов) для  $i$ -го пикселя соответственно. Для изображений SEVIRI,  $NIR$  и  $RED$  соответствует VISO.6 (0,56 - 0,71 мкм) и VIS0.8 (0,74 - 0,88 мкм) соответственно. NDVI является наиболее часто используемым индексом растительности, и было показано, что он связан с энергией растительности, процентным содержанием зеленого покрова и биомассой. Это нелинейная функция, которая изменяется в пределах -1 и +1. Значения NDVI для покрытых растительностью земельных участков обычно варьируются примерно от 0,1 до 0,7, при этом значения, превышающие 0,5, указывают на густую растительность. Значения меньше, чем 0.1 указывают на отсутствие растительности, кроме бесплодной местности, скал, песка или снега (табл.) [4].

**Соответствие значения NDVI с типом объекта**

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0.7
Разряженная растительность	0.5
Открытая почва	0.025
Облака	0
Снег и лед	-0.25
Искусственные материалы	-0.5

В этой работе были выявлены изменения значений индекса NDVI в зависимости от времени года и процессов индустриализации исследуемого района. Исследовалась область северо-западнее Минска, вблизи Заславля, недалеко территория водохранилища Крылова; водоем со всех сторон окружен густым смешанным лесом, что наилучшим образом подходит для данного исследования.

Для анализа использовались мультиспектральные снимки поверхности Земли, полученные Белорусским космическим аппаратом, а обработка полученных снимков проводилась в ПО ERDAS Image.

На входе нашей программы были два мультиспектральных снимка области, сделанных 10.09.2015 и 15.06.2014. Для корректного сравнения эти снимки были обрезаны и подогнаны по границам охвата территории с помощью инструментов, представленных в *ERDAS Image 2010*. Далее были рассчитаны значения NDVI – индекса и в цветовом эквиваленте объединены в растровые изображения (рис. 1) и (рис. 2). Для наглядности построили диаграммы распределения значений (рис. 3) и (рис. 4).

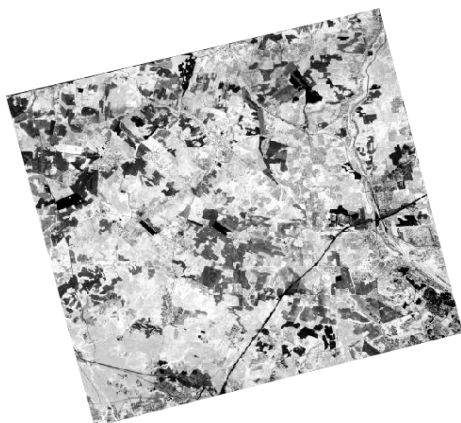


Рис. 1. Растровое изображение значений индекса NDVI (10.09.2015)

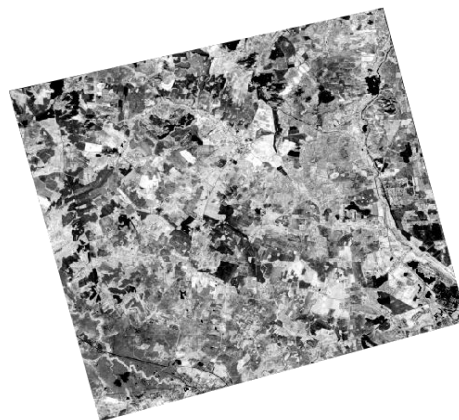


Рис. 2. Растровое изображение значений индекса NDVI (15.06.2014)

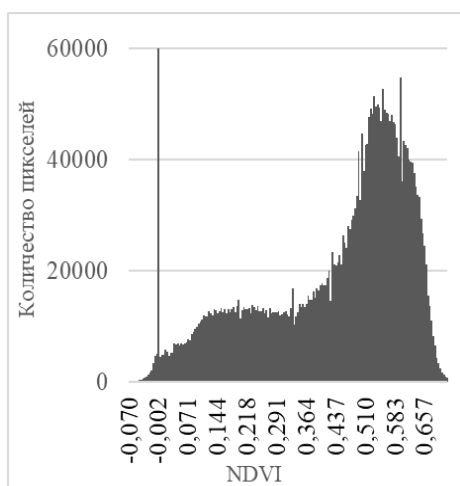


Рис. 3. Диаграмма распределения значений индекса NDVI (10.09.2015)

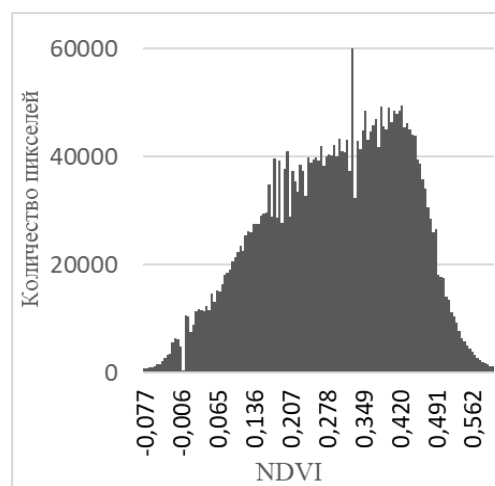


Рис. 4. Диаграмма распределения значений индекса NDVI (15.06.2014)

Как мы можем видеть на рис. 4 центр масс диаграммы находится в районе 0.3 NDVI, что говорит о густом вегетационном покрове, в процессе цветения. В отличие от рис. 3, где распределение значений держится на одном уровне, что свидетельствует о начале спада вегетационной активности и переходе на зимний режим. Так же выброс в районе -0.002 NDVI отчетливо демонстрирует наличие крупного участка с открытой почвой. Это согласуется с тем фактом, что за промежуток времени, между двумя изображениями, на данной территории была проложена автотрасса (2-ое кольцо МКАД).

Результаты исследования дают явное подтверждение качества подхода к исследованию с помощью дистанционного зондирования, и, в частности, метода оценки растительного покрова с мультиспектральных снимков при помощи растительного индекса NDVI, который точно определил изменения в исследуемом участке, в частности изменение временного интервала снимков и наличие следов индустриализации. Исследования при помощи снимков, полученных с КА, имеют ряд недостатков: низкое качество изображения и сильная корреляция с прозрачностью среды, наличием облаков. Часть этих недостатков нивелируется мультиспектральной оптикой, но всё же более современный подход к решению – съёмка с использованием беспилотных летательных аппаратов, что так же позволяет повысить скорость передачи данных и внедрить методы мгновенной обработки изображений.

#### Библиографические ссылки

1. *Чандра, А. М.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы / С. К. Гош – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
2. *ZhaoXuan Zh.* Native vegetation classification using remote sensing techniques: a case study of dairy flat regrowth bush by using AUT unmanned aerial vehicle [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/hqRQX> – Дата доступа: 21.03.2022.
3. *Reichmuth A.* Detection of forest parameters using imaging spectroscopy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/hqTq3> – Дата доступа: 19.03.2022.
4. *Bagher B.* Quantitative remote sensing of vegetation properties and functioning under normal and dry conditions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/hqVnX> – Дата доступа: 21.03.2022.

# ОПТОВОЛОКОННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕНСОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССЕЙЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

А. С. Исмайлова

Белорусский государственный университет, г. Минск  
*anastasia.ismayilova.jb@gmail.com;*  
науч. рук. – Т. П. Янукович, канд. физ.-мат. наук, доц.

В данной статье рассмотрена трехволновая модель вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна. Рассмотрено моделирование вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна с учетом усиления и его зависимости в оптическом волокне от температуры и давления. Рассмотрена модель распределенного сенсора температуры и деформации.

**Ключевые слова:** вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна; оптическое волокно; оптоволоконный распределенный сенсор.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день создание автономных измерительных систем приобретает большое значение, в этом ключе актуально использование оптоволоконных сенсоров, которые позволят обеспечить малые размеры чувствительных участков, большую протяженность и независимость от электромагнитных полей.

## ТРЕХВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЙЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

Рассеяние Манделъштама-Бриллюэна можно описать как трехволновое взаимодействие волны лазера накачки, Стоксовой волны и акустической волны [1]. Такая модель может быть записана с помощью трех дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{c}{n} \frac{\partial}{\partial z} + \frac{c}{n} \alpha \right] E_p = j \frac{n^2 p_{12} \pi c}{\lambda p_0} \rho E_s, \\ \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{c}{n} \frac{\partial}{\partial z} + \frac{c}{n} \alpha \right] E_s = j \frac{n^2 p_{12} \pi c}{\lambda p_0} \rho * E_p, \\ \left[ \frac{\partial}{\partial t} + c_s \frac{\partial}{\partial z} + \gamma_s \right] \rho = j \frac{\epsilon_0 n^5 p_{12} \pi}{2 \lambda c_s} E_p E_s *. \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_p$  – комплексная амплитуда электрической составляющей волны накачки, В/м;  $E_s$  – комплексная амплитуда электрической составляющей



Стоксовой волны, В/м;  $\rho$  – комплексная амплитуда волны плотности, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $n$  – коэффициент преломления волны в сердцевине волокна, безразмерная величина;  $\alpha$  – коэффициент ослабления, м<sup>-1</sup>;  $\gamma_s$  – коэффициент ослабления акустической волны, с<sup>-1</sup>;  $c_s$  – скорость распространения звука в материале волокна, м/с;  $\lambda$  – длина волны в вакууме, м,  $z$  – координата (сенсор расположен по оси  $z$ ), м.

Интенсивности волны накачки и Стоксовой волны выражаются через амплитуды:

$$\begin{cases} I_p = \frac{n}{2\mu_0 c} |E_p|^2 = \frac{n\varepsilon_0 c}{2} |E_p|^2, \\ I_s = \frac{n}{2\mu_0 c} |E_s|^2 = \frac{n\varepsilon_0 c}{2} |E_s|^2. \end{cases} \quad (2)$$

Используя выражения для характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния  $f_B$ :

$$f_B = \frac{2nc_s}{\lambda_p} \quad (3)$$

где  $\lambda_p$  – длина волны лазера накачки в вакууме, скорость распространения звука  $c_s = \sqrt{E/\rho_0}$ .

Получаем зависимость характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния от температуры и деформации:

$$f_B = f_{B,0} + \varepsilon \frac{\partial f_B}{\partial \varepsilon} + (T - 23^\circ C) \frac{\partial f_B}{\partial T} \quad (4)$$

где  $\partial f_B / \partial T$  – температурный коэффициент,  $\partial f_B / \partial \varepsilon$  – коэффициент деформации характеристической частоты Бриллюэновского рассеяния.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА - БРИЛЛЮЭНА

Проанализируем характер зависимости Стоксовой волны от разности частот накачки и пробного сигнала. Принципиальная схема для измерения данной зависимости представлена на рис. 1.

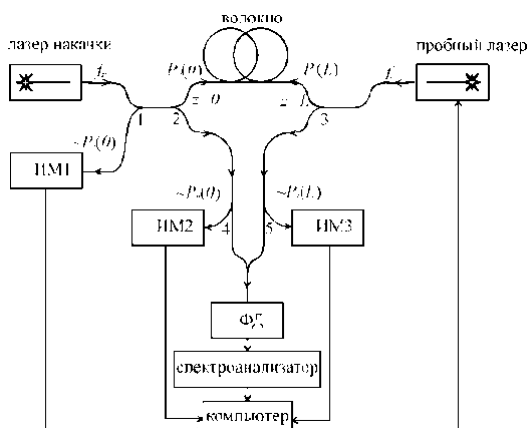


Рис. 1. Принципиальная схема для регистрации вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне

Мощность обоих лазеров остается постоянной. Волокно находится в однородном температурном поле и подвержено однородной деформации, так что характеристическая частота вынужденного рассеяния по всей длине остается постоянной. Частота пробного сигнала  $f_s$  подбирается так, чтобы она была ниже частоты  $f_p$  накачки.

Разность частот накачки и пробного сигнала регистрируется с помощью фотодиода ФД (InGaAs), спектроанализатора с последующей обработкой на компьютере.

$G_B$  – усиление стоксовой волны за счет рассеяния, которое зависит от разности частот накачки и пробного сигнала  $f_D$ , представлено на рис. 2(a). Максимальное усиление происходит при совпадении разности частот накачки и пробного сигнала с характеристической частотой Бриллюэновского рассеяния.

Для оптических волокон с добавлением  $\text{GeO}_2$  усиление стоксовой волны при увеличении деформации падает, а при увеличении температуры, усиление растет (рис. 2(б-в)).

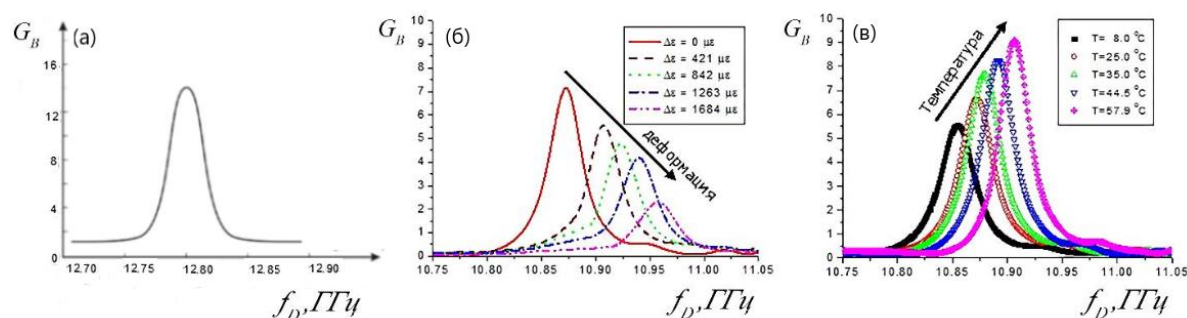


Рис. 2. Зависимость усиления стоксовой волны от разности частот накачки и пробного сигнала без добавления  $\text{GeO}_2$  (а), при деформационном (б) и температурном (в) воздействии на оптическое волокно с добавлением  $\text{GeO}_2$

Используя данные об изменении усиления было проведено моделирование работы сенсора на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и получена его передаточная функция [2] (рис. 3).

Зависимость передаточной функции от координаты  $z$  волокна позволяет определить положение и длину участка оптического волокна, подверженного температурному или деформационному воздействию. Минимальное значение передаточной функции в зависимости от разности частот позволяет вычислить температуру или деформацию, согласно (4).

Величина передаточной функции различна для температуры и деформации из-за различных коэффициентов усиления (рис. 4).

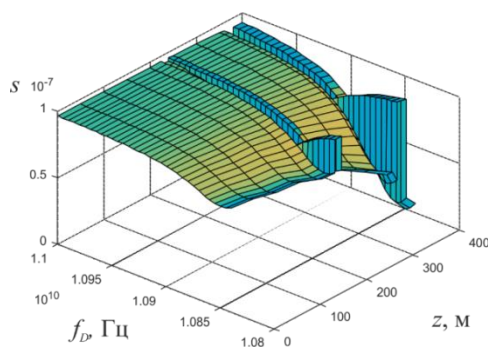


Рис. 3. Моделирование передаточной функции распределенного сенсора температуры и деформации

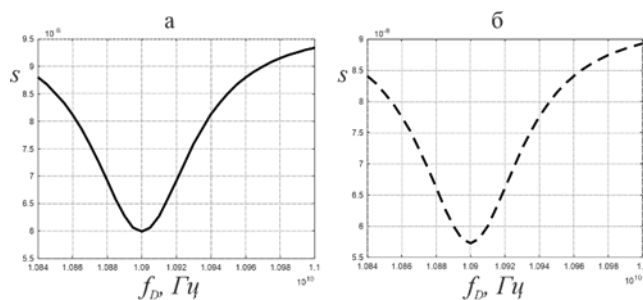


Рис. 4. Зависимость передаточной функции от разности частот накачки и пробного сигнала в случае деформационного (а) и температурного (б) воздействия

Компьютерное моделирование используется для предварительной оценки параметров работы сенсоров. Рассмотрена трехволновая модель вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Построенная модель демонстрирует различие значений передаточной функции для температурного и деформационного воздействия.

#### Библиографические ссылки

1. Янукович Т. П. Численная модель трехволнового рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне. Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 7, С. 49–54.
2. Янукович Т. П., Поляков А. В. Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 3. С. 243-252. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**И. Н. Кольчевская, Н. В. Трапенюк, В. М. Кунин**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
iren.kolchevsky@gmail.com, arioch17mut@gmail.com, rct.kunin@bsu.by;  
науч. рук. – Н. Н. Кольчевский, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Малая длина волны рентгеновского излучения позволяет надеяться на получение в будущем рентгенооптических элементов и систем с нанометровым разрешением. В статье приведен расчёт анаберрационных поверхностей преломляющей линзы для рентгеновских лучей. Получены соотношения, рассматривающие выход лучей из бесконечного источника и приходящих в фокус, случай преломления коллимированного пучка, а также параллельное прохождение лучей, вышедших из точечного источника. Расчёты показали, что при допустимых значениях технологии, ограниченных размером 1 мкм, могут быть изготовлены одиночные линзы с декрементом менее  $10^{-8}$  и фокусным расстоянием порядка 1 метра. Для моделирования рентгенооптических систем предложен модульный принцип. Разработаны программные модули: источник «X-RAY TUBE» и волновод «WASXR».

**Ключевые слова:** Анаберрационные поверхности; рентгеновские лучи; волновод-отражатель, моделирование рентгенооптических систем.

Современным направлением развития рентгеновской оптики является разработка преломляющих линз и систем на их основе [1]. Преломляющие рентгеновские линзы имеют множество конструкций и, в частности, применяются для формирования изображений объектов с микрометровым разрешением, что существенно выше дифракционного предела, определяемого длиной волны излучения. Малая длина волны рентгеновского излучения делает этот диапазон наиболее перспективным для разработки методов неразрушающего контроля толстых образцов с нанометровым разрешением и разработки методов нанолитографии. Таким образом, необходимо решать множество задач от разработки отдельных рентгенооптических элементов до проектирования новых экспериментальных методик и технологий.

Этот факт позволяет сформулировать задачу поиска оптимальной формы поверхности преломляющей рентгеновской линзы и разработать программное обеспечение, моделирующее рентгенооптические системы с целью оптимизации рентгенооптических систем.

Для рентгеновских лучей показатель преломления  $n$  вещества имеет комплексный вид, где действительная часть меньше единицы:

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (1)$$

где  $\beta$  – линейное увеличение,  $\delta$  – единичный декремент, величина, зависящая от природы вещества и энергии рентгеновских фотонов.

Для построения идеальной преломляющей поверхности ход луча от точечного источника через преломляющую поверхность к фокусу. Согласно условию образования точечного изображения предметная точка изображается стигматически преломляющей поверхностью, если оптическая длина хода любого из лучей является величиной постоянной. Такая поверхность называется анаберрационной (рис. 1).

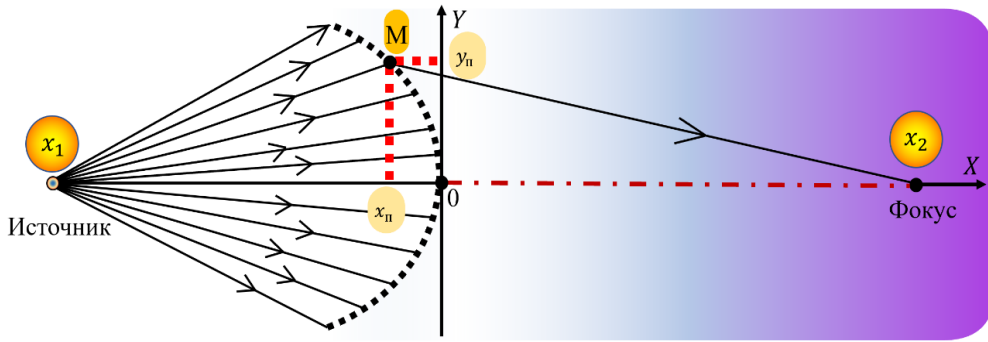


Рис. 1. Анаберрационная преломляющая линза

Рассмотрим два луча, выходящих из источника и приходящих в фокус (рис. 1). Первый луч проходит через точку М, а второй идёт вдоль оптической оси. Тогда уравнение анаберрационной поверхности  $y_{II}(x_{II})$  будет определяться следующим выражением:

$$(1 - \delta_1)\sqrt{(x_1 - x_{II})^2 + y_{II}^2} + (1 - \delta_2)\sqrt{(x_2 + x_{II})^2 + y_{II}^2} = x_1(1 - \delta_1) + x_2(1 - \delta_2) \quad (2)$$

Для случая бесконечно удаленного источника:  $x_1 = \infty$ ,  $x_2 = x$ ,  $\delta_1 = 0$ ,  $\delta_2 = \delta$ ,  $y_{II} = y$ ,  $f$  – фокусное расстояние поверхности, расположенной в вакууме, решение можно привести к компактному виду:

$$x_{II} + f(1 - \delta) = (1 - \delta)\sqrt{(x_{II} + f)^2 + y_{II}^2} \quad (3)$$

$$y = \sqrt{\frac{x_{II}\delta[2(f + x_{II}) - \delta(2f + x_{II})]}{(1 - \delta)^2}} \quad (4)$$

Для случая рентгеновского коллиматора  $x_1 = d$ ,  $x_2 = \infty$ ,  $\delta_1 = 0$ ,  $\delta_2 = \delta$  можно записать:

$$\sqrt{(d - x_{II})^2 + y_{II}^2} + (1 - \delta)x_{II} = d \quad (5)$$

$$y = \sqrt{x_{II}\delta[2d - 2x_{II} + x_{II}\delta]} \quad (6)$$

Расчёт анаберрационного профиля, показанного на рисунке 2А, производился при фиксированном значении фокуса  $F = 1$  м. Можно заметить, что с увеличением декремента, профиль расширяется по координате  $y$ . Допустимые значения для технологии ограничены размером 1 мкм, тогда мы получаем, что одиночные линзы с  $\delta$ , равным  $10^{-8}$ - $10^{-9}$ , невозможны с практической точки зрения.

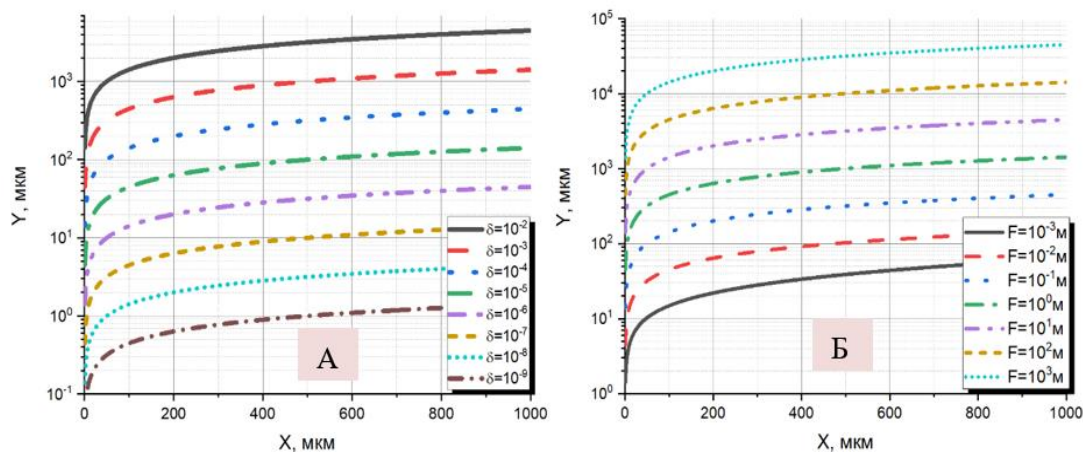


Рис. 2. Анаберрационные профили преломляющей поверхности

При фиксированном значении декремента  $\delta$ , равном  $10^{-3}$ , исследовано влияние изменения фокусного расстояния (рис. 2Б). Так как допустимые значения технологии ограничены размером в 1 мкм, то могут быть реализованы линзы с фокусным расстоянием порядка 1 метра.

Современные рентгенооптические системы могут быть полноценно протестированы только на синхротронах 3 и 4 поколения, что является дорогостоящим экспериментом. Заменой практическому эксперименту может быть численный эксперимент. Вычислительные мощности современных компьютеров позволяют выполнять когерентный расчет только в области радиочастот и оптики видимого диапазона. Для рентгеновского излучения из-за малой длины волны требуется применение суперкомпьютеров, многопроцессорных систем или вычислительных кластеров. Вычисления требуют значительного времени и, как правило, выполняются методом Монте-Карло.

Для решения задачи моделирования рентгенооптических систем предлагается использовать модульный принцип. Модули представляют собой самостоятельные программы, входными и выходными данными для которых являются распределения полей. При таком подходе можно сохранять и анализировать промежуточные распределения полей и корректировать конструкцию рентгенооптического элемента или системы. Элементарный вычислительный комплекс должен содержать программы: источник, детектор, объект, программы рентгенооптических элементов (щели, волноводы, линзы, отражатели). Каждая программа

должны иметь возможность удаленной загрузки данных и возможность удаленной передачи результатов расчета. Отдельные модули взаимодействуют посредством передачи данных, могут быть запущены параллельно на большом числе компьютеров, что позволит значительно увеличить вычислительную мощность и реализовать процесс оптимизации отдельных рентгенооптических элементов или рентгеновской исследовательской схемы.

В среде программирования Rad Studio 10.4.2. Delphi разработаны две модульные программы: источник «X-RAY TUBE» и волновод «WASXR». Файлы входных данных для программы волновода, генерируются при помощи программы источника. Сгенерированные лучи программой источника сохраняются в текстовый файл, где каждая строка описывает один сгенерированный луч, а каждый элемент строки — это параметр луча.

Программа источника задает спектр тормозного рентгеновского излучения в приближении толстой мишени без учета самопоглощения (рис. 3), форму, размер и положение источника и выходной диафрагмы.

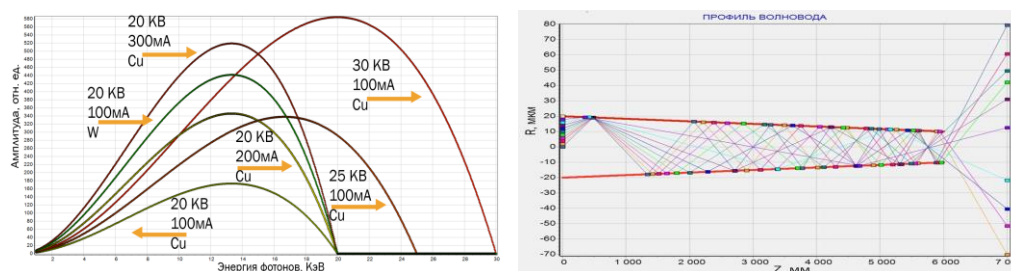


Рис. 3. Спектр тормозного рентгеновского излучения при разных начальных данных и график, показывающие распространение рентгеновских лучей

Программа волновод использует данные лучей для расчета распространение лучей в волноводе в приближении геометрической оптики. Уравнение поверхности волновода, ориентация, материал определяют пространственное и угловое распределение лучей на выходе волновода, что сохраняется в текстовых файлах.

Таким образом, получены аналитические формулы для расчета анаберрационных преломляющих рентгеновских поверхностей, предложен модульный принцип моделирования рентгенооптических систем, разработаны модули источника «X-RAY TUBE» и волновода «WASXR». Программы модули позволяют исследовать возможности рентгенооптических элементов и систем на их основе.

#### Библиографические ссылки

1. Yu. I. Dudchik, N.N. Kolchevsky, F.F. Komarov. Microcapillary X-ray lens as a novel design of the refractive lens // SPIE Proceedings. – Vol.4766-2002.

# КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ, ДЛЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

М. Н. Кольчевская

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*kolchevskaya.mary@gmail.com;*

*науч. рук. – Ф.Ф.Комаров, д-р физ.-мат. наук, академик НАНБ*

Разработка широкополосных экранирующих композитных материалов на основе полиуретана, а также эпоксидной смолы, с добавлением углеродных наноструктур, для защиты от электромагнитных излучений, обладающих: высокой износостойкостью, твердостью, селективностью коэффициентов отражения и поглощения электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне.

**Ключевые слова:** полиуретан, углеродные нанотрубки, композитные материалы, антибликовые материалы, радиопоглощающие материалы.

Изделия из композитов на основе полимеров, наполненных углеродными наноматериалами, в последние годы вызывают большой интерес как антиотражательные системы в УФ, видимом и ИК диапазонах спектра. Область их применения охватывает широкий спектр изделий от объектов космических аппаратов (солнечные батареи, оптоэлектронные и оптические системы), военной техники до бытовых приборов. Таким образом, тема работы является весьма актуальной.

Были проведены работы по созданию композитов на основе таких полимеров, как полиуретан и эпоксидная смола. В качестве добавок использовались различные виды многослойных углеродных нанотрубок и графена производства ООО "Нанотехцентр" (г. Тамбов).

«Полиуретан» — обобщённое название целого класса синтетических веществ. Несомненное достоинство полиуретанов состоит в том, что, в зависимости от соотношения компонентов, твердость (эластичность) программируется, то есть, может меняться в широких пределах. Полиуретаны широко применяются в промышленности — для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах, в условиях больших знакопеременных нагрузок и температур. Использование полиуретанов уменьшает вес изделия до 50 %, снижает уровень вибраций и системного шума работающих механизмов в сравнении с металлами. Полиуретаны остаются гибкими при очень низких температурах и обладают выдающимся сопротивлением тепловому удару. Рабочая температура для большинства полиуретанов — от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , допустим кратковременный (до 24 часов) нагрев до  $120^{\circ}\text{C}$ .

Положительными свойствами полиуретана можно отметить:



- Возможность напыления одним слоем от 1 до 12 мм как на поверхности любой сложной конфигурации, так и на вертикальные поверхности;
- Имеет свойство электрического изолятора, устойчив к воздействию открытого пламени и теплового излучения;
- Высокая абразивная устойчивость. Изделия из полиуретанов до 50 раз долговечнее резин, пластиков, в некоторых применениях – цветных и черных металлов;
- Не обледеневаает, имеет устойчивость к солям, ультрафиолетовому излучению, химическим соединениям, кроме некоторых растворителей и концентрированных кислот;
- Имеет хорошую прочность, возможно удлинение до 650%. эластичен, не растрескивается, не расслаивается и не отслаивается при температуре от  $-40$  до  $+100$  С;
- Полиуретан является трудногорючим материалом (ГОСТ 12.1.044);
- Хорошая адгезия к большинству материалов. Возможность изготовления армированных деталей.

Исследовано влияние модификации поверхности композита импульсной лазерной обработкой в видимом и ближней ИК областях на светоотражение (Рис. 1).

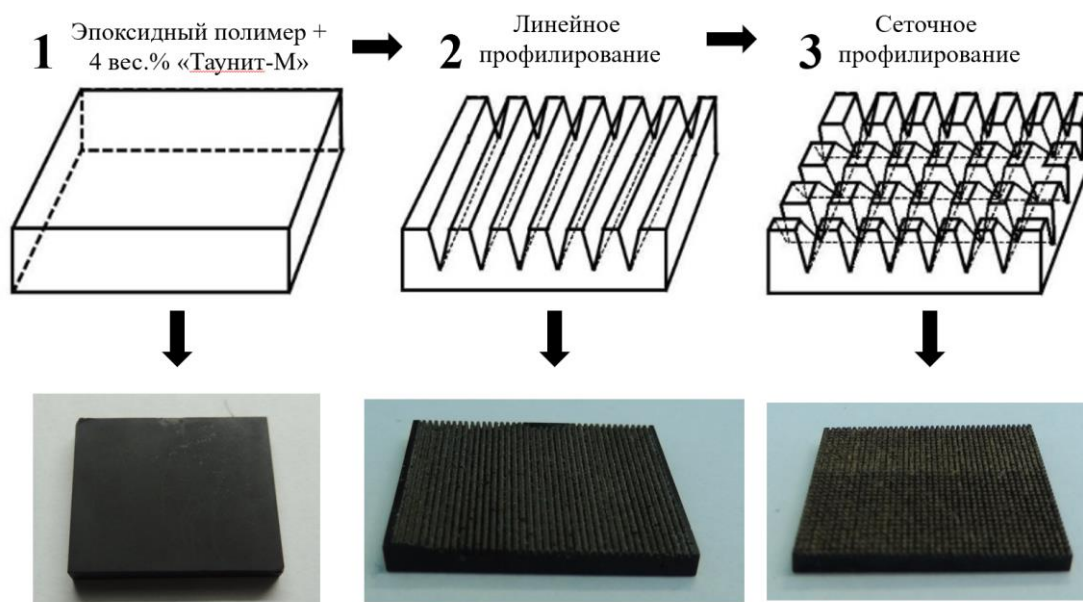


Рис. 1. Образцы композитных антибликовых покрытий с МУНТ (ЭД-20 + 4 вес. % «Таунит-М») до и после лазерного профилирования ( $\lambda = 1064$  нм,  $P_{\text{max}} = 100$  мВт)

Добавление углеродных нанотрубок в эпоксидный композит приводит к весьма значительным уменьшениям коэффициентов отражения и пропускания [1]. Выяснено, что создание на поверхностях

образцов определённого рельефа путём лазерной обработки приводит к ещё более значительному уменьшению данных коэффициентов, но увеличивает диффузное отражение (Рис. 2).

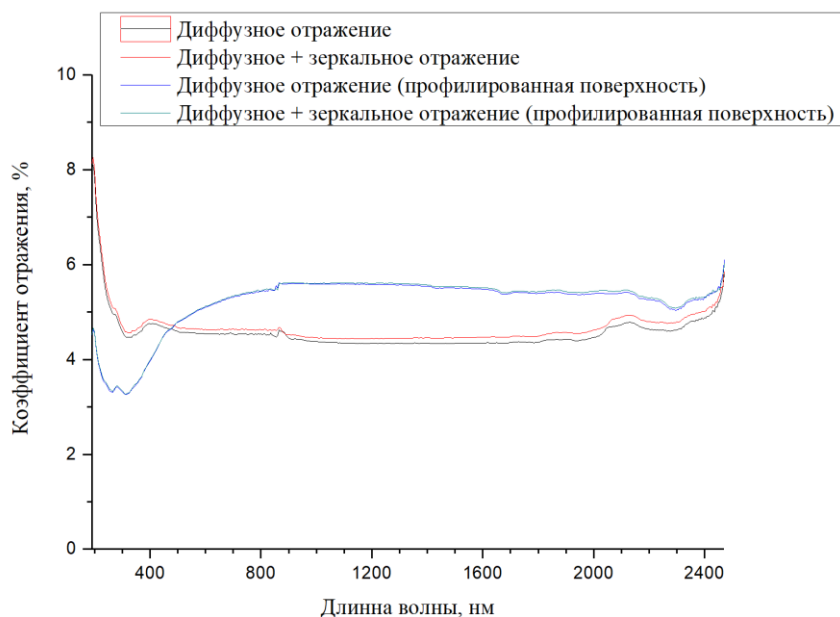


Рис. 2. Спектры диффузного отражения полиуретановых композитов с концентрацией наполнителей 4 мас. % углеродных нанотрубок «Таунит-МД»

Подобный эффект наблюдается для композитных материалов и на основе пенистого полиуретана с различными наполнителями (Рис. 3) [2].

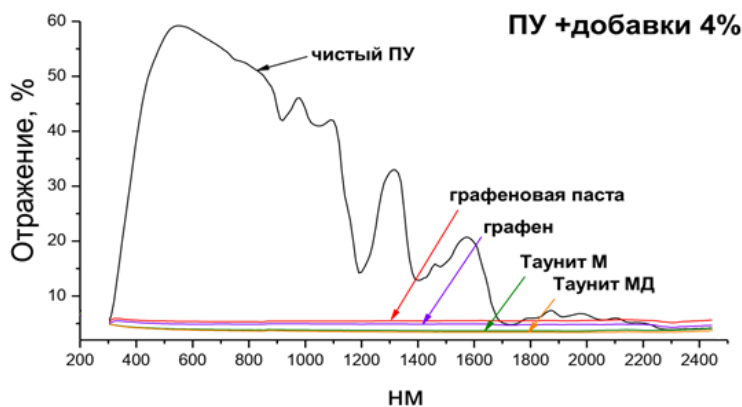


Рис. 3. Спектры отражения композитов на основе пенистого полиуретана, акрилового сополимера и 4 мас.% нанонаполнителей

Продемонстрирована возможность создания инновационных неотражающих поверхностей композитных образцов в видимой и ближней ИК-областях, составляющая большую конкуренцию уже существующим промышленно выпускаемым материалам (Рис. 4).

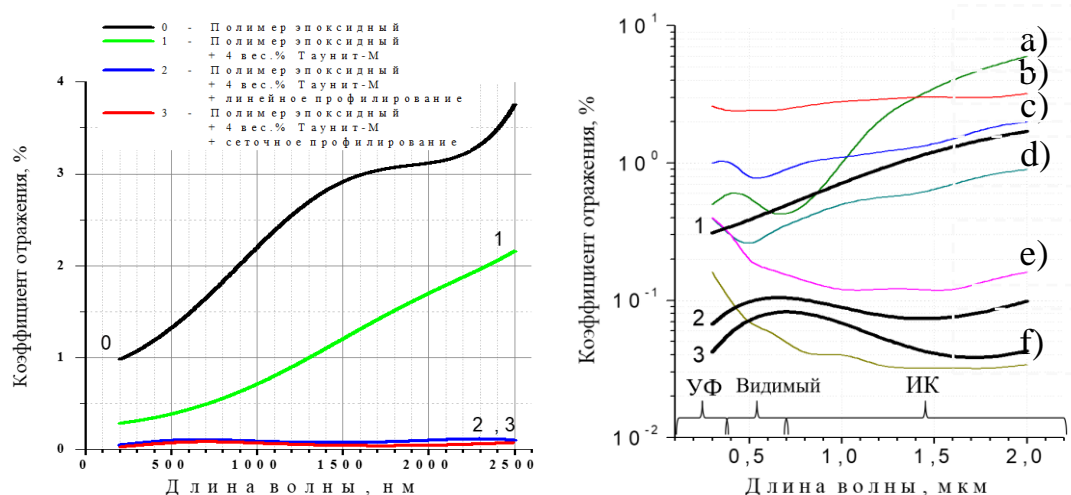


Рис. 4. Сравнение промышленно выпускаемых антиотражающих покрытий и полученных образцов.

а) Покрытие NiP, б) Соединение SiCN + МУНТ, с) Покрытие «Спектралон», d) «Черное золото», е) Коммерческий спрей на УНТ, f) Покрытие NIST VANTA – Массив вертикально ориентированных УНТ, выращенных методом CVD на подложках. Невысокая воспроизводимость, малые габариты подложки, высокая стоимость, низкая прочность

Данные материалы нужны для обеспечения безопасной работы электронных и оптоэлектронных систем, а также оптических приборов в условиях естественного и искусственного электромагнитного излучения (ЭМИ), устранения электромагнитных помех, обеспечения электромагнитной совместимости отдельных компонентов высокочастотного оборудования. Разработаны композиционные материалы на основе полимерных композиций с углеродными нанотрубками, графеном и другими углеродными наноматериалами. В этих радиопоглощающих материалах, в частности, многослойных широкополосных СВЧ-поглотителях на основе композиционных материалов, используется принцип преобразования электромагнитной энергии в тепловую. Эти материалы должны обеспечивать необходимую степень ослабления отражения ЭМИ ближнего и дальнего полей для различных объектов с разными углами падения и поляризацией.

#### Библиографические ссылки

1. F.F. Komarov, A.G. Tkachev, O.V. Milchanin, I.D. Parfimovich, M.V. Grinchenko, I.N. Parkhomenko, D.S. Bychenok. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation. *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 2, pp. 19 – 25.
2. J. Zhu, X. Yang, Z. Fu, C. Wang, W. Wu, L. Zhang. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials. *J. Porous Mater*, 2016, vol. 23, no. 5, pp. 1217 – 1225.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЫКОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ЛИНИЯМИ

**Е. А. Королёва**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
katerina.karaliova7@gmail.com;  
науч. рук. – А. В. Поляков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Для уменьшения величины оптических потерь при вводе излучения из полупроводникового инжекционного лазера в одномодовый волоконный световод предложили использовать специальную анизотропную волоконно-оптическую вставку. Методами численного моделирования провели оптимизацию параметров оптической вставки.

**Ключевые слова:** инжекционный лазер, одномодовый волоконный световод, анизотропная вставка, оптические потери.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Уровень мощности сигнала, вводимого в волоконно-оптический световод, является одним из основных параметров, определяющих характеристики волоконно-оптических информационно-измерительных систем. Поскольку расходимость мощности излучения инжекционного лазера является достаточно существенной, потери при вводе в одномодовый волоконный световод с диаметром сердцевины 9 мкм становятся неприемлемо большими. Для их уменьшения используются специальные согласующие элементы, представленные в виде сферических микролинз. При этом потери мощности излучения на ввод составляют 2–3 дБ.

## **АНИЗОТРОПНАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ВСТАВКА**

Для уменьшения потерь ввода излучения инжекционного лазера (ИЛ) в одномодовый волоконный световод (ВС) предложен стыковочный элемент в виде анизотропной волоконно-оптической вставки [1]. Анизотропная волоконно-оптическая вставка (АВОВ) – это устройство, обладающее фокусирующими и коллимирующими свойствами. В АВОВ (рис. 1) градиент показателя преломления в сердцевине 5 оптического волокна (б–оболочка) обусловлен не химическим составом стекла, а упорядочением внешним электрическим полем в процессе производства внутренней молекулярной структуры кварцевого стекла. При этом анизотропные молекулы и образующиеся микрокристаллы материала

сердцевины ориентированы так (эффект Керра-Поккельса), что их оптические оси направлены вдоль силовых линий электрического поля. Под действием светового пучка данная нелинейная среда становится оптически неоднородной: в центре пучка, где интенсивность выше, показатель преломления становится больше, чем на краю, а следовательно, фазовая скорость распространения осевых лучей уменьшается. В результате, наблюдается эффект самофокусировки света или нелинейная рефракция, когда лучи, первоначально распространявшиеся по нормали к плоскому волновому фронту, начинают искривляться к оси.

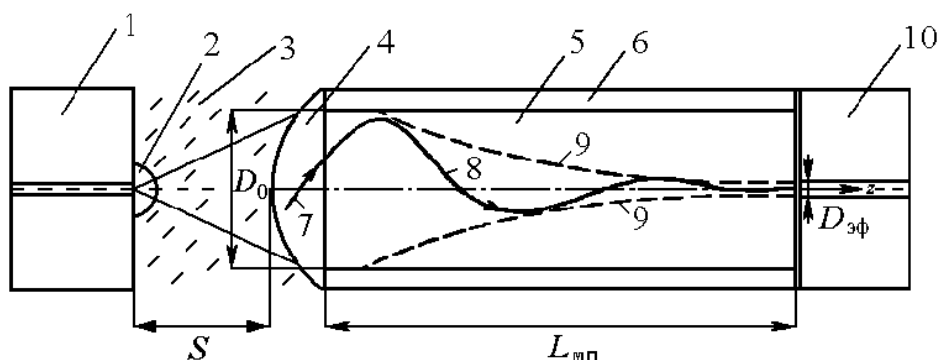


Рис. 1. 1– инжекционный лазер; 2– полусферический элемент; 3– иммерсионная жидкость;

4– сферическая полимерная микролинза; 5– световодная жила АВОВ; 6– оболочка АВОВ; 10– одномодовое оптическое волокно

Рис. 1. Устройство ввода лазерного излучения в одномодовое оптическое волокно на основе АВОВ

Траектория меридионального луча 7 любой моды, вводимого в пределах апертурного угла  $\theta_A$ , представляет собой экспоненциально затухающую к оптической оси  $z$  синусоиду 8, ограниченную линиями 9. С волновой точки зрения это означает, что указанные моды будут преобразовываться по пути их распространения в моду одной линейной поляризации  $HE_{11}$ , имеющую минимальный относительно оси  $z$  угол следования луча. Благодаря значительной концентрации (коллимации) энергии излучения вдоль оси  $z$  после прохождения длины модового преобразования  $L_{мп}$  обеспечивается одномодовый режим распространения световой волны. Таким образом, излучение, введенное в АВОВ диаметром  $D_0$ , после прохождения  $L_{мп}$  будет иметь эквивалентный диаметр одномодового режима распространения  $D_{эф} < D_0$ .

Для согласования числовых апертур ИЛ и АВОВ использовали варианты конструкции, использующие полимерный плоскосферический элемент (ПСЭ) с радиусом кривизны  $r_c = 15$  мкм и показателем преломления  $n_c = 2,1$  на торце кристалла ИЛ или сферическую

полимерную микролинзу (СПМЛ) на входном торце АВОВ с показателем преломления, равным показателю преломления сердцевины АВОВ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью модифицированной математической модели, предложенной в [2], учитывающей продольное, радиальное, угловое смещение и несовпадение модовых пятен между анизотропной вставкой и торцом волокна, продольное смещение и френелевские потери между инъекционным лазером и вставкой, проведено численное моделирование зависимости потерь от радиуса входного торца анизотропной волоконно-оптической вставки. Из графиков (рис. 2) следует, что более эффективным является применение сферической полимерной микролинзы. Кроме того, размер входного торца эффективно увеличивать до величин порядка 100 мкм. Дальнейшее увеличение  $R_0$  не ведет к существенному уменьшению потерь.

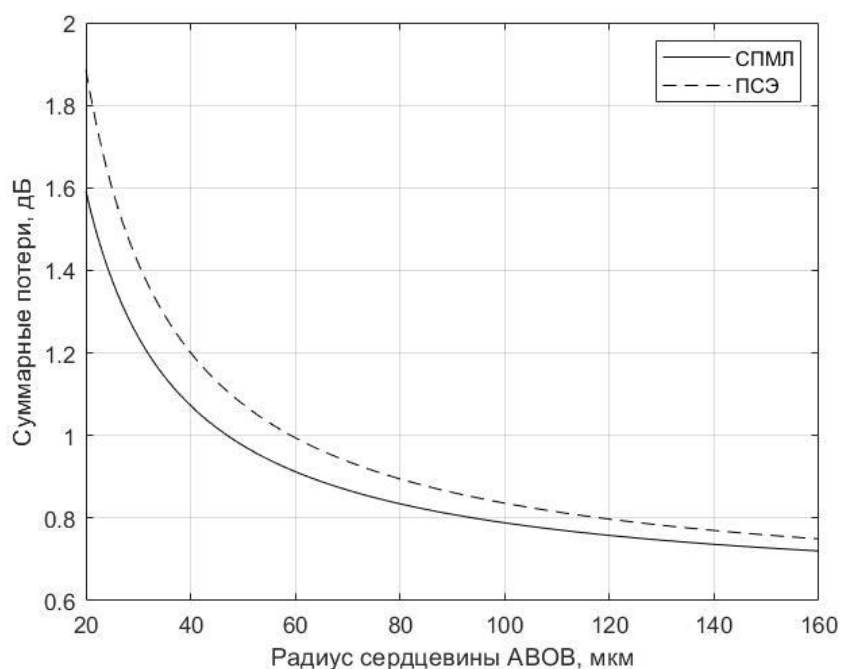


Рис. 2. Зависимость суммарных потерь на соединении от радиуса сердцевины АВОВ

На рисунке 3 представлены зависимости суммарных потерь от показателя преломления иммерсионной жидкости между ИЛ и АВОВ при фиксированном значении  $R_0=100$  мкм. Из полученных графиков следует, что величина потерь на френелевское отражение и продольное смещение минимальны при условии, что показатель преломления иммерсионной жидкости будет составлять величину  $n_{ж2}=2,3-2,4$ , и при использовании сферической полимерной микролинзы потери на

стыковку между инжекционным лазером и одномодовым оптическим волокном достигают величины менее 0,8 дБ. Предложенное устройство стыковки увеличивает эффективность ввода лазерного излучения в ВС в 3–3,5 раза по сравнению с использованием только согласующих линз различной конструкции.

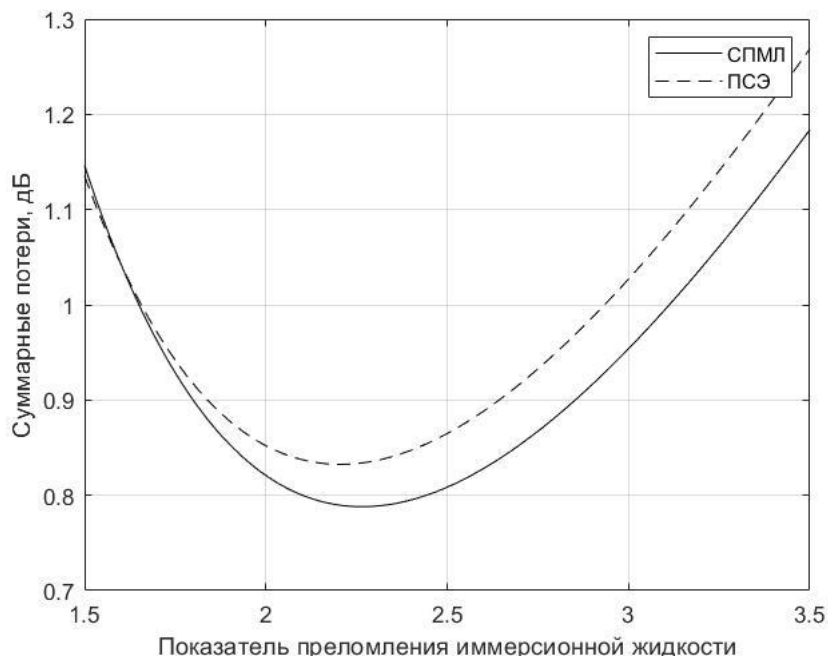


Рис. 3. Зависимость суммарных потерь на соединении от показателя преломления иммерсионной жидкости

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование АВОВ для повышения эффективности соединения ИЛ с одномодовым ВС может найти широкое применение в различных областях волоконной оптики, включая волоконно-оптические системы связи, волоконно-оптические датчики, оптоэлектронные динамические запоминающие устройства с оптоволоконной линией задержки, а также в оптических рефлектометрах и измерителях мощности.

### Библиографические ссылки

1. Макаров Т. В. Ввод лазерного излучения в одномодовые оптические волокна // Электросвязь. 1995. № 11. С. 19–21.
2. Ксенофонтов М. А., Поляков А. В. Повышение эффективности ввода лазерного излучения в световоды волоконно-оптических информационно-измерительных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 8. С. 22–26.

# КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ЧЕЛОВЕКА

**А. В. Лебедевский**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*lebedevskiys@yandex.by;*

*науч. рук. – Н. В. Левкович, доц*

Рассмотрена концепция создания компьютеризированной системы для оценки простейших функциональных показателей сенсорных систем, предназначенной для периодического массового скрининга населения с целью выявления их нарушений на стадии доклинических проявлений.

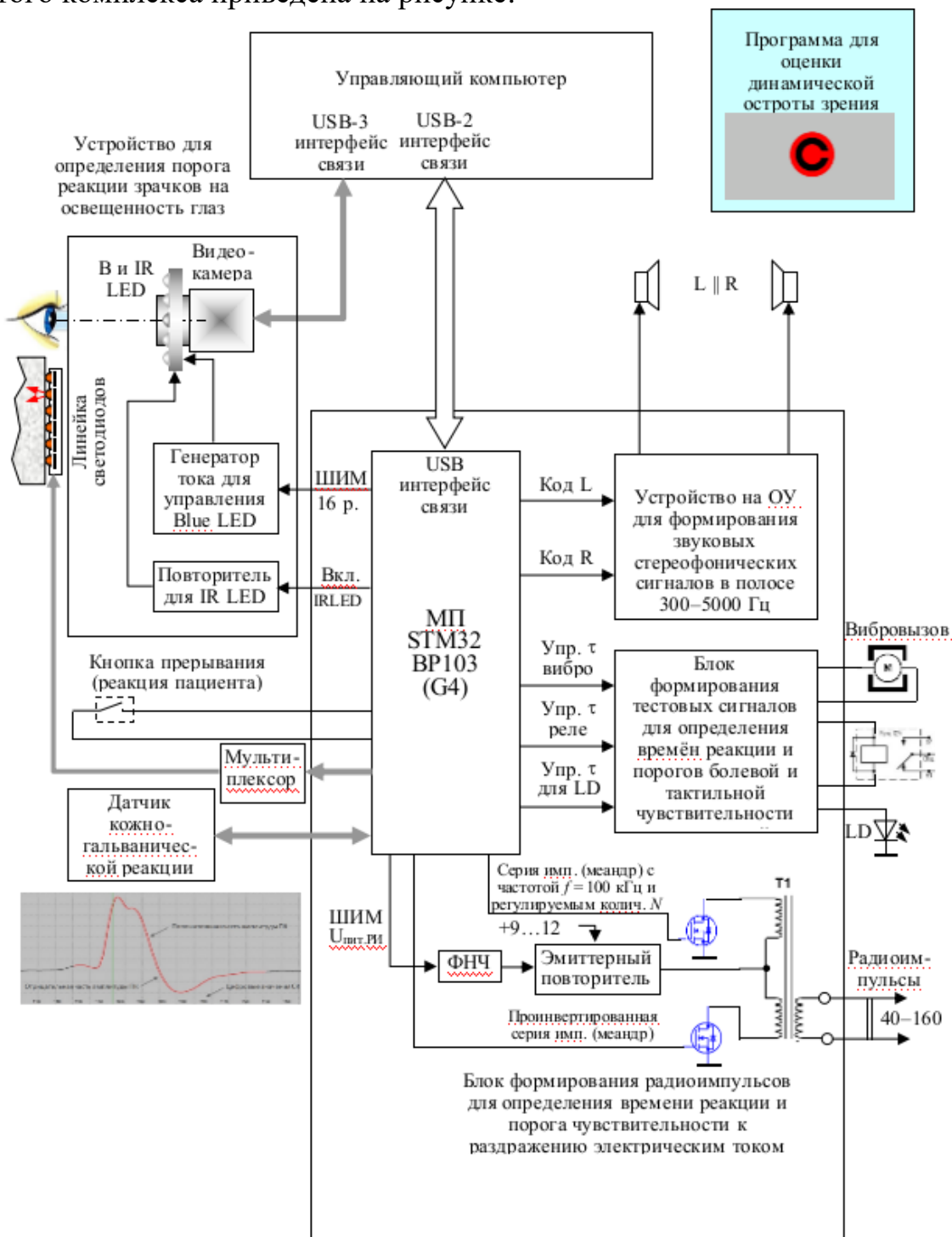
**Ключевые слова:** сенсорные системы; микроциркуляция; функциональные показатели; программно-аппаратный диагностический комплекс.

Актуальным направлением совершенствования ранней диагностики нарушений состояния здоровья является выявление снижения функциональных показателей систем организма, когда человек еще не замечает объективных признаков ухудшения его состояния. Исследования показывают, что ухудшение микроциркуляции крови сопровождается нарушением тканевого метаболизма и постепенным ухудшением функций таких органов-мишеней как, мозг, сердце, почки, сетчатка глаза [1, 2]. Очевидно, что для повышения эффективности ранней диагностики подобных нарушений необходим поиск перспективных технических решений и создание диагностической аппаратуры, которые могли бы обеспечить возможность проведения массового периодического скрининга населения, на основе критерия – полезность для ранней диагностики, цена и стоимость использования. Поэтому при создании соответствующей аппаратуры целесообразно использовать методологический подход, основанный на компьютеризированных методиках определения наиболее востребованных параметров, которые имеют потенциал широкого применения в практической деятельности медицинских учреждений.

Вместо устаревшей концепции – разработка автономных диагностических устройств, работающих самостоятельно, необходимо использовать потенциальные возможности современной компьютерной и микропроцессорной техники, позволяющие создавать комплексы, обеспечивающие простоту и оперативность скринингового обследования населения. Примером такого подхода является компьютеризированная система комплексной оценки параметров сенсорных систем и процессов микроциркуляции крови, которая создается на кафедре квантовой



радиофизики и оптоэлектроники ФРФиКТ БГУ. Функциональная схема этого комплекса приведена на рисунке.



Функциональная схема компьютеризированной системы для оценки параметров сенсорных систем организма человека

С помощью данного комплекса можно определять простейшие временные и пороговые значения сенсомоторной реакции нервной

системы на внешние воздействия на организм и ряд параметров микроциркуляции, а именно:

- время и порог тактильной чувствительности кожи конечностей при применении реле для оценки промежутка времени между формированием тактильного ощущения при щелчке реле и реакции пациента путем нажатия кнопки прерывания, возможно и применение вибрационного воздействия, которое позволит выявить порог ощущения вибраций без оценки времени реакции;

- время и порог болевой чувствительности при раздражении участка кожи конечностей токовым радиоимпульсом с регулируемой амплитудой и частотой несущей около 50 кГц или излучением полупроводникового лазера с длиной волны 460 нм для формирования болевого ощущения при нагреве тканей мощным лазерным импульсом;

- время реакции и порог слуховой чувствительности правого и левого уха при подаче звуковых сигналов с разной частотой несущей и нарастающей амплитудой звуковых колебаний;

- порог реакции зрачка на возрастающую освещенность глаза излучением синего цвета, формируемого кольцом из светодиодов, устанавливаемым на объективе видеокамеры, с помощью которой регистрируется начало сужения зрачка;

- среднюю оксигинацию гемоглобина крови кислородом и гидратацию подкожных тканей путем обработки регистрируемой управляемой видеокамерой пространственного распределения относительных значений яркости  $L(\lambda, k, x, y)$  обратно рассеянного зондирующего излучения, которое вводится в биологическую ткань поочередно шестью сверхъяркими светодиодами;

- динамическую остроту зрения, т.е. значение времени в мс, требуемого на опознание направления разреза оптического типа в виде изображения черного кольца Ландольта, которое с максимально возможной скоростью (без видимого смазывания изображения кольца) перемещается на экране монитора компьютера при учете статической остроты зрения.

Предлагаемый комплекс может быть дополнен неинвазивной спектральной аппаратурой для контроля параметров микроциркуляторного русла кровеносной системы методами диффузной отражательной спектроскопии с пространственным разрешением. Это позволит оценивать состояние мелких сосудов и их реакцию на комплексные воздействия (физическая нагрузка, холодовые пробы, перекрытие кровяного потока и т. д.), что даст ценную информацию о состоянии микроциркуляторного русла конкретного пациента.

Наличие этого комплекса позволит оперативно проводить необходимые физиологические исследования и оптимизировать алгоритмы формирования тестовых воздействий и оценки необходимых

функциональных показателей. В качестве примера можно привести методику определения времени реакции и порога слуховой чувствительности.

Оценка слуховой чувствительности проводится отдельно для каждого уха, согласно рекомендациям NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) [3]. Ощущение субъективного воздействия  $S$  согласно закону Вебера-Фехнера, зависит от логарифма интенсивности воздействия  $I$ , т. е.  $S = k \cdot \ln I + b$ , где  $k$  и  $b$  – константы. Так как органы слуха работают как сенсоры энергии воздействия и абсолютный порог слышимости на частоте 1 кГц соответствует звуковому давлению  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па, то при использовании логарифмической шкалы порог слышимости  $S = 10 \lg(P^2/P_0^2)$  составляет 0 дБ. Частота звука выбрана равной 4 кГц, поскольку с возрастом наблюдается снижение слуховой чувствительности к более высоким частотам.

Звуковые стимулы формируются динамиками, которые располагаются на расстоянии 10 см от правого и левого уха испытуемого или пациента. При исследовании на соответствующий динамик со случайной задержкой подается серия из 5 импульсов однотональных звуковых колебаний с регулируемой амплитудой. Пациент при ощущении звука должен нажать на кнопку. Применяется адаптивный лестничный (вверх-вниз) способ регулировки амплитуды сигналов, подаваемых на динамик, учитывающий реакцию пациента на предыдущие стимулы и эффект гистерезиса. Оценивается вначале пороговая чувствительность, а затем время реакции.

Таким образом, предложена концепция формирования компьютеризированной системы для комплексной оценки параметров нервных проводящих путей и состояния микроциркуляторного русла сосудисто-сердечной системы, проведено моделирование ее отдельных блоков, созданы соответствующие макетные образцы и проведена апробация их работоспособности.

#### Библиографические ссылки

1. *Kimura J.* Electrodiagnosis in Diseases of Nerve and Muscle / Oxford University Press. 2013. 1176 p.
2. Нормальная физиология : учебник. В 2 ч. Ч. 1 / *А.И. Кубарко, В.А. Переверзев, А.А. Семенович.* Минск : Вышэйшая школа, 2013. – 542 с.
3. Criteria for a Recommended Standard [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-126/pdfs/98-126.pdf?id=10.26616/NIOSH/PUB98126> - Дата доступа: 30.05.2021

# КОНТРОЛЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

С. В. Мазур

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*val\_zur@mail.ru;*

*науч. рук. – А. И. Головатый, канд. физ.- мат, доц.*

В настоящее время происходит бурное развитие технологий взаимодействия компьютера и человека. Порой, интеграция таких технологий может быть весьма непредсказуемой. Виртуальная реальность и средства ее достижения – не исключение. Данная технология «обманывает» мозг человека. Движение и положение тела в пространстве фиксируется вестибулярным аппаратом, который подает сигналы в мозг. Но вместе с этим в мозг поступает еще и зрительная информация. Показатели могут расходиться, поэтому человек во время нахождения в VR может испытывать различные недомогания, такие как головокружение, головная боль, тошнота. Этому способствуют различные стрессовые ситуации, которые присутствуют в некоторых виртуальных сценах. Соответственно, необходимо контролировать состояние человека во время нахождения в виртуальной реальности. С помощью средств мониторинга здоровья было разработано приложение для контроля ЧСС человека.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность (VR), пригодные для ношения устройства (WHDs), мониторинг здоровья, Bluetooth Low Energy (BLE), фитнес-браслет.

## СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ

В 90-е года 20 века была создана технология WHDs, которая позволяла удаленно контролировать физиологические показатели человека. Устройства для удаленного мониторинга здоровья (WHDs) – это совокупность устройств, предназначенных для непрерывного амбулаторного контроля жизненно-важных показателей здоровья человека в повседневной жизни (во время работы, дома, при занятиях спортом) или в условиях клиники [2]. С помощью этих устройств можно регистрировать различные физиологические показатели человека: ЭКГ, ЧСС, температуру тела, артериальное давление, сатурацию и др.

Большинство устройств для регистрации аритмий использует метод фотоплетизмографии. Он основан на том, что фотодиод испускает свет через мягкие ткани человека при прохождении которых, он поглощается. При сердечном сокращении количество крови в сосудах увеличивается, таким образом, ткань поглощает больше света, что регистрируется оптическим датчиком (обычно фотодиодом)[1].

Для того, чтобы не сковывать движения человека во время нахождения в VR, необходимо применять средства мониторинга здоровья, которые поддерживают беспроводную передачу данных. С этим прекрасно справится технология Bluetooth Low Energy (BLE). Данная технология ориентирована на применение в системах мониторинга и сбора данных с автономным питанием.

Концепция технологии направлена на оптимизацию минимального энергопотребления, на уменьшение пикового тока передачи и времени приема за счет коротких пакетов. BLE отличается от версий Bluetooth следующим:

- оптимизация до сверхнизкой мощности;
- пиковый ток менее 20 мА;
- средний ток менее 5 мкА;
- более низкая стоимость. [3]

Технология BLE позволяют построить сенсорную сеть для того, чтобы объединить показатели датчиков в единую базу.

## **ПОСТРОЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С BLE-УСТРОЙСТВОМ**

Архитектура BLE представляет собой стек протоколов, где большое внимание уделяется протоколу доступа к атрибутам и самим атрибутам.

После обнаружения обмен данными между устройствами выполняется с помощью протокола Generic Attribute (GATT).

BLE-устройство располагает базой данных переменных состояния, где эти переменные группируются в службы на основе функциональности. Обычно, данные переменные называют «характеристиками». Каждая характеристика содержит описание типа значения [3].

Сервисы, характеристики и их вспомогательные атрибуты (дескрипторы) являются основными объектами подключенного режима.

При разработке приложения для контроля ЧСС человека надо учитывать, что оно должно быть десктопным для того, чтобы в будущем можно было запускать с него сцены VR. В качестве языка программирования был выбран C#, так как у Майкрософта есть подробная документация того, как работать с BLE-устройствами. В качестве платформы была выбрана WPF.

Для того, чтобы приложение было легко расширяемым, тестируемым, а также удобным для рефакторинга можно использовать паттерн MVVM, который пришел вместе с WPF.

В качестве устройства для мониторинга ЧСС будет использоваться фитнес-браслет Mi Band 3. Необходимо убедиться, что к нему можно подключиться и у него существует все службы и характеристики, которые нужны для решения конкретных задач. Для это использовалось приложение nRF Connect (см. рис. 1).

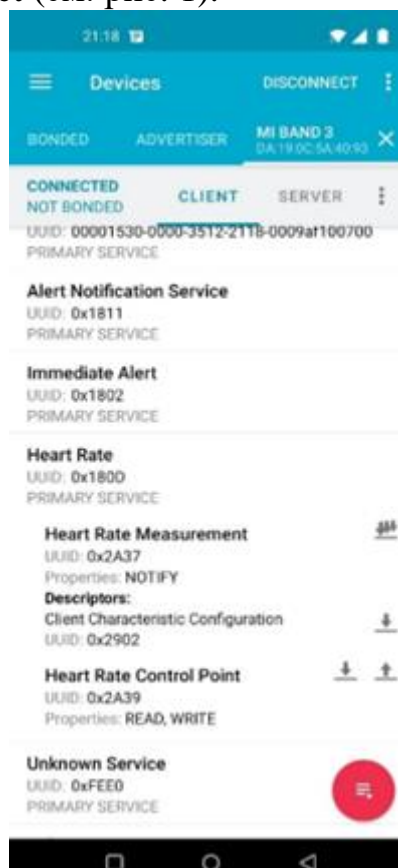


Рис. 1. Службы и характеристики Mi Band 3

Данное приложение можно использовать для нахождения и просмотра служб, характеристик Mi Band 3. В работе используется служба HeartRate и характеристика HeartRateMeasurement.

Предварительно необходимо провести аутентификацию с фитнес-браслетом.

## КОНТРОЛЬ ЧСС ЧЕЛОВЕКА В ВИРУТАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Целью работы было проведение контроля ЧСС во время нахождения в виртуальной реальности и на основании полученных данных сделать вывод о том, меняется ли физиологическое состояние человека, когда запущена сцена. Необходимо провести испытания с несколькими различными сценами, а также людьми. В качестве сцен можно использовать игровые, космические и другие. Также необходимо

провести измерение пульса человека до включения сцены. В качестве шлема виртуальной реальности использовали HTC VIVE Pro 2.

В ходе первого испытания была использована игровая сцена с космосом, где есть микрострессовые ситуации, а также небольшая физическая активность пользователя. Полученные результаты представляют временную зависимость изменения ЧСС, которая представлена на рис. 2.

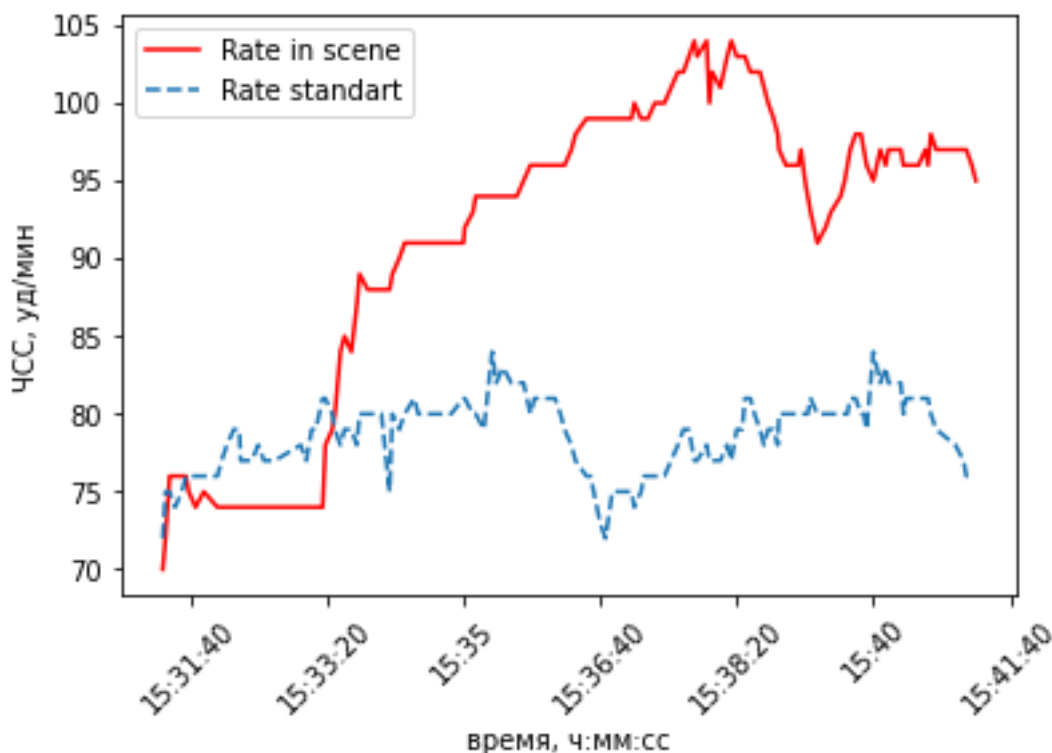


Рис. 2. Изменение ЧСС человека в игровой сцене

Как можно заметить, у пользователя был достаточно стабильный пульс до включения сцены, то есть, когда он не находился в виртуальной реальности. После включения сцены пульс человека стабильно растет, однако позже организм начинает адаптироваться к новым условиям. В дальнейшем ЧСС человека остается достаточно стабильной.

Также был проведен эксперимент, в котором два человека находились в одинаковой сцене. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что виртуальная реальность оказывает различное воздействие на двух людей, находящихся в одной и той же сцене. Поэтому, чтобы адекватно контролировать состояние человека необходимо подбирать индивидуальные параметры, что было реализовано в приложении. Под индивидуальными параметрами можно рассматривать возраст, а также ЧСС покоя, пол, артериальное давление, вес и др.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате исследования был проведен контроль пульса человека в обычном состоянии и во время нахождения в виртуальной реальности. Разработанное приложение позволило получить данные, которые свидетельствуют об изменении состояния человека. Можно судить о том, что пульс человека учащается, когда он находится в виртуальной реальности. При это могут существовать различные стрессовые ситуации, где пульс может резко подскочить. Из этого следует, что необходимо контролировать состояние человека, чтобы свести возможный вред виртуальной реальности к минимуму.

### **Библиографические ссылки**

1. Кухаренко, И. А. Анализ способов съема частоты сердечных сокращений для применения в носимых устройствах / И. А. Кухаренко // Инновации в науке: материалы Международ. научн. конф., Национ. тех. уни-тет Украины, КПИ. – Киев, 2016. – С. 66-71.
2. Персональные технологии мониторинга здоровья // НИИ Организации здравоохранения и медицинского менеджмента. – Москва, 2019. – С. 1-28.
3. Смолин, П. Д. Программный комплекс для получения данных с BLE-логгера: автореф./ П. Д. Смолин; ФГБОУ ВО: АГУ – М., 2018 – 69с.



## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД ВНУТРИ ФЕРРИТОВОГО КОЛЬЦА

**А. О. Поживилко, С. В. Мозгалёв**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
rozhivilkoao@mail.ru, mozgalevsv@mail.ru;  
науч. рук. - В. М. Борздов, д-р физ.-мат. наук, проф.;  
В. А. Зайков, ст. преп.*

В данной работе исследованы особенности процессов зажигания и горения высокочастотного газового разряда внутри спиралевидного индуктора и ферритового кольца с целью повышения однородности и устойчивости горения разряда. Для зажигания высокочастотных разрядов внутри ферритового кольца разработан генератор, мощностью до 300 Вт, работающий на частотах от 10 до 30 МГц. В работе использовались ферритовые кольца марки 100 ВЧ диаметром 10 см.

**Ключевые слова:** Индукционный разряд, ферритовое кольцо.

Высокочастотный газовый разряд (ВЧ разряд) зажигают в высокочастотном электромагнитном поле. ВЧ разряды применяют для накачки газоразрядных лазеров, травления и обработки поверхностей. Конструктивной особенностью источников ВЧ плазмы [2] является наличие газоразрядной камеры (обычно - кварцевой или стеклянной трубки), на которую намотаны витки индуктора, который питается переменным током.

Как следует из закона электромагнитной индукции, напряжённость пропорциональна расстоянию от оси и максимальна вблизи витков. В экспериментах [3] индукционный разряд зажигался с помощью спиралевидного индуктора. Газоразрядная трубка, распложенная внутри спиралевидного индуктора, нагревалась и стекло раскалялось в местах, где она касалась витков индуктора. В этом случае при увеличении мощности генератора возникает реальная опасность расплавления стекла и разрыва газоразрядной трубки.

Для решения этих проблем было предложено вместо длинного прямого индуктора разряд зажигать внутритороидального ферритового кольца на которое намотаны витки катушки, питающейся переменным током, более однородно по сравнению со спиралевидным индуктором. Зажигание ВЧ разряда внутри ферритового кольца повышает однородность горения разряда и уменьшает опасность расплавления материала трубки.

Несложно показать, что электрическое поле, создаваемое ферритовым кольцом, эквивалентно магнитному полю постоянного кругового тока и более однородно по сравнению со спиралевидным индуктором.

Электрическая напряжённость  $E$  в центре кольца радиуса  $r$ , на которое намотана катушка, содержащая  $N$  витков провода, определяется формулой

$$E = \frac{\mathcal{E}_{si}}{2rN}$$

Для исследования ВЧ разрядов внутри ферритового кольца был разработан генератор, схема которого приведена на рис. 1.

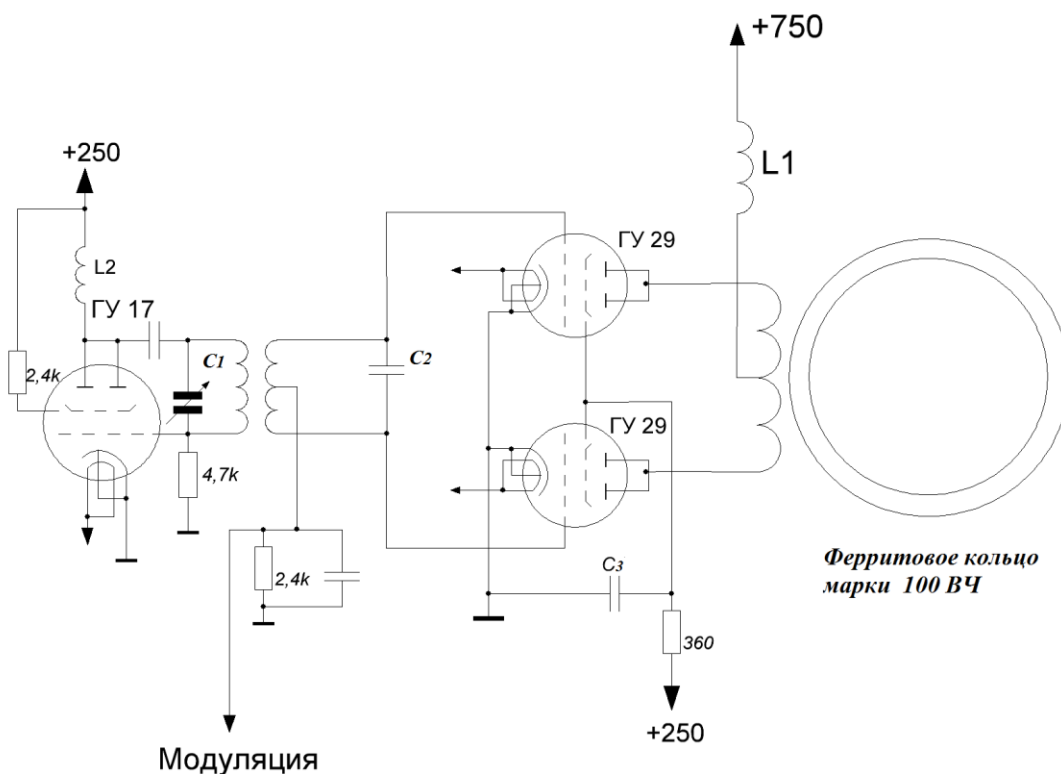


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема генератора

Задающий генератор собран на тетроде ГУ 17, выходной каскад реализован по двухтактной схеме на ГУ 29. На ферритовое кольцо намотана катушка из 20 витков, к концам которой подключены аноды генераторных ламп, в середине катушки сделан отвод. Параметры ферритового кольца: внутренний диаметр 80 мм, внешний 125 мм, высота 17 мм. Катушка L1 намотана на каркас диаметром 17 мм, содержит 20 витков с зазором 1 мм. Катушка L2 намотана на каркас диаметром 22 мм, содержит 7 витков с зазором 2 мм.

Двухтактная схема существенно ослабляет постоянное подмагничивание ферритового кольца и позволяет наблюдать зажигание и горение ВЧ разряда в широком диапазоне частот от 10 до 30 МГц. Подавая на вход для модуляции сигнал на частотах от 10 до 20 кГц, можем слышать звук.

На рис. 2 представлены фотографии газовых разрядов в бактерицидной трубке, расположенной внутри ферритового кольца.

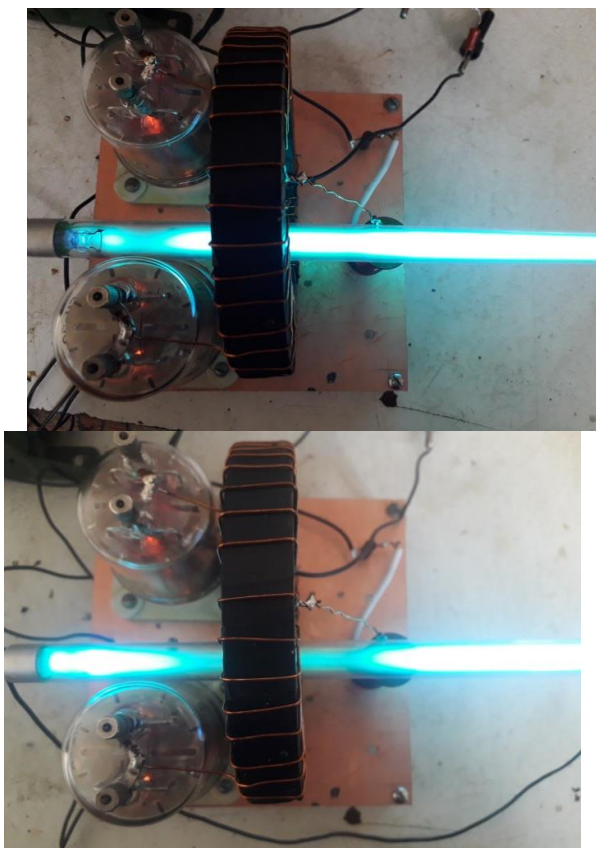


Рис. 2. Индукционный разряд в бактерицидной рубке

Фотография справа была сделана, когда концы трубки были замкнуты проводом, а частота ВЧ генератора была равна  $\approx 15$  МГц. При этом наблюдалось ослабление свечения газа вблизи плоскости ферритового кольца, которое может быть объяснено выталкиванием плазмы из области сильного электромагнитного поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод зажигания ВЧ разряда внутри ферритовых колец, при котором электрическое поле внутри ферритового кольца более однородно по сравнению со спиралевидным индуктором. В экспериментах ВЧ разряд зажигался в газоразрядной трубке при

помещении её в ферритовое кольцо марки 100 ВЧ диаметром 10 см на частотах до 30 МГц. Предложенный способ зажигания ВЧ разряда позволяет повысить однородность горения разряда и уменьшить опасность расплавления материала трубки.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Бонч-Бруевич А. М.* Применение электронных ламп в экспериментальной физике. Государственное издательство технико-теоретической литературы. М., 1956.
2. *Кралькина Е. А.* Индуктивный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 5. С. 19-40. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200805f.0519.
3. *Поживилко А. О.* Разработка источника питания высокочастотного магнетронного распылителя // Науч. конф. студентов и аспирантов БГУ: сборник работ 77-й науч. конф., Минск, 2020.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ САЙТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНЫХ ПОЛИМОРФИЗМОВ С ПОМОЩЬЮ БИНОМИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

**Е. В. Смолякова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*smolyakova580@gmail.com;*

*науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе реализован и исследован алгоритм определения сайтов однонуклеотидных полиморфизмов с помощью биномиального распределения по данным геномного секвенирования.

**Ключевые слова:** однонуклеотидный полиморфизм; секвенирование; биномиальное распределение.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В живых организмах состав геномов варьируется. Различия называются генетическим полиморфизмом или вариациями генома. Включают в себя однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), вариации одиночных нуклеотидов (SNV), полиморфизм с небольшими вставками, вариации числа копий (CNV) и структурные вариации (SV). Генетические полиморфизмы влияют на фенотипы и заболевания [1].

SNP являются одним из наиболее распространенных типов генетических вариаций в геноме человека. SNP в генах, которые регулируют репарацию несоответствия ДНК, клеточные циклы, метаболизм и иммунитет, связаны с генетической предрасположенностью к раку [2]. Знание генов, участвующих в развитии рака, в сочетании с возможностью секвенирования генов и бионформатического анализа, является мощным инструментом для скрининга пациентов с риском и помощи в генетическом консультировании [3]. Поэтому нахождение сайтов полиморфизмов является одной из важных задач биомедицины.

Существует много методов определения сайтов SNP, такие как: точный тест Фишера, критерий хи-квадрат, тест биномиального отношения правдоподобия [1]. Они достаточно просты, однако вычислительно затратны и трудно применимы при анализе экспериментальных данных с высоким уровнем шума.

Цель работы – реализовать и исследовать метод определения сайтов SNP с помощью биномиального распределения, и предложить способы автоматического подбора параметров метода.

## ВЕРОЯТНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ САЙТА ОДНОНУКЛЕОТИДНОГО ПОЛИМОРФИЗМА С ПОМОЩЬЮ БИНОМИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Представим набор оснований, покрывающий конкретный сайт следующим образом:  $\mathcal{D} = \{b_1, \dots, b_n\}$ , где  $n$  – количество ридов на одном сайте и  $b_i$  – нуклеотид, соответствует  $i$ -ому риду. Допущение заключается в том, что все не референсные варианты в  $\mathcal{D}$  генерируется ошибками секвенирования. Пусть случайная величина  $X$  будет количеством вариантов среди  $n$  оснований. Обозначим  $Pr_n(X = k)$  как вероятность наблюдения  $k$  вариантов в  $\mathcal{D}$ .

Предположим, что в  $\mathcal{D}$  есть  $K$  не референсные вариантов. Будем считать, что сайт является SNP если  $Pr(X \geq K) = \sum_{k \geq K} Pr_n(X = k)$  меньше определенного пользователем порога.

Считая ошибки секвенирования  $n$  оснований независимыми и вероятность ошибки  $p$  известной, тогда  $X$  будет подчиняться биномиальному распределению. Вероятность наблюдения  $k$  вариантов в  $\mathcal{D}$  можно записать следующим образом:  $Pr_n(X = k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица 1

Экспериментальные данные

	Название последовательности	Расположение	Референсное значение	A	C	G	T	SNP
0	chr20	41029600	G	0	0	51	0	
1	chr20	41029601	G	0	0	51	0	
2	chr20	41029602	G	0	0	51	0	

Экспериментальные данные представляют собой массив размером 20000 строк на 8 столбцов и содержат информацию о местоположении нуклеотида в последовательности, типе референсного нуклеотида, количестве ридов при секвенировании оснований А, С, G и Т, маркере SNP.

Сайт SNP выделяется среди остальных. На рисунке 1 нуклеотид под индексом 2447 является сайтом SNP.



Рис. 1. Количество ридов при прочтении нуклеотидных последовательностей

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для того чтобы сайт являлся SNP должно выполняться следующее неравенство:

$$\sum_{k=K}^n Pr_n(X = k) < T,$$

где  $n$  – общее количество ридов,  $K$  – количество не референсных ридов,  $p$  – вероятность ошибки секвенирования,  $T$  – пороговое значение.

По представленным экспериментальным данным возможно определить общее количество ридов и количество не референсных ридов, но нужно определить оставшиеся два параметра: вероятность ошибки секвенирования и пороговое значение.

Пороговое значение должно зависеть от количества ридов. Один из вариантов определения порогового значения является следующим:  $T = 10^{-A}$ , где  $A$  – это среднее количество ридов по всем экспериментальным данным. В нашем случае  $A = 78$ .

Чтобы определить является ли сайт SNP, нужно пройтись по данным два раза: первый раз для определения среднего количества ридов и второй раз уже непосредственно для определения сайтов SNP.

Ограничения: объем данных большой, двойное прохождение требует много времени и ресурсов; трудности при потоковой обработке данных.

Ограничения могут быть устранены следующим путём: выбрав интервал данных, определим для него среднее количество ридов и определим сайты SNP.

После прохода по массиву экспериментальных данных были получены результаты поиска сайтов SNP, представленные на рисунке 2.

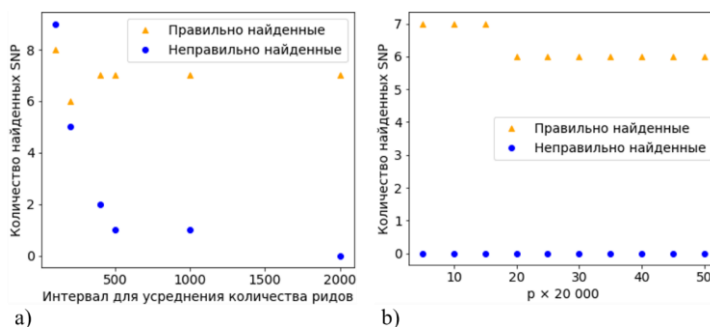


Рис. 2. Количество правильно и неправильно найденных сайтов SNP от количества нуклеотидов в интервале для усреднения количества ридов (а) и от ошибки секвенирования (б)

Как видно на рисунке 2 (а), безошибочно находятся семь из девяти сайтов SNP, когда количество сайтов для усреднения количества ридов

2000 и более. Для построения графика на рисунке 2 (b) выбран интервал усреднения количества ридов равный 2000 сайтов. С увеличением значения ошибки уменьшается количество найденных сайтов SNP.

Следует сделать вывод, что лучший результат, которого удалось достичь: семь правильно определенных сайтов SNP из девяти. Алгоритм не находит сайты SNP на местах с индексами: 14250 и 18493 (таблица 2). Ошибка связана с различием количества ридов между разными сайтами, а также с различием в отношении не референсных ридов к общему количеству ридов.

Таблица 2

**Однонуклеотидные полиморфизмы в данных**

	Название последовательности	Расположение	Референсное значение	A	C	G	T	SNP
2447	chr20	41032047	A	52	56	0	0	+
3985	chr20	41033585	G	0	28	25	0	+
4602	chr20	41034202	G	92	0	79	0	+
6425	chr20	41036025	T	0	65	0	103	+
12309	chr20	41041909	T	0	0	32	22	+
14250	chr20	41043850	G	10	0	19	0	+
14378	chr20	41043978	T	23	0	0	19	+
18199	chr20	41047799	C	0	22	0	24	+
18493	chr20	41048093	A	33	0	0	10	+

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе реализован и исследован метод определения сайтов SNP с помощью биномиального распределения, найдена зависимость количества правильно и неправильно найденных сайтов SNP от параметров метода: порогового значения и ошибки секвенирования.

**Библиографические ссылки**

1. *Wing-Kin Sung Algorithms for next-generation sequencing / Wing-Kin Sung // Chapman & Hall/CRC Computational Biology Series – 2017 – P. 175-185*
2. *Na Deng Single nucleotide polymorphisms and cancer susceptibility / Na Deng, Heng Zhou, Hua Fan, Yuan Yuan // Oncotarget – 2017 Nov 7*
3. *Melanie Kappelman-Fenzl Next Generation Sequencing and Data Analysis / Melanie Kappelman-Fenzl [et al.] // Springer Learning Materials in Biosciences – 2021 – P. 17-36*



# РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ИНДИКАТОРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ЧУГУНА

**А. А. Чеплюков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*cheplicov32@gmail.com;*

*науч. рук. – С.Н. Семенович, канд. тех. наук, зав. НИЛ ИИС*

Предложены схемотехнические и алгоритмические решения для разработки индикаторного устройства для технологического ультразвукового контроля структуры чугуновых отливок. Разработан электронный макет индикаторного устройства, в котором реализована измерительная схема на основе цифровых счетчиков заполнения временных интервалов, пользовательский интерфейс ввода-вывода и алгоритм определения структуры чугуна.

**Ключевые слова:** преобразователь временных интервалов, неразрушающий контроль, микропроцессорное устройство, структура чугуна.

В большинстве случаев на предприятиях машиностроения контроль структуры чугуна осуществляется разрушающими методами, но при высокой информативности эти методы трудоемки и длительны. Основные методы неразрушающего контроля структуры материала при производстве чугуновых отливок можно разделить на акустические и магнитные методы. Магнитные методы основаны на анализе кривой намагничивания, не позволяют оценить структуру материала на большой глубине и не используются на изделиях сложной формы. Лабораторные методы с использованием относительно дорогостоящих ультразвуковых дефектоскопов основываются на корреляции между свойствами чугуна, степенью поглощения и рассеивания упругой волны [1, 2]. С учетом успешного опыта применения подобных устройств [3], в данной работе представлен электронный макет бюджетного микропроцессорного индикаторного устройства, в котором для оценки параметров металла используется анализ скорости распространения ультразвуковой волны.

В качестве основной схемы измерений для технологического контроля структуры металла (серый или высокопрочный чугун) используется теневой метод УЗ-дефектоскопии [1], в котором анализируемая область материала известной толщины (предварительно измеренные линейные размеры) располагается между ультразвуковым излучателем и приёмником. Далее рассчитывается время прохождения ультразвуковой волны методом заполнения временного интервала (см. рисунок 1) и на основании исходных данных о скорости распространения ультразвуковой волны для разных марок чугуна и

заданной толщине объекта, структура материала объекта может быть классифицирована [1-2].

Для измерения интервала времени между двумя событиями – время распространения упругой волны от излучателя до приёмника – используется классический метод заполнения временного интервала. Данный метод основан на использовании аппаратных счетчиков-таймеров микроконтроллера. При настройке параметров счетчика используется максимально возможная для него частота тактирования. Каждое внешнее событие (первое событие – это запуск ультразвукового излучателя, второе событие момент приема эхо-сигнала) вызывает программный обработчик прерывания, фиксирующий текущее значение счета  $N$  для счетчика-таймера. Результат измерения интервала времени  $t_{и}$  между двумя событиями рассчитывается по формуле:

$$t_{и} = T_{\text{таймера}} \cdot (N_2 - N_1),$$

где  $T_{\text{таймера}}$  – период тактов счётчика;  $N_1$  и  $N_2$  – значения счетчика-таймера для первого и второго события соответственно;  $t_1, t_2$  – моменты времени в которые происходит обработка прерываний;  $\Delta_1, \Delta_2$  – погрешность детектирования первого и второго события соответственно;  $U_0$  – амплитуда прямоугольных импульсов на входе.

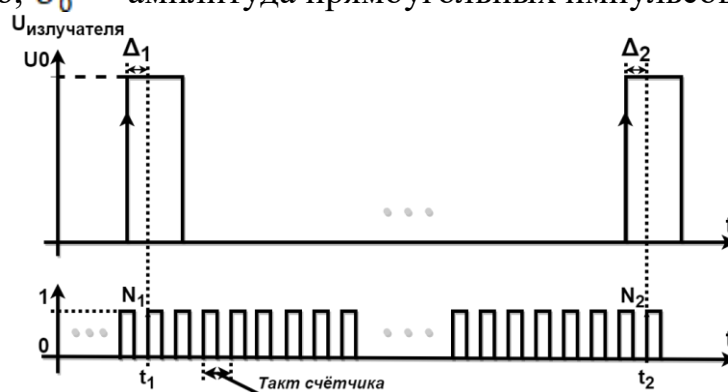


Рис. 1. Метод измерения с помощью заполнения временного интервала

Относительная погрешность измерения интервала  $\delta_{и}$  зависит от трёх компонент:  $\delta_{ТГ}$  – относительная погрешность тактового генератора,  $\delta_N$  – относительная погрешность дискретности счета (зависит от количества счетных импульсов заполнивших интервал и от погрешности детектирования положения импульсов  $\Delta_1, \Delta_2$ ),  $\delta_d$  – погрешность дискриминатора (фазовая ошибка компаратора уровня). Итоговая погрешность рассчитывается по формуле:

$$\delta_n = \pm(\delta_{ТГ} + \delta_N + \delta_d).$$

Наибольший вклад создаёт компонента  $\delta_N$ , обусловленная дискретностью счёта таймера,  $\delta_{ТГ}$  – очень мала и зависит от стабильности используемого тактового генератора. Типичный кварцевый генератор обеспечивает стабильность в пределах  $\pm 0.01\%$ , а компонента  $\delta_d$  для прямоугольных импульсов, поступающих на цифровые входы микроконтроллера, находится в пределах  $\pm 0.01\%$ . Применение режима синхронного запуска ультразвукового излучателя с привязкой к тактовой серии таймера позволяет минимизировать вклад компоненты  $\Delta_1$ , вклад компоненты  $\Delta_2$  при этом не превышает длительности одного счетного такта таймера.

Анализ исходных данных позволяют оценить необходимую частоту тактирования счетчика. Диапазон типичных толщин отливок (от 20 до 300 мм) и величина максимальная скорости распространения ультразвуковой волны (до 5500 м/с) определяют диапазон исследуемых интервалов – от единиц до сотни микросекунд. Типичная дискретность измерения линейных размеров (100 мкм) определяет минимальные требования к выбору  $T_{\text{таймера}}$  – за 20нс продольная волна проходит расстояние порядка 100 мкм в высокопрочном чугуна[1-3].

В разработанном электронном макете индикаторного устройства (см. рисунок 2) реализована измерительная схема на основе цифровых счетчиков микроконтроллера STM32F401, ядро ARM Cortex-M4 с частотой тактирования 84 МГц обеспечивает дискретность счёта порядка 12 нс. Индикаторное микропроцессорное устройство включает в себя устройства ввода-вывода для управления процессом измерения, внешние схемы ультразвукового излучателя, приёмника и дискриминатора.

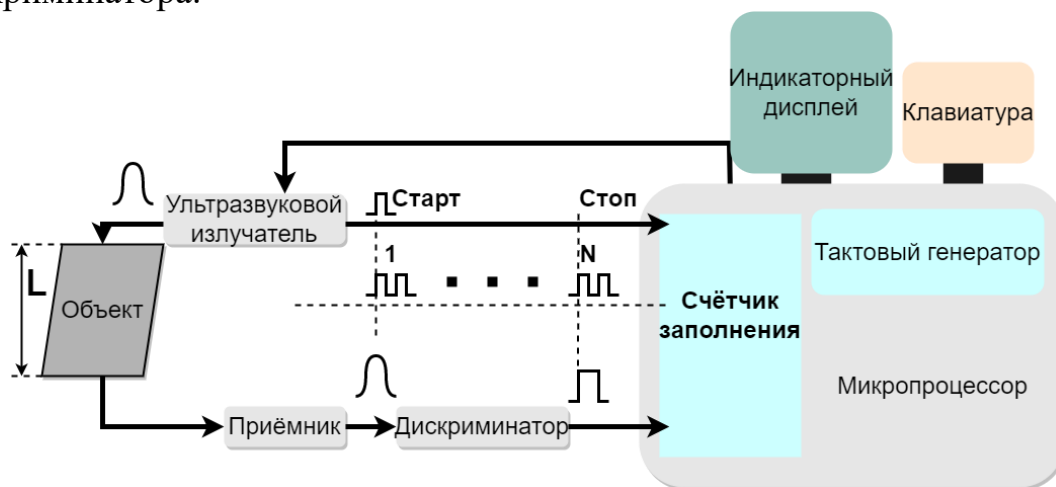


Рис. 2. Структурно-функциональная схема индикатора чугуна

В макете были реализованы и протестированы два основных способа контроля. Первый – количественное определение толщины объекта для случая, когда известны типичные скорости распространения ультразвукового сигнала для серого и высокопрочного чугуна – метод измерения с переменной толщиной объекта. Оператор сможет сравнить два расчётных значения толщины с реальными размерами объекта. Второй – метод измерения с постоянной толщиной – качественная классификация чугуна с заданным линейным размером для известных значений скорости распространения продольной волны.

Для поддержки одновременной работы нескольких функциональных процессов (измерение, индикация, отображение) в разработке программного обеспечения для макета была использована многозадачная система для встраиваемых операционных систем FREERTOS. Для работы с пользовательским меню была использована библиотека с открытым исходным кодом MENU [4]. Для взаимодействия с дисплеем была использована библиотека U8G2 [5]. В качестве основных электронных компонент были выбраны: микроконтроллер STM32F401, модуль кнопочной клавиатуры и ЖКИ дисплей с пассивной матрицей, который обладает малым энергопотреблением.

Предложенное в работе решение позволяет создать бюджетное, портативное устройство для индикации параметров и технологического контроля структуры чугуна.

## **ВЫВОДЫ**

Предложено бюджетное портативное микропроцессорное устройство для контроля структуры чугунных отливок. На едином управляющем микроконтроллере реализован классический метод заполнения временного интервала на основе цифрового внутреннего счётчика совместно с пользовательским интерфейсом ввода-вывода и алгоритмом расчета параметров объекта. Тактовая частота счетных таймеров процессора обеспечивает дискретность счета порядка 12 нс и дискретность измерения линейных размеров на уровне 100 мкм. Данная разработка позволит осуществлять оперативный контроль структуры чугуна. Работоспособность макета протестирована с использованием прецизионного генератора прямоугольных импульсов и гармонических сигналов.

### Библиографические ссылки

1. Семеренко А.В., Богомолов И.А. Контроль структуры чугуна с применением ультразвукового толщиномера Microgage III [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.sonatest.ru/publications\\_7.html](http://www.sonatest.ru/publications_7.html). – Дата доступа 22.05.2022.
2. Воронкова Л.В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 25 с.
3. Майоров А.Л., Баяев А.Р., Коновалов Г.Е., Гиль Н.Н. Результаты использования индикаторов структуры высокопрочного чугуна типа ИЧ в условиях производства //Литье и металлургия, № 2 (36), 2006. – С. 102–105.
4. Light library for simple interaction with user interface in stm32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/kapitanArsen/Menu> – Дата доступа 23.05.2022
5. U8g2: Library for monochrome displays, version 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/olikraus/u8g2> – Дата доступа 23.05.2022.

# ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ РАСТЕНИЙ

**Ю. В. Черепанова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*j.cher.30.11@gmail.com;*

*науч. рук. – А. В. Микулович, ст. преп.*

В данной работе рассмотрены методы интеллектуального анализа данных, которые применяются в сельском хозяйстве. Проведено сравнение популярных алгоритмов машинного обучения и на основе самого точного метода реализовано прогнозирование по выращиванию наилучшей сельскохозяйственной культуры.

**Ключевые слова:** интеллектуальный анализ данных, случайный лес, классификация, машинное обучение.

## **ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день набирает популярность точное земледелие, эта современная технология земледелия использует данные о характеристиках почвы, данные об урожайности, погодных условиях и предлагает фермерам наиболее оптимальную культуру для выращивания в своих хозяйствах для получения максимального урожая и прибыли [1].

Данный подход к выращиванию может быть реализован посредством использования методов интеллектуального анализа данных, поэтому их изучение и использование актуально на сегодняшний день.

Целью данной работы является изучение и применение методов анализа данных в области земледелия.

Методы интеллектуального анализа данных (ИАД) позволяют решить многие задачи, из них основными являются: классификация, кластеризация, регрессия, ассоциация, визуализация [2].

## **МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В работе была рассмотрена задача классификации, которая заключается в получении категориального ответа на основе набора признаков [3]. Задача рассматривалась на основе набора данных, который был получен путем дополнения и объединения различных общедоступных наборов данных Индии [4]. В наборе рассматриваются следующие параметры: соотношение содержания азота, фосфора, калия в почве в кг/га, температура в градусах Цельсия, относительная

влажность воздуха в %, значение pH почвы и количество осадков в мм. Всего набор данных содержит 2200 записей параметров. Данное исследование выполнено с помощью языка программирования Python и с использованием следующих библиотек: pandas, numpy, scikit-learn, seaborn, matplotlib.

В исследовании были рассмотрены следующие методы:

### 1. К-ближайших соседей

Одним из самых популярных алгоритмов машинного обучения является метод ближайших соседей. В случае использования метода для классификации объект присваивается тому классу, который является наиболее распространённым среди k соседей данного элемента, классы которых уже известны [5]. Реализация представлена на рисунке 1.

### 2. Логистическая регрессия

Ещё одним методом, который используется в данном исследовании, является логистическая регрессия. Данный метод полезен в ситуациях, когда необходимо предсказать итог на основании значений набора переменных [6]. Реализация представлена на рисунке 1.

K-Nearest Neighbors	Logistic Regression
<pre>from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier  knn = KNeighborsClassifier() knn.fit(X_train,y_train)  pred_knn = knn.predict(X_test)  x = metrics.accuracy_score(y_test, pred_knn) acc.append(x) model.append('K-NN') print(x)</pre>	<pre>from sklearn.linear_model import LogisticRegression  lr = LogisticRegression() lr.fit(X_train, y_train)  pred_lr = lr.predict(X_test)  x = metrics.accuracy_score(y_test, pred_lr) acc.append(x) model.append('LR') print(x)</pre>
0.9886363636363636	0.9522727272727273

Рис. 1. Реализация и показатель точности для методов k - ближайших соседей и логистической регрессии

### 3. Дерево решений

Дерево решений является одним из методов автоматического анализа данных, основанным на нахождении правил или решений, где каждому объекту соответствует единственный узел, дающий решение. За счет обучающего множества правила генерируются автоматически в процессе обучения [7]. Реализация метода представлена на рисунке 2. Для обучения был выбран критерий энтропии, а также было наложено ограничение на количество разбиений в ветках.

### 4. Случайный лес

Случайный лес — это наиболее гибкий и простой в использовании алгоритм. Лес является набором из множества деревьев решений. Он создаёт деревья для случайно выбранных семплов данных, получает

прогноз от каждого дерева и выбирает наилучшее решение посредством голосования. Алгоритм предотвращает переобучение, создавая деревья на случайных выборках. В то же время метод схож с методом ближайших соседей. Лес осуществляет предсказания для объектов на основе меток похожих объектов из обучения. Схожесть при этом тем выше, чем чаще эти объекты оказываются в одном и том же листе дерева [8]. Реализация представлена на рисунке 2.

Random Forest	Decision Tree
<pre>from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier  rf_model = RandomForestClassifier(n_estimators = 20) rf_model.fit(X_train, y_train)  pred_rf = rf_model.predict(X_test)  x = metrics.accuracy_score(y_test, pred_rf) acc.append(x) model.append('RF') print(x)  0.9977272727272727</pre>	<pre>from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier  decision_tree = DecisionTreeClassifier(criterion = 'entropy',  max_depth = 5) decision_tree.fit(X_train, y_train)  pred_tree = decision_tree.predict(X_test)  x = metrics.accuracy_score(y_test, pred_tree) acc.append(x) model.append('DTree') print(x)  0.9386363636363636</pre>

*Рис. 2.* Реализация и показатель точности для методов случайного леса и дерева решений

Сравнивая все полученные показатели точности, можно сделать вывод, что самую лучшую точность показал метод «Случайного леса». Точность составила 0,998. На основе этого алгоритма было реализовано предсказание к выращиванию наилучшей сельскохозяйственной культуры в определенной местности. Реализация представлена на рисунке 3.

## Predict

```
data = np.array([[100, 82, 50, 27, 80, 5,105]])
prediction = rf_model.predict(data)
print(prediction)
```

```
['banana']
```

*Рис. 3.* Результат прогнозирования наилучшей к выращиванию культуры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно отметить, что методы интеллектуального анализа данных, а также и те, что были представлены выше, набирают популярность в различных областях жизни, в том числе, в сельском хозяйстве.



Использование данных алгоритмов помогает строить более эффективные стратегии ведения сельского хозяйства, а также помогает экономить хозяйственные и природные ресурсы. При этом открываются реальные возможности производства качественной продукции и сохранения окружающей среды. Ведь точное земледелие позволяет сократить затраты на внесение удобрений и семян.

#### Библиографические ссылки

1. *Rositsa Beluhova-Uzunova, Dobri Dunchev* Precision farming – concepts and perspectives – 2019. DOI:10.30858/zer/112132
2. *Яцков Н. Н.* Интеллектуальный анализ данных. Минск: БГУ, 2014, 4 - 11 с.
3. *Дьяконов А. Г.* Методы решения задач классификации с категориальными признаками// Прикладная информатика и математика. Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова, № 46, 2014, с 103 – 127
4. Интернет – адрес: <https://www.kaggle.com/datasets/atharvaingle/crop-recommendation-dataset>
5. Интернет – адрес: <https://realpython.com/knn-python/>
6. *Paklin N.B.* Logistic regression and ROC- analysis – a mathematical tool//Official site of BaseGroup Labs URL: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic/>
7. Nagesh Singh Chauhan, **Decision Tree Algorithm**, Data Science Enthusiast on February 9, 2022 in Machine Learning
8. Интернет–адрес: <https://www.javatpoint.com/machine-learning-random-forest-algorithm>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ПониЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ДАННЫХ НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПРЕДСКАЗАНИЯ ВЫЖИВАЕМОСТИ

**В. Н. Яцков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*vlad18742@gmail.com;*

*науч. рук.: М. К. Чепелева, ассист.*

Использованы методы понижения размерности данных для сокращения вычислительной сложности и повышения эффективности работы алгоритма для предсказания выживаемости пациентов с онкологическими заболеваниями методом блочного леса с расщеплением узлов по методу *exponential log-likelihood loss*. Проведено сравнение качества предсказания при снижении размерности методами главных компонент и независимых компонент. Получена лучшая точность 84,55 % по Бриеру для блочного леса при использовании метода независимых компонент. Данная работа может быть использована для улучшения программных средств предсказания клинических рисков в персонализированной медицине.

**Ключевые слова:** блочный лес; секвенирование; предсказание выживаемости; метод главных компонент; метод независимых компонент.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития биомедицинских технологий позволяет при лечении заболеваний использовать подход персонализированной медицины (*personalized medicine*) – индивидуальное рассмотрение данных конкретного пациента для принятия решений [1]. Такой подход является актуальным при онкологических заболеваниях вследствие высокой гетерогенности опухолей, и одной из его составляющих является предсказание рисков для пациентов.

Предсказание выживаемости является оценкой времени наступления критического события, основанной на функции вероятности наступления данного события. Прогнозирование функции выживаемости пациента и установление влияния признаков (в число которых входят различные виды терапии) позволяют принять решение об оптимальном плане лечения.

Данная работа подразумевает анализ многомерных данных. Однако предсказание выживаемости сразу на исходных данных (экспрессии генов) не рационально по двум причинам. Во-первых, получается слишком высокая вычислительная сложность. Во-вторых, не все признаки имеют предсказательную способность.

Цель данной работы – разработка алгоритма для предсказания выживаемости пациентов, больных раком молочной железы, на основе метода блочного леса, и повышение эффективности его работы за счет использования методов снижения размерности данных.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для тестирования алгоритмов были использованы данные секвенирования РНК для пациентов с раком груди [2]. После очистки от неинформативных данных выборка состояла из 1158 образцов. Для 198 образцов наступило критическое событие в определенный момент времени, 960 – цензурированы. Критическим событием является смерть пациента. Помимо 20119 признаков, описывающих экспрессию генов, имелись клинические признаки: пол, подтип рака, тип образца ткани, группа по наличию раковой опухоли.

### Сокращение размерности данных

В данной работе были использованы два метода для уменьшения числа признаков: метод главных компонент и метод независимых компонент.

Метод главных компонент (МГК) представляет собой вращение системы координат исходных данных с целью максимизировать дисперсию новых признаков [3].

Метод независимых компонент (МНК) – метод разложения линейных сигналов на аддитивные независимые компоненты. При этом мерой независимости в [4] считается наибольшее отклонение от гауссовости. Аппроксимация данного выражения:

$$J \approx \sum_{j=1}^k \left[ E(G(y_i)) - E(G(y_j^{gauss})) \right]^2 \quad (1)$$

где  $y_i = w_i x$ ,  $x$  – вектор исходных данных размера  $k$ ,  $w_i$  –  $i$ -я строка матрицы преобразования исходных данных в независимые компоненты,  $y_j^{gauss}$  – вектор случайных гауссовых значений с параметрами, как у  $y_j$ ,  $E$  – матожидание,  $G$  – одна из заданных функций:

$$G(u) = \frac{1}{a} \log(\cosh(au)), a \in [1, 2] \quad (2)$$

$$G(u) = -\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \quad (3)$$

## Предсказание выживаемости

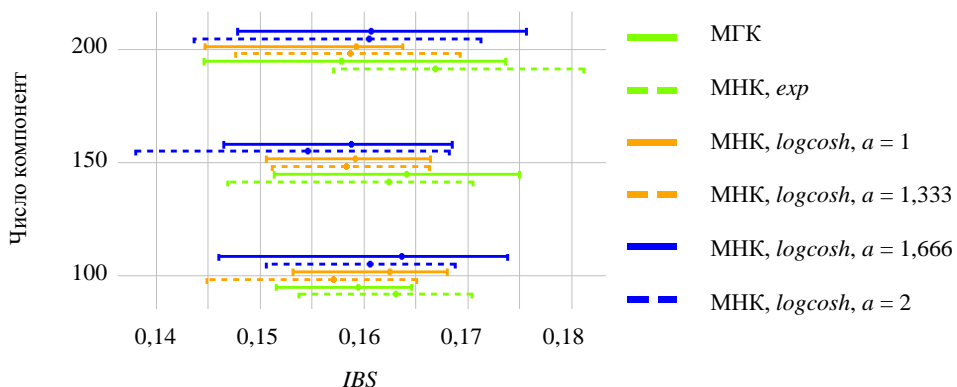
Основываясь на ранее проведенном исследовании по сравнению точности алгоритмов предсказания выживаемости [5], был выбран блочный лес с расщеплением узлов по методу *exponential log-likelihood loss*, также описанным в [5], поскольку он показал лучший результат среди сравниваемых алгоритмов.

## Качество предсказания

Оценка Бриера – мера среднеквадратичного отклонения оценки вероятностной величины от ее истинного значения в заданный момент времени. Интегрированная оценка Бриера (*IBS*) – сумма оценок Бриера за все время наблюдения. В результате полностью достоверного предсказания значение данной оценки равно 0, в противном случае – 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Выживаемость пациентов была предсказана алгоритмом блочного леса с *EL* расщеплением узлов. Материал для предсказания был получен следующим образом: исходные данные были обработаны названными выше методами снижения размерности при 100, 150 и 200 компонентах, причем для МНК были взяты функции *logcosh* (2) и *exp* (3) для аппроксимации (1). Для (2) были взяты значения параметра, описанные на рисунке. На рисунке показаны распределения ошибок предсказания выживаемости методом блочного леса, но с различными методами и параметрами уменьшения размерности данных.



Распределения значений ошибок предсказания по интегрированной оценке Бриера

По полученным результатам можно сделать вывод, что использование МНК с функцией *logcosh* для аппроксимации (1) дает лучший результат, чем МГК для уменьшения размерности. МНК с функцией *exp* для аппроксимации (1) не дает определенного результата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено сравнение методов понижения размерности данных: метод главных компонент и метод независимых компонент. Алгоритм блочного леса показал лучшую среднюю оценку 84,55 % по оценке Бриера на данных, полученных от МНК. Данный результат может быть использован для улучшения работы программных средств предсказания клинических рисков в персонализированной медицине.

### Библиографические ссылки

1. *Ma J., Hobbs B.P., Stingo F. C.* Statistical Methods for Establishing Personalized Treatment Rules in Oncology // *Biomed Res Int.* 2015. Vol. 2015, №670691. DOI:10.1155/2015/670691.
2. Comprehensive molecular portraits of human breast tumours [Electronic resource] – Mode of access: <https://www.nature.com/articles/nature11412>. – Date of access: 24.12.2021.
3. *Яцков, Н. Н.* Интеллектуальный анализ данных / *Н. Н. Яцков.* – Минск : БГУ, 2014. – 151 с.
4. *Shchurenkova, E.* Dimension reduction using Independent Component Analysis with an application in business psychology : master of science / *E. Shchurenkova.* – Vancouver, 2017. – 72 p
5. Разработка алгоритма предсказания выживаемости пациентов с онкологическими заболеваниями : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–21 апр. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Скакун (отв. ред) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – 317 с.

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭТИЛ-2-ЦИАНО-[3-(5-ФЕНИЛ)-2-ФУРАН]-2-ПРОПЕНОАТА

А. А. Алейникова, А. Ю. Орлович, А. В. Блохин

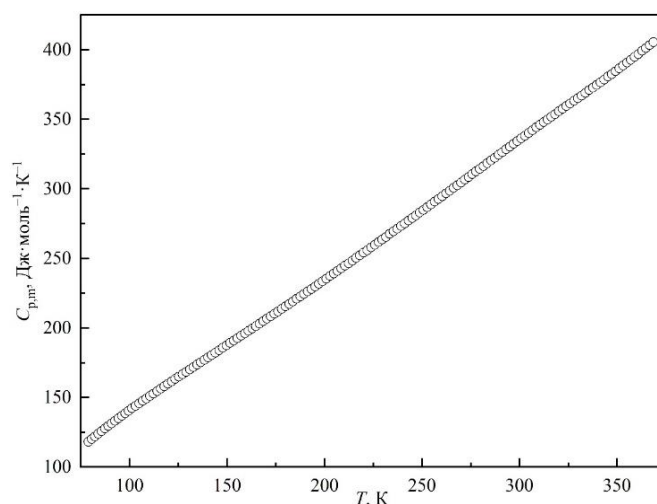
*Белорусский государственный университет, Минск;  
sashaleinikova@gmail.com, arlovicha@mail.ru, blokhin@bsu.by;  
науч. рук. – А.В. Блохин, д-р хим. наук, проф.*

Производные фурана являются биологически активными соединениями, обладают цитотоксическими и антиспазмолитическими свойствами [1], что актуализирует необходимость определения термодинамических свойств данного класса соединений. Полученные данные могут найти применение при решении задач оптимизации производственных процессов, при валидации экспериментальных значений. В настоящей работе представлено исследование термодинамических свойств этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата.

**Ключевые слова:** термодинамические свойства, Этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2.

Этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноат был получен по реакции конденсации Кневенагеля. Для подтверждения структуры образца использовались методы ИК-спектроскопии и ПМР-спектроскопии. Чистота образца проверялась методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием.

Методом адиабатической калориметрии была получена температурная зависимость теплоемкости этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в интервале (80–370) К (Рисунок). Измерения проводились в автоматизированном вакуумном адиабатическом калориметре ТАУ–10 (ЗАО «Термис», г. Москва, Россия), описанном ранее в [2]. Погрешность определения теплоемкости в температурном интервале (80 – 370) К не превышает  $\pm 0,4$  %.



Зависимость теплоемкости этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата от температуры

Сглаженные значения стандартных термодинамических функций (теплоемкости, энтропии, приведенной энтальпии и приведенной энергии Гиббса) этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в интервале (80–370) К приведены в Таблице.

Таблица 1

Сглаженные значения стандартных термодинамических этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в температурном интервале (80 – 370) К

Т, К	$C_{p,m}^o$	$\Delta_{80}^T H_m^o / T$	$\Delta_{80}^T S_m^o$	$-\Delta_{80}^T G_m^o / T$
	Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>			
80	119,4 ± 0,5	0	0	0
90	130,5 ± 0,5	13,89 ± 0,06	14,71 ± 0,06	0,8214 ± 0,0819
100	140,9 ± 0,6	26,08 ± 0,10	29,01 ± 0,12	2,929 ± 0,157
110	150,7 ± 0,6	36,96 ± 0,15	42,90 ± 0,17	5,934 ± 0,227
120	160,1 ± 0,6	46,83 ± 0,19	56,41 ± 0,23	9,580 ± 0,293
130	169,3 ± 0,7	55,90 ± 0,22	69,59 ± 0,28	13,69 ± 0,36
140	178,5 ± 0,7	64,33 ± 0,26	82,47 ± 0,33	18,15 ± 0,42
150	187,7 ± 0,8	72,25 ± 0,29	95,10 ± 0,38	22,86 ± 0,48
160	196,9 ± 0,8	79,75 ± 0,32	107,5 ± 0,4	27,76 ± 0,53
170	206,2 ± 0,8	86,92 ± 0,35	119,7 ± 0,5	32,81 ± 0,59
180	215,5 ± 0,9	93,80 ± 0,38	131,8 ± 0,5	37,98 ± 0,65
190	224,9 ± 0,9	100,5 ± 0,4	143,7 ± 0,6	43,23 ± 0,70

Продолжение таблицы 1

T, К	$C_{p,m}^{\circ}$	$\Delta_{80}^T H_m^{\circ} / T$	$\Delta_{80}^T S_m^{\circ}$	$-\Delta_{80}^T G_m^{\circ} / T$
	Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>			
200	234,5 ± 0,9	106,9 ± 0,4	155,5 ± 0,6	48,55 ± 0,75
210	244,2 ± 1,0	113,2 ± 0,5	167,1 ± 0,7	53,92 ± 0,81
220	254,1 ± 1,0	119,4 ± 0,5	178,7 ± 0,7	59,33 ± 0,86
230	264,0 ± 1,1	125,5 ± 0,5	190,2 ± 0,8	64,77 ± 0,91
240	274,0 ± 1,1	131,5 ± 0,5	201,7 ± 0,8	70,23 ± 0,96
250	284,1 ± 1,1	137,4 ± 0,5	213,1 ± 0,9	75,72 ± 1,01
260	294,3 ± 1,2	143,2 ± 0,6	224,4 ± 0,9	81,22 ± 1,06
270	304,5 ± 1,2	149,0 ± 0,6	235,7 ± 0,9	86,73 ± 1,12
280	314,8 ± 1,3	154,7 ± 0,6	247,0 ± 1,0	92,26 ± 1,17
290	325,1 ± 1,3	160,4 ± 0,6	258,2 ± 1,0	97,7 ± 1,22
298,15	333,5 ± 1,3	165,0 ± 0,7	267,3 ± 1,1	102,3 ± 1,3
300	335,4 ± 1,3	166,1 ± 0,7	269,4 ± 1,1	103,3 ± 1,3
310	345,5 ± 1,4	171,7 ± 0,7	280,6 ± 1,1	108,9 ± 1,3
320	355,5 ± 1,4	177,3 ± 0,7	291,7 ± 1,2	114,4 ± 1,4
330	365,3 ± 1,5	182,8 ± 0,7	302,8 ± 1,2	119,9 ± 1,4
340	375,1 ± 1,5	188,4 ± 0,8	313,8 ± 1,3	125,5 ± 1,5
350	385,4 ± 1,5	193,8 ± 0,8	324,8 ± 1,3	131,0 ± 1,5
360	396,0 ± 1,6	199,3 ± 0,8	335,9 ± 1,3	136,6 ± 1,6
370	407,1 ± 1,6	204,8 ± 0,8	346,9 ± 1,4	142,1 ± 1,6

Стандартные термодинамические свойства этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в состоянии идеального газа в температурном интервале (0–1000) К были рассчитаны с использованием методов статистической термодинамики. Для расчета поступательного вклада в термодинамические свойства было использовано значение молярной массы  $M = 267,28105$  г·моль<sup>-1</sup>. Вращательный вклад был рассчитан с использованием значения произведения главных моментов инерции молекулы исследуемого соединения  $I_A I_B I_C = 7,47 \cdot 10^{-131}$  кг<sup>3</sup> м<sup>6</sup>. Значения частот нормальных колебаний исследуемого соединения, использовавшиеся при расчете колебательного вклада в термодинамические функции) были получены из данных ИК-спектроскопии, а также соотнесены с результатами квантово-химических вычислений на уровне теории DFT B3LYP/6-311G+(3df, 2p). Для расчета вклада внутреннего вращения решалось уравнение Шредингера для заторможенного вращения [3]. Для



получения потенциальных функций вращения был выполнен расчет энергий молекулы этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата при повороте метильного и этильного волчков на  $360^\circ$  с шагом в  $5^\circ$ . Результаты численного эксперимента аппроксимировались тригонометрическим рядом Фурье. Приведенные моменты инерции метильного и этильного волчков составили  $5,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  и  $14,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  соответственно. Результаты расчета стандартных термодинамических свойств этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в состоянии идеального газа при температуре  $T = 298,15 \text{ К}$  представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Стандартные термодинамические функции этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата в состоянии идеального газа ( $p^\circ=10^5 \text{ Па}$ )

Т, К	$C_{p,m}^\circ$	$\Delta_0^T H_m^\circ / T$	$\Delta_0^T S_m^\circ$	$-\Delta_0^T G_m^\circ / T$
	Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>			
298,15	$207,32 \pm 2,07$	$132,83 \pm 1,33$	$540,65 \pm 5,41$	$407,82 \pm 4,08$

Стандартная энтальпия образования исследуемого соединения в состоянии идеального газа при температуре  $T = 298,15 \text{ К}$  была получена в рамках метода изодесмических реакций. Оптимизация геометрий молекул, расчет энергий наиболее устойчивых конформаций и наборов частот нормальных колебаний были выполнены на уровне теории DFT B3LYP/6-311G+(3df, 2p). Средневзвешенное значение стандартной энтальпии образования исследуемого вещества в состоянии идеального газа составило  $-(119,5 \pm 11,0) \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ , что согласуется с экспериментальным значением  $-(118,7 \pm 8,5) \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ , приведенным в литературе [4].

#### Библиографические ссылки

1. *H. Ghalla et al. J. Molecular Structure (2014) 1059*
2. *P. Garonic et. al., Angew. Makromol. Chem. (1994), 77.*
3. *Грибов, Л.А. От теории спектров в теории химических превращений / Л.А. Грибов. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 368 с.*
4. *R. Kos et al. Modern Organic Chem. Res.(2017) 2:2.*

# РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТРАНСДЕРМАЛЬНЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ НЕСТЕРОИДНЫХ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ

**А. Ю. Босякова**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*annbos10@mail.com;*

*науч. рук. – Т. А. Савицкая, д-р хим. наук, проф.*

Разработаны методики и получены новые трансдермальные лекарственные формы, в том числе биодиградируемые, нестероидных противовоспалительных препаратов (НПВП), которые сегодня применяются только в виде парентеральных (инъекции) и пероральных (таблетки, капсулы). В качестве НПВП использованы ибупрофен (R,S)-2-(4-изобутилфенил)-пропионовая кислота), диклофенак (2-[2-(2,6-дихлорфенил) аминифенил] этановая кислота) и мелоксикам (4-гидрокси-2-метил-N-(5-метил-2-тиазолил)-2Н-1,2-бензотиазин-3-карбоксамид 1,1-диоксид). Трансдермальные формы доставки НПВП получены в виде гидрофильных мазей (гелей), пленок и матричных пластырей.

Методом равновесного диализа через полупроницаемую мембрану Visking Dialysis Tubing 44126.02 проведена оценка релиза лекарственных веществ из полученных лекарственных форм и установлено, что наиболее полное высвобождение обеспечивает пленочный дизайн лекарственной формы по сравнению с гелевым, например, 88 и 91% в случае диклофенака и 62 и 98% соответственно в случае ибупрофена. На примере ибупрофена показано отсутствие существенной разницы в его релизе из пленки и пластыря: 98 и 97 % соответственно. Проведена оценка структурно-механических свойств новых гидрофильных мазей, приготовленных на основе водорастворимого производного целлюлозы – сульфата-ацетата, и показано их преимущество по степени высвобождения лекарственного вещества по сравнению с промышленно выпускаемыми мазями ибупрофена и диклофенака.

**Ключевые слова:** трансдермальный; диклофенак; ибупрофен; мелоксикам; пленка; мазь; пластырь; релиз.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Системы трансдермальной доставки лекарств представляют собой лекарственные формы, предназначенные для доставки терапевтически эффективного количества лекарства через кожу пациента [1]. Трансдермальные формы доставки (ТФД) являются альтернативой парентеральному и пероральному введению лекарственных средств. По сравнению с пероральным приемом трансдермальное введение обеспечивает более быстрое действие препарата и помогает избежать проблем, связанных со снижением его активности в результате

метаболизма в желудочно-кишечном тракте, позволяет снизить частоту назначения лекарства, уменьшить необходимые дозы и минимизировать риск развития гастроинтестинальных побочных реакций [2]. Это особенно важно для нестероидных противовоспалительных препаратов (НПВП), для которых ассортимент ТФД ограничен. Поэтому разработка новых ТФД для этой группы веществ является актуальной [3].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Мазевые лекарственные формы диклофенака натрия и мелоксикама были приготовлены на гидрофильной основе. Для этого в 2,5% растворы лекарственных веществ добавляли сульфат-ацетат целлюлозы в форме натриевой соли и карбопол 974Р в массовом соотношении 1:1 до образования однородной суспензии. При введении 2,5% раствора аммиака суспензия превращалась в прозрачный гель. Для сравнения использовали промышленно выпускаемые мази «Диклофенак гель 1%» («Хиперион С.А.», Румыния) и «Мелоксикам» (РУП «БМП», Республика Беларусь).

В качестве полимерной матрицы для приготовления пленочных форм на основе ибупрофена и диклофенака натрия использовали 10–12 % (масс.) растворы поливинилового спирта (ПВС) на водно-спиртовой и водной основе соответственно. Увеличение растворимости ибупрофена в воде было достигнуто с помощью L-аргинина (2-амино-5-гуанидинпентановой кислоты). Образующийся аргинат ибупрофена не только повышает растворимость, но и влияет на степень инверсии и биодоступность активного S(+) энантиомера и терапевтической активности ибупрофена в целом [4]. Из полученных растворов после деаэрации были сформованы пленки на автоматической установке MSK-AFA-L1000 Automatic Thick Film Coater. Готовые пленки сушили на воздухе. Формовочные растворы также наносили на тканевую прослойку промышленно выпускаемого пластыря (Галтеяфарм, Беларусь) с последующим высушиванием нанесенного слоя раствора.

Высвобождение мелоксикама, диклофенака натрия и ибупрофена *in vitro* проводили методом равновесного диализа через полупроницаемую мембрану из регенерированной целлюлозы Visking Dialysis Tubing 44126.02 диаметром 49 мм (размер пор 25 Å). На мембрану помещали образец геля, пленки или пластыря в таком количестве, чтобы содержание ЛВ составляло 10 мг.

Для полученных проб регистрировали оптическую плотность на спектрофотометре Varian Cary®50: для диклофенака натрия при длине волны 275 нм, для ибупрофена – 265 нм, для мелоксикама – 360 нм в

кюветах с толщиной рабочего слоя 10 мм и определяли концентрацию высвободившегося вещества по калибровочным графикам.

Реологию растворов оценивали на реометре Rheotest RN 5.1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структурно-механические свойства мазей оценивали по результатам реологического исследования. На основании данных рис. 2 исследованные образцы мазей относятся к типу неньютоновских псевдопластических жидкостей, характеризуются уменьшением вязкости с ростом скорости сдвига и по значению эффективной вязкости попадают в реологический оптимум консистенции (намазываемости) [5].

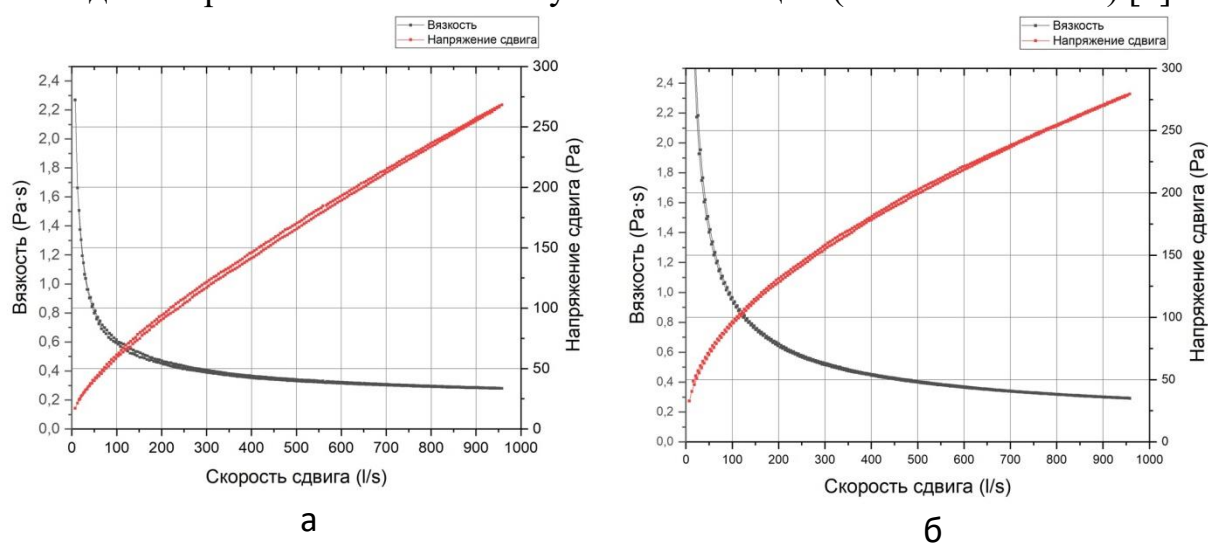


Рис. 1. Реологические кривые экспериментальных гидрофильных мазей.

а – мелоксикам; б – диклофенак

Кинетика высвобождения ЛВ из различных по дизайну трансдермальных лекарственных форм для диклофенака натрия и мелоксикама представлена на рисунке 2а. Видно, что диклофенак натрия из экспериментально полученных гидрофильной мази и пленки высвобождается на 88% (кривая 1) и 91% (кривая 3) соответственно. Релиз мелоксикама из экспериментальной мази составляет 71% (кривая 4). Для сравнения кривая 2 иллюстрирует релиз диклофенака из промышленной мази «Диклофенак гель 1%». Он составляет 80%, что ниже, чем у мази диклофенака, приготовленной нами на гидрофильной основе – 88%.

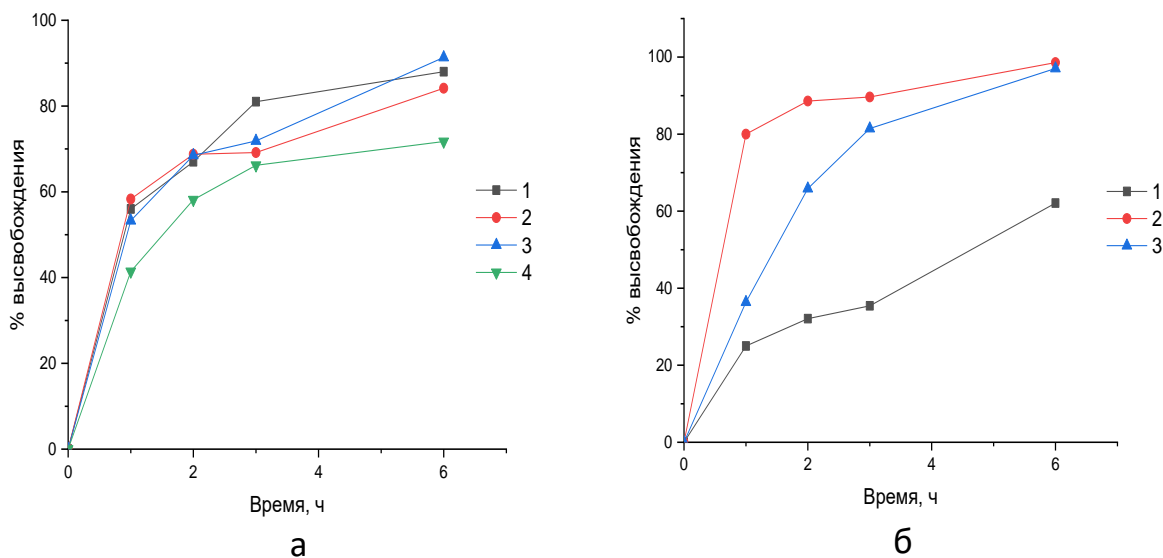


Рис. 2. Кинетика высвобождения ЛВ из трансдермальных лекарственных форм.  
 а – 1 – экспериментальная мазь диклофенак; 2 – мазь «Диклофенак гель 1%», Румыния; 3 – пленка на основе диклофенака натрия; 4 – экспериментальная мазь мелоксикама;  
 б – 1 – мазь ибупрофен РУП «БМП»; 2 – пленка; 3 – пластырь

Кинетика высвобождения ибупрофена из различных трансдермальных форм представлена на рисунке 2б. Полный релиз ЛВ в течение 6 часов обеспечивают как пленка, так и пластырь. Таким образом, получены новые трансдермальные формы НПВП и *in vitro* проведена оценка релиза из них ЛВ.

#### Библиографические ссылки

1. Benson NA. Transdermal drug delivery: penetration enhancement techniques. *Curr Drug Deliv.* 2005; 2 (1): 23–33.
2. Bhowmik D., Gopinath H., Kumar B.P., Duraivel S., Kumar K.P.S. Controlled Release Drug Delivery Systems // *The pharma innovation journal* - 2012. Vol.1, No10.-P.24-32.
3. Васильев А.Е., Краснюк И.И., Равикумар С., Тохмахчи В.Н. Трансдермальные терапевтические системы доставки лекарственных веществ (обзор) // *Хим.-фарм. журн.* 2001. Т. 35. с. 29–42.
4. Cajaville J.P. Ibuprofen Arginate for Rapid-Onset Pain Relief in Daily Practice: A Review of Its Use in Different Pain Conditions// *Universitario HM.* -2021. - Vol.14-p.117-126.
5. Яремчук Ан.А. Обоснование состава многокомпонентной мази для лечения гнойных ран в первой фазе раневого процесса// *Вестник фармации* 2012, №3 (57), с.1-8.

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ 1,4-ДИЗАМЕЩЕННЫХ 1*H*-1,2,3-ТРИАЗОЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К МИКРООРГАНИЗМУ *STAPHYLOCCOCUS AUREUS* МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К. М. Вербило

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*che.verbilo@bsu.by;*

*науч. рук. – А. В. Зураев, к. хим. наук, доц.*

В работе получен ряд ранее не описанных 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов и исследована их антимикробная активность по отношению к патогенному штамму микроорганизма *S.aureus* ATCC 6538. В результате анализа данных о механизмах действия современных антимикробных препаратов выделена предположительная мишень антимикробного действия 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов – белок уридиндифосфат-N-ацетиленолпирувилглюкозамин редуктаза (MurB). На основании полученных в результате докинга конформаций ряда 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов в активный центр белка MurB микроорганизма *S.aureus* ATCC 6538 установлены белок-субстратные взаимодействия, определяющие антибактериальную активность замещенных 1*H*-1,2,3-триазолов. Анализ предполагаемого механизма действия и особенностей белок-субстратных взаимодействий между полученными соединениями и белками MurB, а также связи структура-действие позволил определить направления функционализации 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов с целью создания на их основе новых эффективных антибактериальных препаратов.

**Ключевые слова:** молекулярный докинг, 1,4-дизамещенные 1*H*-1,2,3-триазолы, микробиологическая активность, медь-катализируемое азид-алкиновое [3+2]-циклоприсоединение, *S.aureus*.

## ВВЕДЕНИЕ

Борьба с рядом заболеваний и патологических состояний человека, которые являются основными причинами смертности людей постиндустриального общества – заболеваниями сердечно-сосудистой системы, злокачественными новообразованиями, инфекциями вызванными микроорганизмами с широкой лекарственной резистентностью, нервно-дегенеративными заболеваниями – требует как создания новых эффективных лекарственных средств, так и поиск новых концепций разработки и модификации уже существующих биологически активных соединений [1, 2]. Одним из наиболее распространенных возбудителей болезней являются патогенные штаммы микроорганизма *S.aureus*, обладающие множественной лекарственной

устойчивостью. В связи с этим, несмотря на наличие широкого спектра применяемых в настоящее время антимикробных препаратов, разработка новых более эффективных антимикробных средств остается актуальной задачей.

Гетероциклические соединения и их производные, по праву, являются наиболее перспективным классом соединений для создания новых лекарственных средств ввиду их разнообразных электронных свойств, геометрических характеристик и широкого спектра биологической активности[3, 4]. Особое значение среди данного класса соединений приобрели производные 1*H*-1,2,3-триазола, которые нашли разнообразное применение в области дизайна новых биологически активных веществ, модификаций структур известных соединений с целью увеличения их биологической активности, создания гибридных молекул, а также поиску новых типов механизмов биологической активности гетероциклических соединений. В то же время современные методы молекулярного моделирования позволяют упростить процесс создания лекарственных средств, однако для корректного использования этих методов требуются данные о механизме действия потенциальных лекарственных средств.

Таким образом, целью данной работы является синтез и определение механизма антибактериальной активности ряда 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов по отношению к патогенному штамму микроорганизма *S.aureus* ATCC 6538 методами молекулярного моделирования. Знание механизма биологической активности данных соединений позволит определить дальнейшее направление их функционализации для создания новых эффективных лекарственных средств.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Исследуемые триазолы **1–15** были получены по реакции CuAAC (Рис. 1). Методом измерения диаметра зоны угнетения роста микроорганизма *S.aureus* ATCC 6538 была установлена антимикробная активность данных соединений. Несмотря на то, что данные соединения проявили умеренную, однако несколько меньшую активность, чем широко используемый антимикробный препарат «Цефот», данные соединения могут быть легко модифицированы с помощью реакции CuAAC с целью увеличения их антимикробной активности. Для определения направления модификации исследуемых триазолов было проведено изучение возможного механизма их действия.

Мишенями большинства в настоящее время применяемых антибактериальных препаратов являются белки биосинтеза

пептидогликана – компонента клеточной стенки микроорганизмов [5]. Сопоставление структур типичных ингибиторов белков MurA–F со строением исследуемых 1,4-дизамещенных 1*H*-1,2,3-триазолов **1–15**, в составе которых между двумя липофильными участками находится полярный фрагмент, позволило определить, что наибольшим структурным подобием с триазиолами **1–15** обладают ингибиторы белка MurB. Данный вывод позволяет предположить, что антибактериальное действие исследуемых соединений может быть обусловлено их взаимодействием с белком MurB.

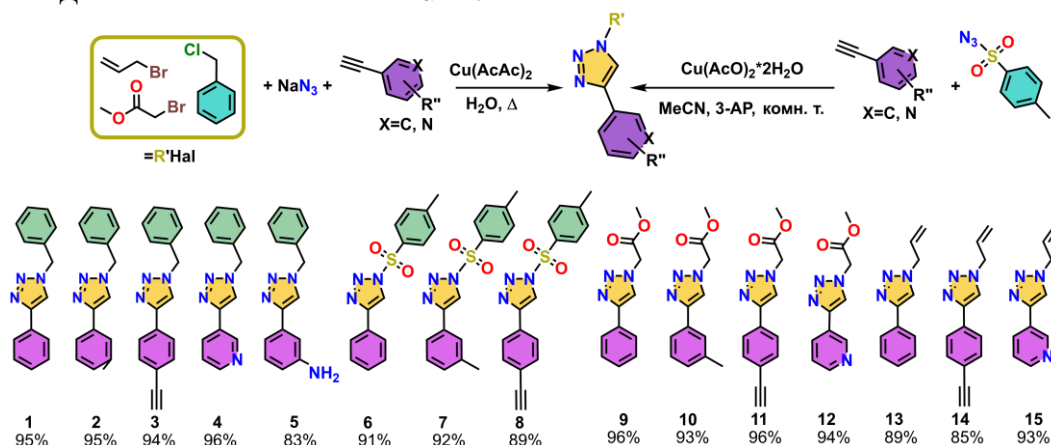


Рис 1. Схема синтеза соединений 1–15

Геометрическая структура белка была сгенерирована посредством сервиса SWISS-MODEL; докинг проводили с использованием программы AutoDock 4.2.6[6]. Анализ полученных в результате теоретического эксперимента конформаций показал, что все соединения связываются с белком одинаковым образом, образуя несколько водородных связей с остатком ARG188, участвующим в связывании субстрата белка MurB (Рис. 2). Энергия связывания белка и соединений **1–15** хорошо коррелируют с антимикробной активностью данных соединений (Рис. 2):

$$A_{S.aureus} = 0,687 \times |\Delta G_B| - 1,51, R^2=0,680$$

где  $A_{S.aureus}$  – удельная активность вещества по отношению к определенному микроорганизму,  $|\Delta G_A|$  – модуль энергии связывания вещества и белка,  $R^2$  – коэффициент линейной аппроксимации.



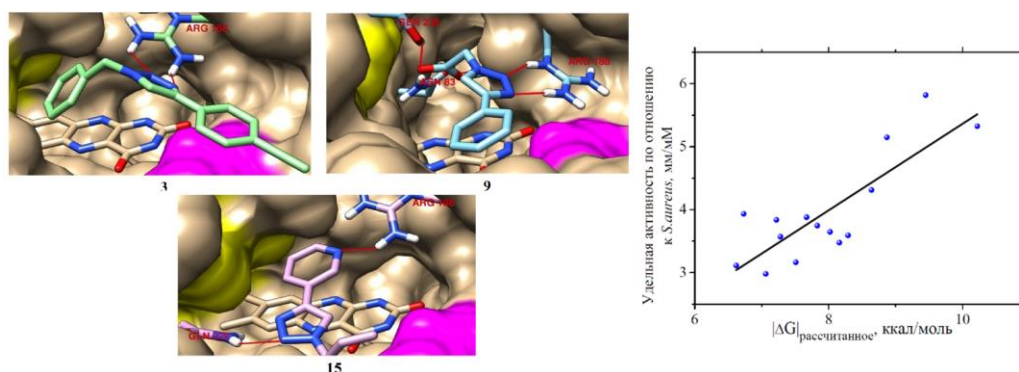


Рис. 2. Конформации соединений 3, 9 и 15 в активном центре белка и график корреляции энергии связывания и удельной активности соединений 1–15

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для ряда синтезированных 1,4-дизамещенных триазолов была охарактеризована умеренная антимикробная активность по отношению к патогенному штамму *S.aureus* ATCC 6538. Методами молекулярного моделирования исследован предполагаемый механизм антибактериального действия данных соединений. В результате анализа структур известных ингибиторов биосинтеза пептидогликана была установлена предполагаемая мишень антимикробного действия соединений 1–15 – белок MurB. Охарактеризованы полученные методом молекулярного докинга структуры лиганд-белковых комплексов. Установлена корреляционная зависимость между антимикробной активностью исследуемых соединений и расчетными значениями энергии их связывания.

## Библиографические ссылки

1. Case, A. Mortality and morbidity in the 21st century / A. Case, A. Deaton // Brookings Pap Econ Act. – 2017. – Vol. 2017 – P. 397-476.
2. Adam, D. The pandemic's true death toll: millions more than official counts / D. Adam // Nature. – 2022. – Vol. 601, № 7893. – P. 312-315.
3. The 1,2,3-triazole ring as a bioisostere in medicinal chemistry / E. Bonandi [et al.] // Drug Discovery Today. – 2017. – Vol. 22, № 10. – P. 1572-1581.
4. Application of triazoles as bioisosteres and linkers in the development of microtubule targeting agents / M.S. Malik [et al.] // RSC Med Chem. – 2020. – Vol. 11 – P. 327-348.
5. Inhibitors of the peptidoglycan biosynthesis enzymes MurA-F / M. Hrast [et al.] // Bioorg Chem. – 2014. – Vol. 55 – P. 2-15.
6. AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility / G.M. Morris [et al.] // Journal of Computational Chemistry. – 2009. – Vol. 30, № 16. – P. 2785-2791.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАТУННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ С НИКЕЛЕВЫМ ПОДСЛОЕМ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ

М. Г. Галуза, В. С. Будник

*Белорусский государственный университет;  
haluzamg@gmail.com, valeria.budnik@mail.ru;  
науч. рук. – Т. Н. Воробьева, д-р хим. наук, проф.*

Подобран состав электролита и условия электрохимического осаждения покрытий из латуни на стальные электроды с подслоем никеля. Определено, что покрытия Cu–Zn толщиной 5–6 мкм содержат 17 ат.% цинка и включают кристаллические фазы Cu, Zn, Ni, Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>. В результате выщелачивания покрытий Cu–Zn в растворах NaOH доля цинка снижается до 5 ат.%, он обнаруживается лишь в составе интерметаллида Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>. Покрытия приобретают развитую структуру за счет образования многочисленных каналов; их коррозионная устойчивость в растворе KOH, используемом для электролиза воды, возрастает, но уступает никелевым покрытиям на стали. Методом катодной поляризации выявлено наличие каталитической активности покрытий, включающих фазы меди и Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub> со следами оксидов меди(I, II), в процессе выделения водорода из водного щелочного раствора.

**Ключевые слова:** покрытия медь, цинк, интерметаллид, выщелачивание, электролиз воды, щелочной раствор.

## ВВЕДЕНИЕ

Для устойчивого развития современного общества требуется увеличение доли альтернативных источников энергии, среди которых важнейшая роль принадлежит водороду. Традиционный метод получения чистого водорода с использованием возобновляемого источника в отсутствие загрязняющих выбросов – электролиз воды, который обычно проводят в щелочной среде [1, 2].

Сталь – наиболее распространенный достаточно дешевый материал электродов для щелочного электролиза воды, однако в отсутствие защитных покрытий стальные электроды подвергаются сильной коррозии [2]. Для увеличения электрокаталитической активности и защиты от окисления электродов на них наносят проводящие покрытия, которые должны удовлетворять ряду требований, таких как высокая удельная поверхность, низкое перенапряжение выделения водорода, повышенная защитная способность и коррозионная устойчивость в щелочном растворе. Для этого чаще всего поверхность стали покрывают никелем или его сплавами с фосфором, оловом, цинком, молибденом [3].

Имеются также отрывочные сведения об использовании медь-обогащенных латунных покрытий, которые могут иметь развитую

пористую поверхность, создаваемую за счет выщелачивания цинка [4]. Кроме того, остаточный цинк может снижать перенапряжение выделения водорода.

Целью данной работы является оценка возможности использования никелированных стальных электродов с электрохимически осажденным покрытием медь–цинк, подвергнутым выщелачиванию, в процессах электролиза воды в щелочных электролитах.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электрохимическое осаждение латуни проводили из щелочного сульфатного раствора состава (г/дм<sup>3</sup>): CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O – 30, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 15, глицерин – 60, NaOH – 150 при комнатной температуре, перемешивании, плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup> в течение 30 мин. В качестве катодов служили пластины никелированной стали, а анодами служили пластины латуни марки Л70. Полученные латунные покрытия выщелачивали, обрабатывая их 1 ч в 1 М растворе NaOH, а затем 3 ч в 7,5 М растворе NaOH при комнатной температуре.

Содержание металлов в покрытиях и их толщину определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФЛА) (спектрометр ElvaxLightSDD). Морфологию поверхности образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1420. Для фазового анализа использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН–3.0. Методом вольтамперометрии изучали коррозию и катодную поляризацию полученных образцов в 0,1 М растворе KOH с помощью потенциостата-гальваностата PGSTAT204 MetrohmAutolab и программы Nova 2.1. Коррозионные кривые регистрировали в пределах потенциалов ± 0,05 В относительно потенциала погружения со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с. Кривые катодной поляризации записывали от 0 до – 1,5 В со скоростью 10 мВ/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом электрохимического осаждения из щелочного сульфатного раствора при плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup> удалось получить покрытия сплавом Cu–Zn толщиной 6 мкм, содержащие ~17 ат. % цинка. Выход металлов по току составляет около 88 %. В состав полученных покрытий входят фазы Cu, Zn, Ni и интерметаллид Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub> (рис. 1, а, кривая 1). Покрытия состоят из плотно упакованных частиц округлой формы с размером от 1,0 до 3,5 мкм. Покрытия имеют трещины шириной до 0,5 мкм, образующие сетку с размером ячейки 2–5 мкм (рис. 1, б).

В процессе выщелачивания масса покрытий уменьшается на 40 %, а остаточное содержание цинка снижается до 5 ат.%. Сопоставление

исходного и остаточного содержания цинка в латуни и убыли массы покрытий свидетельствует о растворении не только цинка, но также частично интерметаллида. При этом наблюдается появление незамкнутых каналов шириной 0,5–1,5 мкм, образующих сетку с размером ячейки 10–20 мкм т. е. покрытия приобретают развитую поверхность. В результате выщелачивания покрытий практически исчезает фаза индивидуального цинка, и появляются следовые количества смешанного оксида меди  $\text{Cu}_4\text{O}_3$  (рис. 1, кривые I и II).

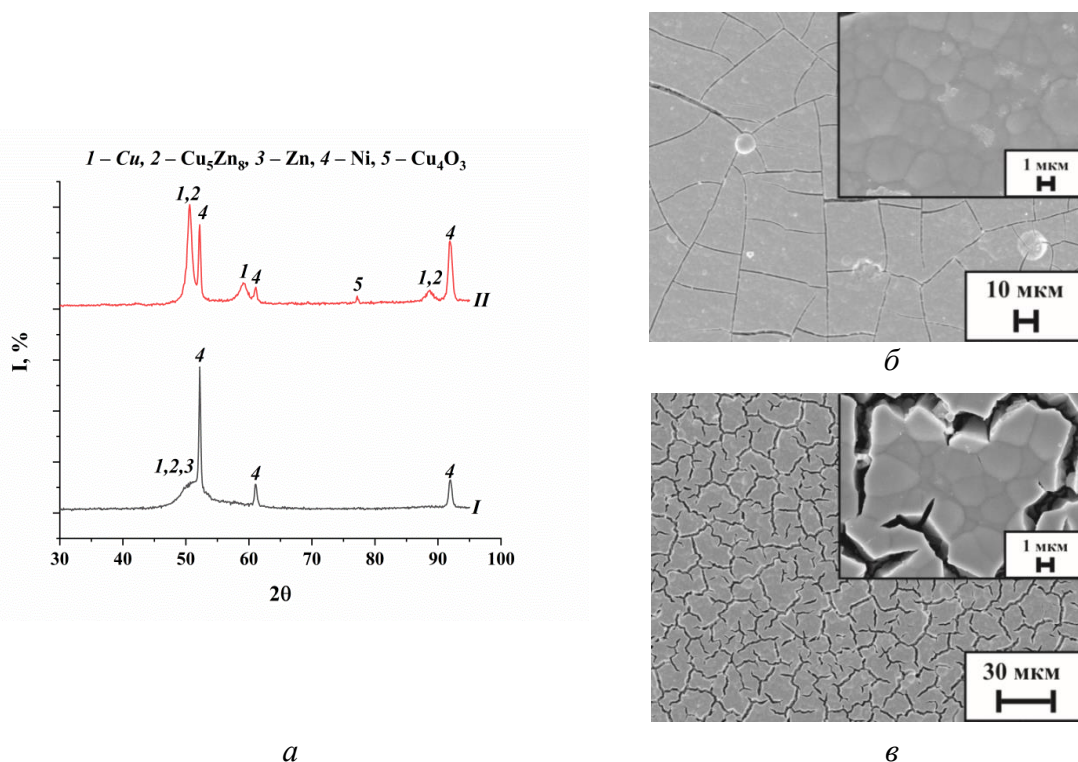


Рис. 1. Рентгенограммы (а) и СЭМ изображения латунных покрытий (б, в) до выщелачивания (а, кривая I и б) или после него (а, кривая II и в)

Коррозионные испытания стальных электродов с покрытиями из никеля (Fe/Ni) и латуни (Fe/Ni+Cu-Zn) до и после выщелачивания методом вольтамперометрии свидетельствуют, что, судя по величине потенциалов коррозии, стойкость к окислению в 0,1 М растворе КОН уменьшается в ряду (рис. 2, а):

$\text{Fe/Ni} > \text{Fe/Ni+Cu-Zn}$  после выщел.  $\geq$  сталь  $>$   $\text{Fe/Ni+Cu-Zn}$  до выщел.

Так, коррозионный потенциал выщелоченной латуни составляет  $-0,31$  В, что на 40 мВ больше потенциала стального электрода.

Изучение катодной поляризации электродов (рис. 2, б) показало, что активность образцов в реакции выделения водорода в 0,1 М растворе КОН при потенциале  $-1,5$  В повышается в ряду:

Сталь  $<$   $\text{Fe/Ni} + \text{Cu-Zn}$  до выщел.  $\leq$   $\text{Fe/Ni} + \text{Cu-Zn}$  после выщел.  $\leq$  Fe/Ni.

Следовательно, при столь отрицательном значении потенциала покрытие из выщелоченной латуни по активности в выделении водорода немного уступает никелевому покрытию (рисунок 2).

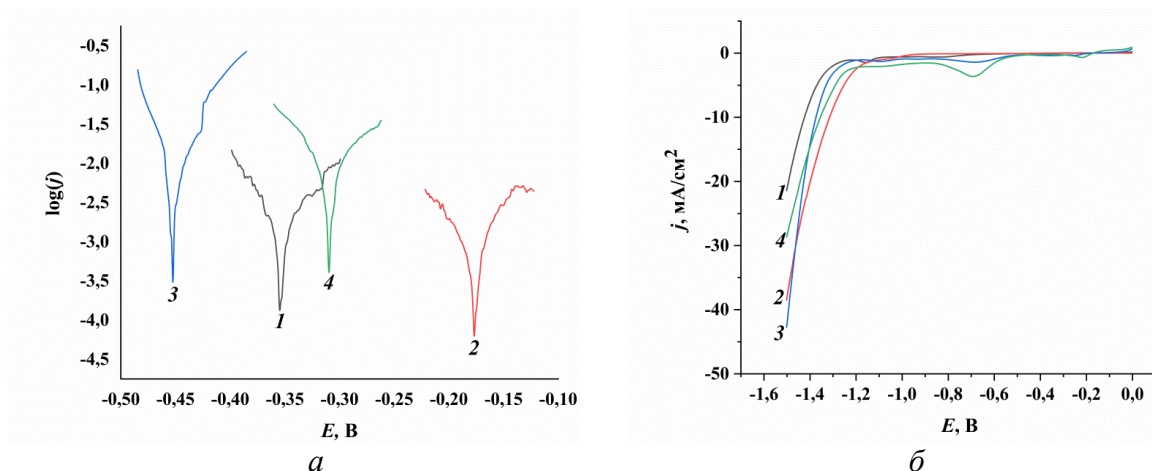


Рис. 2. 1 – сталь, 2 – никелированная сталь,  
3 – никелированная сталь с латунным покрытием до выщелачивания,  
4 – никелированная сталь с латунным покрытием после выщелачивания  
Рис. 2. Коррозионные кривые (а) и кривые катодной поляризации (б) образцов  
в 0,1 М растворе КОН

Интерес представляет область потенциалов  $-(0,6 - 0,8)$  В, в которой именно для латунных покрытий на поляризационных кривых обнаружен пик выделения водорода. После выщелачивания покрытий плотность катодного тока выделения водорода при потенциале  $-0,7$  В возрастает от  $1,4$   $\text{mA}/\text{cm}^2$  до  $3,7$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ , что в сопоставлении с фазовым составом латуни позволяет предположить наличие каталитической активности в процессе выделения водорода у интерметаллида  $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ .

Таким образом, стальные электроды с латунным покрытием, полученным выщелачиванием сплава  $\text{Cu-Zn}$  и содержащие 5 ат.% цинка, входящего в состав интерметаллида  $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ , могут быть использованы в процессах выделения водорода из воды.

#### Библиографические ссылки

1. Navarro, R.M. Introduction to hydrogen production /R.M. Navarro, R. Guil, J.L.G. Fierro // Compendium of Hydrogen Energy. – 2015. – P. 21–61.
2. Aliyev, A. Sh. Electrocatalysts for water electrolysis / A.Sh. Aliyev [et al.] // Chemical Problems. – 2018. –№ 3 (16). – P. 283–306.
3. Kuleshov, V.N. Development and characterization of new nickel coatings for application in alkaline water electrolysis / V.N. Kuleshov [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy.– 2016. –Vol. 41, –№1. – P. 36–45.
4. Telli, E. Copper-Zinc and Copper-Iron Binary Electrode for Hydrogen Evolution Reaction / E.Telli // Sakarya University Journal of Science. – 2018. – Vol. 22. – № 3. – P. 945–951.

# ВЛИЯНИЕ Н-D ЭФФЕКТА НА РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ В ДЕАЭРИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРИ PH 7

**А. И. Давыденко, О. В. Урбанович, Е. С. Мельничук,  
А. Д. Шишпор, В. А. Карпович, Е. С. Карасевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
asyact251@gmail.com, olga.urbanovich@gmail.com,  
melnichuk.lisa@gmail.com, annshyshpar2@gmail.com,  
karpovich\_2002@list.ru, lizagram.2003@mail.ru;  
науч. рук. – Свердлов Р.Л.: БГУ, к. хим. наук., доц.*

Для недеитерированного этиленгликоля показано образование ацетальдегида с короткоцепными выходами (концентрация диола 1 моль/л). При замещении Н на D в молекуле этиленгликоля для раствора 1,1-дидейтероэтандиола-1,2 наблюдалось уменьшение радиационно-химического выхода ацетальдегида примерно в 5,7 раз, а для раствора тетрадейтероэтандиола-1,2 – примерно в 8,0 раз. Таким образом, показано, что дейтерирование приводит к ингибированию короткоцепного процесса дегидратации этиленгликоля

**Ключевые слова:** радиолиз, радиопротекторы, свободнорадикальная фрагментация, дейтерообмен, этиленгликоль.

## ВВЕДЕНИЕ

Воздействие ионизирующего излучения (ИИ) на живые организмы инициирует свободнорадикальные процессы, которые, так или иначе, затрагивают важнейшие компоненты любых биологических систем. Доказано, что воздействие ИИ может приводить к гиперпродукции активных форм кислорода и азота, что способствует развитию окислительного стресса и повреждению клеток и тканей организма [1]. Одним из новых направлений в сфере производства радиопротекторных препаратов, повышающих устойчивость организма к свободнорадикальным превращениям, является создание биомолекул, “укреплённых” тяжёлыми изотопами  $^{13}\text{C}$  и  $^2\text{D}$ . Например, введение дейтерия в полиненасыщенные жирные кислоты позволяет ингибировать цепной процесс перекисного окисления липидов. Причём, установлено, что для достижения этого эффекта нет необходимости полностью замещать дейтерированными производными все остатки ненасыщенных жирных кислот в организме [2, 3].

Настоящая работа посвящена изучению возможности использования Н-D дейтерообмена для получения устойчивых по отношению к

индуцируемым ИИ свободнорадикальным реакциям фрагментации и деструкции гидроксилсодержащих участков биомолекул.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предметом исследования в настоящей работе являлись радиационно-инициируемые превращения этиленгликоля (ЭГ), 1,1-дидейтероэтандиола-1,2 (ЭГ-D2), тетрадейтероэтандиола-1,2 (ЭГ-D4) (рис. 1) в водных деаэрированных растворах. Для проведения исследования использовали этиленгликоль марки х.ч., предварительно очищенный методом перегонки под вакуумом, а его дейтерированные производные были синтезированы и очищены (чистота не менее 90%) в Лаборатории химии биоконъюгатов (ИФОХ НАН Беларуси).

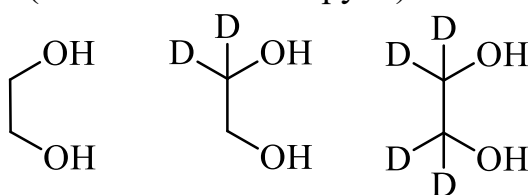


Рис. 1. Структурные формулы использованных соединений

Для приготовления водных растворов исследуемых соединений и используемых реактивов применялась деионизованная вода (Heal Force Smart Mini Water purification system, Shanghai, China) (электропроводность воды 0,055 мкСм/см). Для приготовления растворов стандартов использовали водный раствор формальдегида  $\omega=37\%$  (содержащий 10-15% метанола в качестве стабилизатора), гликолевый альдегид в виде димера чистотой не менее 98%, высокочистый (не менее 99,5%) ацетальдегид (Sigma-Aldrich). Для приготовления буферного раствора (50 мМ фосфатный буфер) использовали  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  99,0% чистоты (Sigma Life Sciences) и  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  99,0% чистоты (Sigma-Aldrich). Для дериватизации образцов для ВЭЖХ-анализа использовали 2,4-динитрофенилгидразин (ДНФГ) (Sigma-Aldrich), который предварительно подвергали перекристаллизации из ацетонитрила [4]. Растворы исследуемых веществ помещали в ампулы, и после продувки аргоном в течение часа ампулы запаивали.

Приготовленные растворы облучали на установке “Исследователь” ( $\gamma$ -излучение изотопа  $^{60}\text{Co}$ ). Мощность поглощенной дозы  $\gamma$ -установки составляла  $0,065 \pm 0,005$  Гр/с, интервал поглощенных доз – 117–702 Гр.

Для анализа карбонильных продуктов радиационно-химических превращений использовали дериватирующий раствор ДНФГ (0,0072 г ДНФГ, 1,55 мл 36%  $\text{HCl}$ , до 25 мл разбавляли метанолом).

Качественный и количественный анализ образующихся в результате радиационно-химических превращений продуктов проводили методом

жидкостной хроматографии на хроматографе «Shimadzu VP series LC» (Япония) с использованием детектора SPD-10A VP UV–Vis при длине волны 366 нм. Условия хроматографирования: колонка LiChrospher 100 RP-18e column (длина – 250 мм, внутренний диаметр – 4,6 мм, размер зёрен – 5 мкм); элюент – метанол/вода (60/40 об./об. для анализа ЭГ и 65/35 об./об. для анализа его дейтерированных производных); скорость подачи элюента 1 мл/мин; анализ проводили при комнатной температуре (около 24°C); объём вводимой пробы – 5 мкл. Ввод пробы осуществлялся вручную в инжектор с использованием шприца Hamilton (Hamilton Company, объём шприца 25 мкл).

Радиационно-химические (G, молекула/100эВ) выходы образования продуктов реакций рассчитывали на линейных участках зависимости концентраций веществ от поглощенной дозы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свободнорадикальные превращения веществ в разбавленных водных растворах при  $\gamma$ -облучении инициируются продуктами радиолиза воды, наиболее реакционноспособными из которых являются ОН-радикалы. В ходе работы было установлено •ОН-индуцированное накопление таких конечных продуктов превращений этиленгликоля, 1,1-дидейтероэтандиола-1,2 и тетрадейтероэтандиола-1,2, как ацетальдегид, формальдегид и гликолевый альдегид. В таблице приведены полученные в ходе эксперимента радиационно-химические выходы продуктов превращения исходных молекул.

### Радиационно-химические выходы продуктов радиолиза ЭГ, ЭГ-D2 и ЭГ-D4 в деаэрированных водных растворах при pH 7

Продукт радиолиза	G, мол-ла/100 эВ		
	ЭГ	ЭГ-D2	ЭГ-D4
Ацетальдегид	7,86±0,40	1,37±0,28	0,98±0,43
Формальдегид	0,48±0,06	0,72±0,16	0,73±0,13
Гликолевый альдегид	0,23±0,04	0,34±0,08	0,24±0,05

При радиолизе ЭГ [5] первоначально образуется углерод-центрированный радикал (I), дегидратация которого приводит к образованию ацетальдегида, а диспропорционирование – к образованию гликолевого альдегида (рис. 2).



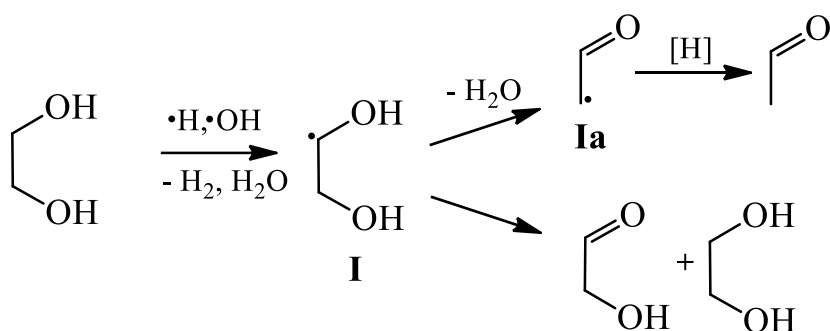


Рис. 2. Механизм образования продуктов окисления и дегидратации этиленгликоля

При замещении атома водорода на дейтерий у атомов углеродного скелета этиленгликоля радикал **I** образуется путём расщепления связи C—D, которая имеет бóльшую энергию, чем связь C—H. Кроме того, радикал **Ia**, образующийся после дегидратации радикала **I**, может отрывать атом водорода от исходной молекулы этиленгликоля, чем объясняется высокий короткоцепной выход ацетальдегида. На этой стадии проявляется селективность отрыва атома водорода от дейтерированного и не дейтерированного атома углерода: величина радиационно-химического выхода ацетальдегида, рассчитанная для эксперимента с недейтерированным этиленгликолем, указывает на короткоцепной механизм его образования, так как его выход приблизительно в 2,4 раза превосходит суммарный радиационно-химический выход OH- и H-радикалов (суммарно ~3,25 частиц/100эВ [5]), которые являются инициаторами свободнорадикальных реакций органических молекул в условиях эксперимента. Уменьшение G ацетальдегида до значений существенно меньших, чем 3,25 частиц/100эВ, свидетельствует об ингибировании радиационно-индуцируемого свободнорадикального процесса его образования при замещении как двух атомов водорода на дейтерий у одного атома C, так и при полном дейтерировании углеродного скелета этиленгликоля. В результате, для раствора 1,1-дидейтероэтандиола-1,2 наблюдается уменьшение радиационно-химического выхода ацетальдегида по сравнению с ЭГ примерно в 5,7 раз, а для раствора тетрадейтероэтандиола-1,2 – примерно в 8,0 раз.

Формальдегид образуется [5] путём деструкции кислородцентрированных радикалов **II** (рис. 3). Накопление продуктов деструкции происходит медленнее, чем продуктов дегидратации. Это связано с меньшей вероятностью образования неустойчивых кислородцентрированных радикалов при взаимодействии исходных молекул с OH-радикалами и возможности их межмолекулярной трансформации в углеродцентрированные радикалы **I** до реализации деструкции.

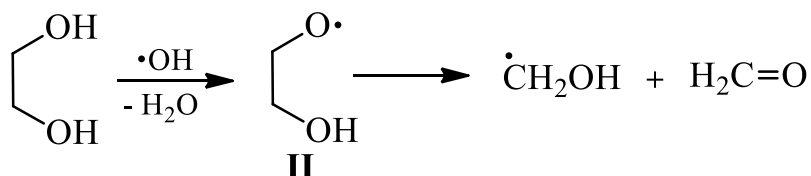


Рис. 3. Механизм образования продуктов деструкции этиленгликоля

Таким образом, введение в углеродный скелет молекулы этиленгликоля атомов дейтерия приводит к заметному ингибированию свободнорадикальных реакций фрагментации 1,1-дидейтероэтандиола-1,2 и в ещё большей степени тетрадейтероэтандиола-1,2 по сравнению с их противевым аналогом.

#### Библиографические ссылки

1. Филимонов, М. М. Радиобиология/ М. М. Филимонов, Д. А. Новиков. – Минск: БГУ, 2014.
2. Пат. 9616042 США. Isotopically modified compounds and their use as food supplements/ *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2017.
3. Пат. 2701695 США. Neurodegenerative disorders and muscles diseases implicating PUFAs / *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2019.
4. *Armarego, W.L.F.* Purification of Laboratory Chemicals (Sixth Edition) / *W.L.F. Armarego, C. Chai*. – U.S.A.: Butterworth-Heinemann, 2009.
5. *Петряев, Е. П.* Радиационная химия бифункциональных органических соединений/ *Е. П. Петряев, О. И. Шадыро*. – Минск: Университетское, 1986.

# ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ АМИЛАЗЫ

**Е. А. Копыш**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*liza\_kopusch@mail.ru;*

*науч. рук. – Е. Г. Петрова, ст. преп.*

В данной работе были получены магнитные наночастицы (МНЧ) составов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{O}_4$  методом соосаждения. Также все 3 вида МНЧ были покрыты полиэтиленгликолем (ПЭГ) для стабилизации амилазы, т.к. многие ферменты при адсорбции на наноматериалах, имеющих в своем составе ПЭГ, не просто не теряют активности, а становятся более стабильными по сравнению с не иммобилизованными.

Далее в рамках приведенного исследования были получены значения констант скоростей процесса инактивации амилазы при различных температурах ( $70^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$ ,  $77^\circ\text{C}$  и  $80^\circ\text{C}$ ) в присутствии и в отсутствии функционализированных наночастиц. Затем, исходя из полученных данных, были рассчитаны значения энергий активации процесса термоинактивации амилазы и амилазы в комплексе с наночастицами (НЧ) различного состава ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@P\text{EG}$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4@P\text{EG}$ ,  $\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{O}_4@P\text{EG}$ ).

**Ключевые слова:** амилаза; магнитные наночастицы; термостабильность; термопротекторное действие.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы одной из наиболее перспективных и динамично развивающихся областей знаний стали нанотехнологии. Развитие нанотехнологий обеспечивается междисциплинарным характером исследований, широким взаимопроникновением идей и разработок из различных областей знаний. Применение наноматериалов в промышленности, медицине и фармакологии является приоритетным направлением, позволяющим решать самые актуальные проблемы в данных областях.

Магнитные наночастицы представляют значительный интерес для науки, промышленности и медицины, что связано с возможностью дистанционного управления ими при наложении внешнего магнитного поля. В настоящее время наиболее широко в биомедицине применяются частицы наноразмерного магнетита. Это обусловлено их низкой токсичностью для организма в сравнении с другими НЧ, стабильностью магнитных характеристик, а также большим разнообразием способов получения [1]. При использовании МНЧ также важны относительно

высокие значения удельной намагниченности, которую можно повышать не только варьируя размеры и структуру частиц, но и изменяя состав - например, замещая часть ионов железа другими металлами. Поэтому в данной работе сравниваются между собой классический магнетит, магнетит, допированный цинком и феррит кобальта.

Амилаза – один из основных ферментов, используемых в промышленности. Она имеет потенциальное применение во многих промышленных процессах, таких как пищевая, ферментационная и фармацевтическая промышленность.

В рамках настоящего исследования были определены константы скоростей и энергии активации для процесса термоинактивации амилазы и амилазы в комплексе с магнитными наночастицами различного состава ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@PЭИ$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4@PЭИ$ ,  $\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{O}_4@PЭИ$ ) при разных температурах (70°C, 75°C, 77°C, 80°C). Следует также отметить, что в литературе не имеется достаточного количества сведений о влиянии магнитных наночастиц на термостабильность амилазы, что актуализирует ее определение.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе МНЧ были получены методом соосаждения. Суть метода заключается в совместном осаждении компонентов продукта из раствора в виде нерастворимых солей, оксидов или гидроксидов. К преимуществам метода соосаждения можно отнести простую методику синтеза, высокую воспроизводимость, недорогое оборудование и реактивы, а также возможность варьирования размера и формы получаемых МНЧ за счет изменения скорости перемешивания, наличия или отсутствия магнитного поля, растворителя. Также все 3 вида МНЧ для стабилизации фермента были покрыты ПЭИ.

Для изучения взаимодействия амилазы из *B.flexus* с наночастицами, покрытыми полиэтиленгликолем, исходный препарат фермента в культуральной жидкости разводили в 500 или 1000 раз в 5 моль/л фосфатном буфере соответствующего значения pH. НЧ, покрытые полиэтиленгликолем, в концентрации 32 мкг/мл инкубировали с амилазой в течение 40 мин при комнатной температуре. После чего НЧ со связавшимся ферментом осаждали при 13000 g 20 мин. В супернатанте определяли активность не связавшегося с НЧ фермента. Осадок обрабатывали 0,1 моль/л NaФБ. Происходила диссоциация комплекса НЧ-амилаза на НЧ + амилаза, компоненты которого разделяли центрифугированием. По активности освобожденной амилазы

оценивали эффективность её связывания с наноразмерным ионообменником – НЧ  $Zn_{0,3}Fe_{2,7}O_4@ПЭИ$ ,  $CoFe_2O_4@ПЭИ$  и  $Fe_3O_4@ПЭИ$ .

Изучение влияния прогрева на активность нативной амилазы проводили по [2,3] при температурах 70°C, 75°C, 77°C и 80 °C. Амилазу инкубировали 40 мин при комнатной температуре с НЧ в концентрации 32 мкг/мл. Затем образцы помещали в термостат, держали при заданной температуре, отбирали через 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 мин и помещали в ледяную баню. Затем в этих пробах определяли активность амилазы. По полученным данным строили графики зависимости относительной активности фермента ( $A_i/A_0$ ) x 100 % от времени (t), где  $A_0$  является начальной, а  $A_i$  - текущей активностью фермента. Контролем служила активность фермента до начала термообработки. Далее строили графики зависимости  $\ln A_{отн}$  от времени.  $A_{отн}$  - относительная активности фермента ( $A_i/A_0$ ) x 100 %. По графикам определяли константы скоростей для каждой стадии.  $k_1$  - константа скорости 1 стадии реакции инактивации,  $k_2$  - константа скорости 2 стадии реакции инактивации.

## РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Результаты представлены как средняя арифметическая ( $\bar{X}$ ) ± стандартная ошибка средней ( $S_x$ ) не менее, чем в трёх независимых измерениях. Обработку и представление результатов осуществляли с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel 2016.

Энергии активации амилазы, а также амилазы в комплексе с наночастицами различного состава, были рассчитаны по уравнению:

$$E_a = -R \cdot \tan \alpha,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/К·моль;  $\tan \alpha$  – тангенс угла наклона аррениусовской зависимости.

Ошибка аппроксимации для различных образцов на разных стадиях процесса составила от 0,4% до 12,9%, что свидетельствует о хорошо подобранной модели уравнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы сравнить термопротекторное действие магнитных наночастиц различного состава на амилазу, были рассчитаны константы скоростей процесса инактивации амилазы при различных температурах в составе

комплексов с данными наночастицами. Затем, исходя из этих данных, были рассчитаны энергии активации процесса термоинактивации.

На рисунке 1 представлен пример зависимости термоинактивации от температуры и продолжительности воздействия (в данном случае – для амилазы).

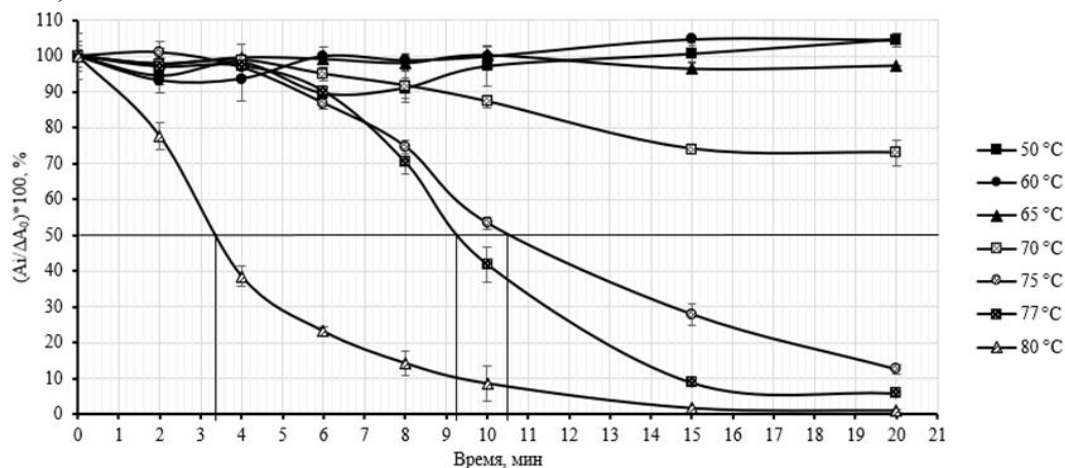


Рис. 1. Зависимость термоинактивации  $\alpha$ -амилазы *Bacillus flexus* от температуры и продолжительности воздействия

Для возможности дальнейших расчетов исходя из зависимостей данного вида были построены зависимости в логарифмических координатах (относительная активность фермента – время). Пример такой зависимости для амилазы приведен на рисунке 2.

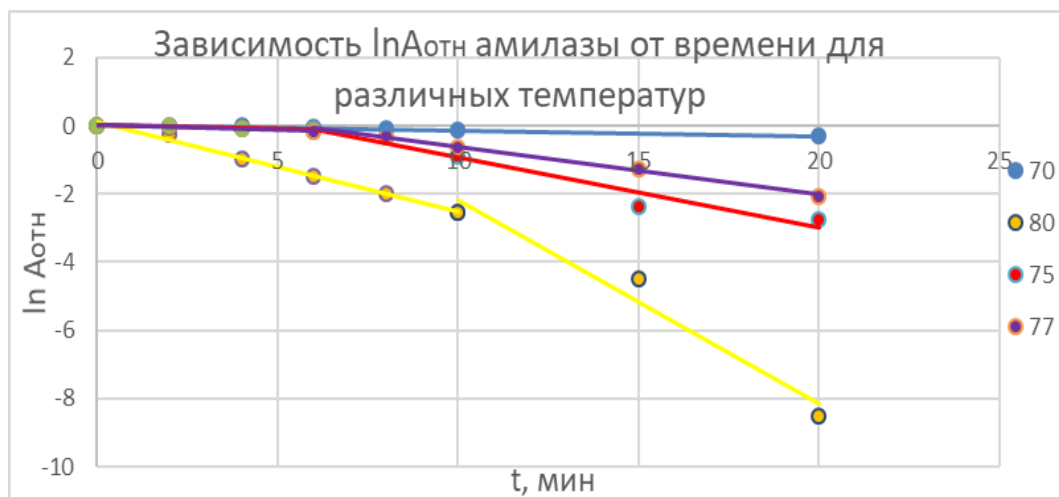


Рис. 2. Зависимость логарифма относительной активности амилазы от времени для различных температур

Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Графики, исходя из которых были рассчитаны константы скорости процесса инактивации, являются линейными, что свидетельствует о протекании процесса термоинактивации амилазы по псевдопервому порядку. На большинстве логарифмических кривых отмечается излом

между двумя линейными участками, соответствующий переходу между двумя стадиями процесса. Подобные зависимости являются типичными для механизма инактивации фермента, протекающей через ряд последовательных превращений первого порядка с активной промежуточной формой [4].

Таблица 1

Результаты расчета констант скоростей процесса инактивации по стадиям для чистой амилазы и амилазы в комплексе с наночастицами различного состава

t, °C	Константы скорости по стадиям	Амилаза	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ	Zn <sub>0,3</sub> Fe <sub>2,7</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ
70°C	k <sub>1</sub> ·10 <sup>3</sup> , мин <sup>-1</sup>	2,30±0,10	3,70±0,12	3,80±0,02	3,60±0,19
	k <sub>2</sub> ·10 <sup>2</sup> , мин <sup>-1</sup>	1,89±0,09	2,36±0,31	2,04±0,17	2,01±0,09
75°C	k <sub>1</sub> ·10 <sup>2</sup> , мин <sup>-1</sup>	1,79±0,08	1,82±0,06	2,14±0,01	0,99±0,05
	k <sub>2</sub> ·10, мин <sup>-1</sup>	2,06±0,09	2,09±0,27	1,16±0,09	1,30±0,06
77°C	k <sub>1</sub> ·10 <sup>2</sup> , мин <sup>-1</sup>	2,51±0,11	5,00±0,17	3,92±0,02	0,62±0,03
	k <sub>2</sub> ·10, мин <sup>-1</sup>	1,38±0,06	9,98±1,29	1,18±0,10	1,95±0,09
80°C	k <sub>1</sub> ·10, мин <sup>-1</sup>	2,63±0,12	2,21±0,07	1,97±0,01	2,44±0,13
	k <sub>2</sub> ·10, мин <sup>-1</sup>	5,98±0,27	-	-	-

Таблица 2

Энергии активации для процесса термоинактивации амилазы и комплексов амилазы с наночастицами различного состава по стадиям

Энергии активации по стадиям, кДж/моль	Амилаза	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ	Zn <sub>0,3</sub> Fe <sub>2,7</sub> O <sub>4</sub> @ПЭИ
E <sub>1</sub>	331,90±14,94	360,73±11,88	335,06±1,34	101,85±5,39
E <sub>2</sub>	296,31±69,63	350,00±45,50	268,86±22,85	333,25±15,66

Следует отметить, что при 70°C константы скорости k<sub>1</sub> у всех частиц одинаковые и не зависят от состава, значения k<sub>2</sub> – тоже очень близки. При 75°C начинается снижение констант (у Zn-замещенного магнетита – обеих, у феррита кобальта – только k<sub>2</sub>) по сравнению с амилазой. При 80°C константы скоростей для всех НЧ меньше, чем у чистой амилазы.

Увеличение энергии активации говорит о том, что процесс инактивации с ростом температуры замедляется в присутствии исследуемых частиц.

### Библиографические ссылки

1. Berry, C. Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine // *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2003, Vol. 36, № 13, p. 198–206.
2. Салем А.Э. Влияние наночастиц  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на термостабильность аспаргат-аминотрансферазы // *Труды БГУ*, 2014, Т. 9, ч.1, с. 122–128.
3. Ahern T. J. Control of oligomeric enzyme thermostability by protein engineering // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1987, Vol. 84, p. 675-679.
4. Santos, A. Kinetic Modeling of Lactose Hydrolysis by a  $\beta$ -Galactosidase from *Kluyveromices Fragilis* // *Enzyme and Microbial Technology*, 1998, Vol. 22, №7, p.558–567.



# ВЛИЯНИЕ N-АЦЕТИЛЦИСТЕИНА НА $\text{Cu}^{2+}$ -ОПОСРЕДОВАННОЕ ДЕФОСФОРИЛИРОВАНИЕ ГЛИЦЕРОФОСФАТА

Е. М. Овсянникова

Белорусский государственный университет, Минск;

oekaterinab666@gmail.com;

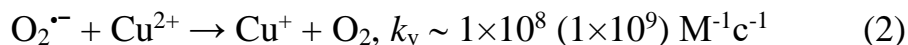
науч. рук. – И. Л. Юркова, д-р хим. наук, проф.

Изучено влияние N-ацетилцистеина (АЦЦ) на  $\text{Cu}^{2+}$ -опосредованную фрагментацию глицеро-2-фосфата с разрывом фосфоэфирной связи без добавок и в присутствии аскорбиновой кислоты. Установлено, что АЦЦ без добавок активирует процесс, в присутствии аскорбата обнаруживает антиоксидантный эффект.

**Ключевые слова:** N-ацетилцистеин, глицерофосфат, ион  $\text{Cu}^{2+}$ , гидроксильный радикал, свободнорадикальная фрагментация.

## ВВЕДЕНИЕ

В биосистемах ионы меди могут катализировать образование гидроксильных радикалов в соответствии с реакциями [1]:



Фосфоэфиры глицерина (глицеро-1-фосфат, глицеро-2-фосфат) содержат в себе фрагменты структуры глицерофосфолипидов и могут являться их модельными соединениями. Радикалы  $\text{HO}^\bullet$  инициируют свободнорадикальную деструкцию глицерофосфатов с разрывом фосфоэфирной связи в их молекулах, которая протекает преимущественно за счет реакции фрагментации первичных радикалов  $\text{H}_2\text{C}(\text{OH})-\text{C}^\bullet(\text{OH})-\text{H}_2\text{C}-\text{OR}(\text{O})\text{O}_2\text{H}^-$  и  $\text{H}_2\text{C}(\text{OH})-\text{HC}(\text{OR}(\text{O})\text{O}_2\text{H}^-)-\text{C}^\bullet\text{H}(\text{OH})$  { $\text{HC}^\bullet(\text{OH})-\text{HC}(\text{OR}(\text{O})\text{O}_2\text{H}_2^-)-\text{CH}_2(\text{OH})$ } [2] (рисунок 1):

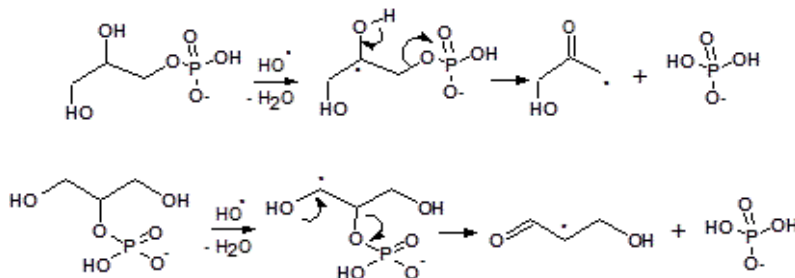


Рис. 1.

Свободнорадикальное дефосфорилирование глицеро-1-фосфата и глицеро-2-фосфата протекает с высокой скоростью ( $k_v > 10^6 \text{ c}^{-1}$ ) [2] и моделирует процесс деструкции глицерофосфолипидов с разрывом фосфоэфирной связи в полярной части биомембран через стадию образования радикалов  $\text{H}_2\text{C}(\text{OR}_1)\text{-C}^*(\text{OH})\text{-H}_2\text{C-OP}(\text{O})\text{O}_2\text{R}_2$  [1].

N-ацетилцистеин (АЦЦ) – широко известное лекарство, обладающее муколитическим действием, его также используют в качестве химиопрофилактического средства против рака [3]. Широко изучается действие АЦЦ на пероксидное окисление глицерофосфолипидов, протекающее в их гидрофобном фрагменте. Роль АЦЦ в регулировании гомолитической деструкции, которая может протекать в их полярной части [1], не изучена. Эффект АЦЦ на свободнорадикальные процессы биомолекул не однозначен, он может быть как анти-, так и прооксидантным [3].

Целью данной работы было изучение влияния N-ацетилцистеина на  $\text{Cu}^{2+}$ -опосредованную фрагментацию глицеро-2-фосфата с разрывом фосфоэфирной связи без добавок и в присутствии аскорбиновой кислоты.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали N-ацетил-L-цистеин, глицеро-2-фосфат (ГФ) от фирмы «Sigma-Aldrich» (Deisenhofen, Германия), аскорбиновая кислота (Аск), гидропероксид, соли  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  были получены от ЗАО «Вектон» (Россия). Водные растворы готовили на деионизированной воде. Химическое инициирование свободнорадикальных процессов осуществляли с помощью редокс-системы  $\text{Cu}^{2+}\text{-H}_2\text{O}_2$ , генерирующей радикалы  $\text{HO}^\cdot$ . К растворам ГФ добавляли  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$ , конечная концентрация которых указана в подписи к рисунку. Тестируемые вещества вводили в раствор субстрата до добавления компонентов редокс-систем. Образцы тщательно перемешивали после добавления каждого реагента и далее термостатировали при температуре  $37^\circ\text{C}$ . Свободнорадикальную фрагментацию ГФ оценивали по образованию молекулярного продукта – неорганического фосфата. Фосфат-анион в растворах ГФ (рН 7,0) определяли фотоколориметрически по модифицированной методике, изложенной в [4]. В основе анализа использована цветная реакция фосфат-аниона с молибдатом аммония. Процедура анализа была следующая: к 0,2 мл исследуемой пробы добавляли 1 мл воды, 1 мл раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  (1,8 % раствор в 2 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и 0,2 мл раствора  $\text{FeSO}_4$  (10 % раствор в 0,15 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Полученный раствор фотометрировали относительно холостой пробы при длине волны,

равной 720 нм. Концентрацию фосфат-аниона, как продукта свободнорадикальных превращений ГФ, рассчитывали по калибровочной кривой. Для обработки полученных экспериментальных результатов применяли методы математической статистики, включая встроенные в компьютер статистические функции программы «Origin». Достоверность полученных результатов контролировали с помощью t-теста Стьюдента. В каждой экспериментальной серии проводили 3-5 параллельных опытов. На рисунках каждый результат представлен как среднее значение  $\pm$  SD, статистически отличное в сравнении с контролем ( $P < 0,05$ ).

При исследовании влияния АЦЦ в диапазоне концентраций 0,25-10,0 мМ на дефосфорилирование ГФ в условиях  $\text{Cu}^{2+}$ -опосредованного генерирования радикалов  $\text{HO}^\bullet$  выявлено, что аминокислота не обладает протекторной активностью в регулировании процесса (рис. 2-а). Повышение количества АЦЦ в системе сопровождается активацией фрагментации ГФ.

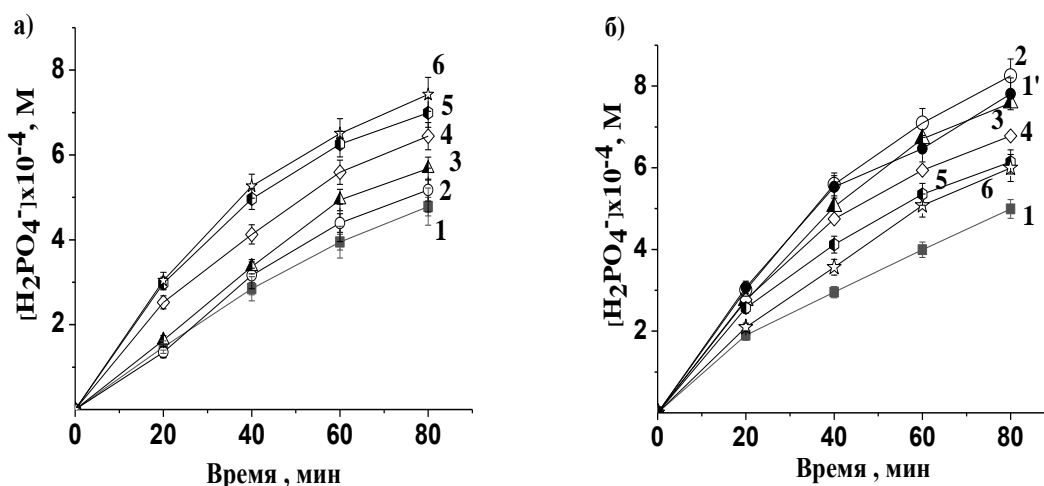


Рис. 2. Накопление  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  в 50 мМ растворе ГФ, инкубированном при 37 °С с  $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  (0,25/15,0 мМ), содержащем АЦЦ без добавок (а) и в присутствии 0,5 мМ аскорбата (б): 1 – 0; 1' – 0 + Аск; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 5,0; 6 – 10,0 мМ

Известно, что АЦЦ обладает высокой реакционной способностью по отношению к радикалам  $\text{HO}^\bullet$  ( $k_{\text{vHO}^\bullet} = 1,36 \times 10^{10} \text{ M}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ). Можно было бы ожидать, что АЦЦ будет акцептировать  $\text{HO}^\bullet$  и тем самым препятствовать их атаке на молекулы ГФ. Однако в условиях нашего эксперимента АЦЦ служит промуотором фрагментации ГФ. Такой прооксидантный эффект АЦЦ можно объяснить его взаимодействием с ионами меди. АЦЦ вероятно координирует ионы  $\text{Cu}^{2+}$  (к. ч 4 или 6) таким образом, что это способствует их восстановлению до  $\text{Cu}^+$  (к. ч 2 или 4) в реакциях (1, 2). Это в свою очередь будет содействовать протеканию реакции (3) и повышению уровня  $\text{HO}^\bullet$ .

АЦЦ в качестве химиопрофилактического средства часто применяют в комбинации с аскорбиновой кислотой [5]. Поэтому в работе также исследовали действие АЦЦ в присутствии Аск. Предварительно изучали эффект Аск на  $\text{Cu}^{2+}$ -опосредованную фрагментацию ГФ без добавок АЦЦ. Аск интенсифицировала процесс (рис. 2-б, линии 1 и 1'), что можно объяснить ее способностью усиливать потенциал редокс-системы  $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  генерировать  $\text{HO}^\bullet$  вследствие восстановления  $\text{Cu}^{2+}$  до  $\text{Cu}^+$ . В присутствии Аск влияние АЦЦ на фрагментацию ГФ отличалось от его эффекта без добавок (рис. 1-а). АЦЦ в смеси с Аск оказывал антиоксидантное действие, которое усиливалось с ростом его концентрации в системе. В присутствии Аск вероятно доля АЦЦ, участвующая в восстановлении  $\text{Cu}^{2+}$  снижается и в большей степени проявляются его  $\text{HO}^\bullet$ -акцепторные свойства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях  $\text{Cu}^{2+}$ -опосредованного генерирования радикалов  $\text{HO}^\bullet$  влияние АЦЦ на гомолитическое дефосфорилирование глицерофосфата было прооксидантным. В присутствии аскорбата эффект АЦЦ претерпевал инверсию, он ингибировал процесс в концентрационно-зависимой манере.

Полученные результаты важны для понимания молекулярных механизмов действия N-ацетилцистеина в регулировании свободнорадикальных процессов в клетке.

### Библиографический список

1. Юркова И.Л. Свободнорадикальные реакции глицеро- и сфинголипидов / И.Л. Юркова // Успехи химии. – 2012. – Т. 81, № 2. – С. 175–190.
2. Schuchmann M.N. Reaction of Hydroxyl Radicals with Alkyl Phosphates and the Oxidation of Phosphatoalkyl Radicals by Nitro Compounds / M.N. Schuchmann, M.L. Scholes, H. Zegota, C. von Sonntag // Int. J. Radiat. Biol. – 1995. – Vol. 68, № 2. – P. 121–131.
3. Oikawa S. N-acetylcysteine, a cancer chemopreventive agent, causes oxidative damage to cellular and isolated DNA / S. Oikawa, K. Yamada, N. Yamashita, S. Tada-Oikawa, S. Kawanishi // Carcinogenesis. – 1999. – Vol. 20. – P.1485–1490.
4. Gin F. J., Morales F. Application of one-step procedure of measurement of inorganic phosphate in the presence of proteins actomyosin ATPase System // Anal. Biochem. – 1977. – Vol. 77, № 1. – P. 10–18.
5. D'Agostini F. Interactions between N-acetylcysteine and ascorbic acid in modulating mutagenesis and carcinogenesis / F. D'Agostini, R.M. Balansky, A. Samoirano, S. de Flora // Int. J. Cancer. – 2000. – Vol. 88. – P. 702–707.
6. Благодарность: работа поддержана ГПНИ Республики Беларусь «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганическая химия» (проект 2.2.03.04), Министерством образования РБ (грант 772/46).

# СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ NO-АКЦЕПТОРНОЙ АКТИВНОСТИ АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТЫ

**Е. В. Терешко**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*lena\_ter01@mail.ru;*

*науч. рук. – И. Л. Юркова, д-р хим. наук, проф.*

Оценена NO-акцепторная активность аскорбиновой кислоты *in vitro* методом конкурентных реакций. Методика основана на определении устойчивого метаболита NO<sup>•</sup> - нитрит-аниона. Разработаны оптимальные условия для спектрофотометрического определения низких концентраций нитрит-ионов в тест-системах с помощью модифицированного реактива Грисса.

**Ключевые слова:** оксид азота (II), модифицированный реактив Грисса, NO-активность, аскорбиновая кислота.

## ВВЕДЕНИЕ

Оксид азота (II) (нитрозил-радикал NO<sup>•</sup>) в организме ферментативно образуется из L-аргинина и оказывает ряд физиологических эффектов, включая контроль артериального давления, антимицробную и противоопухолевую активность. Однако при инфекциях и воспалениях образование NO в организме повышается, что может вызывать развитие патологических процессов (почечная дисфункция, рост опухоли и др.) [1]. Поэтому важно исследовать способность различных веществ взаимодействовать с NO и, тем самым, регулировать его уровень. Для изучения NO-активности соединений *in vitro* разрабатывают тест-системы, в которых искусственно генерируется NO, а затем детектируются устойчивые продукты его превращения в присутствии или отсутствии тестируемых соединений. Основным путем метаболизма NO является окисление до нитритов, что можно описать следующими уравнениями:



Лимитирующей стадией образования нитрит-иона является реакция  $\text{NO}^\bullet$  с  $\text{O}_2$  (уравнение 1). Константа скорости данной реакции имеет третий порядок и равна  $2 \times 10^6 \text{ M}^{-2} \text{ c}^{-1}$  [2].

Целью работы было подобрать оптимальные условия для спектрофотометрического определения низких количеств нитрит-иона в тест-системе и определить  $\text{NO}$ -активность аскорбиновой кислоты методом конкурентных реакций.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе в качестве источника оксида азота (II) выбран нитропруссид натрия (SNP), который в водном растворе при физиологическом значении pH (7,4) спонтанно разлагается в соответствии с реакцией:



$\text{NO}^\bullet$ , в свою очередь, вступает в реакцию с молекулярным  $\text{O}_2$  воздуха с образованием нитрит-ионов (реакции 1-3). Соединение (S),  $\text{NO}$ -активность которого измеряют в ходе эксперимента, конкурирует с кислородом за  $\text{NO}$ :



В результате данной реакции количество  $\text{NO}$  в пробе снижается, соответственно будет снижаться уровень нитрит-анионов, что детектируем спектрофотометрически с помощью реактива Грисса.

В данной работе использовали модифицированный реактив Грисса, который состоит из двух реагентов: сульфаниламида (SA) и N-нафтилэтилендиамина (NED) [3-4]. В результате последовательного взаимодействия реактива с нитрит-ионом образуется стабильный розово-красный азо-краситель, количество которого определяем спектрофотометрически.

Для оптимального определения  $\text{NO}_2^-$  в тест-системе подбирали объем и порядок добавления реагентов, время инкубирования тест-системы, температурные условия, используя калибровочные растворы (рассчитанное количество  $\text{NaNO}_2$  растворяли в деионизированной  $\text{H}_2\text{O}$ ). В результате был сделан вывод, что SA и NED лучше добавлять по отдельности, а не в смеси, как это делают в большинстве случаев, при этом перед добавлением второго реагента выдерживали паузу в течение 5 мин. При выборе оптимального времени инкубирования систему оставляли при комнатной температуре на 10, 20 или 30 мин, а затем спектрофотометрировали. Полученные результаты различались

незначительно, поэтому для выдержки проб выбрано время – 10 мин. В условиях нашего эксперимента максимум поглощения полученных окрашенных растворов наблюдали при 540 нм. В результате с учетом подобранных условий строили калибровочную кривую в диапазоне концентраций  $\text{NO}_2^-$  от 1 мкМ до 100 мкМ. Разработанная методика позволяет определять низкий уровень нитрит-анионов в условиях наших тест-систем. В работе [3] также показано, что предел обнаружения  $\text{NO}_2^-$  с использованием модифицированного реактива Грисса составляет ~0,02 мкМ, в то время, как чувствительность классического реактива – 1-5 мкМ.

Для определения NO-акцепторной активности аскорбиновой кислоты были подготовлены следующие системы, включающие рассчитанные аликвоты исходных растворов реагентов с учетом общего объема системы 1000 мкл:

1. 100 мкл  $1 \times 10^{-1}$  М раствора SNP + 900 мкл деионизированной воды (контрольная тест-система);
2. 100 мкл  $1 \times 10^{-1}$  М SNP + 900 мкл  $5 \times 10^{-4}$  М раствора аскорбата (рабочая тест-система);
3. 100 мкл раствора деионизированной воды + 900 мкл  $5 \times 10^{-4}$  М аскорбата (контроль  $\text{NO}_2^-$  в реагентах);
4. 100 мкл  $2,5 \times 10^{-5}$  М раствора  $\text{NaNO}_2$  + 900 мкл деионизированной воды (контроль соответствия теста с калибровкой).

В нашей работе время инкубации нитропруссид натрия с пробой составляло 150 мин. При увеличении времени инкубации концентрация образующегося оксида азота в пробе существенно не изменялась. При этом инкубировали при комнатной температуре, ее увеличение до 37 °С не приводило к улучшению результатов. После инкубации к каждой пробе добавляли 0,5 мл раствора SA (1% раствор в 5 % ортофосфорной кислоте), а затем через 5 мин 0,5 мл раствора NED (0,1% раствор в деионизированной воде), смеси тщательно перемешивали и выдерживали 10 мин в темноте. Далее определяли оптическую плотность полученных окрашенных растворов при длине волны 540 нм. Оптические плотности тест-систем отображены в таблице:

**Результаты измерения оптических плотностей тест-систем при 540 нм**

№	Система	D
1	нитропруссид натрия в деионизированной воде	0,6984
2	нитропруссид натрия + аскорбиновая кислота	0,5350
3	аскорбиновая кислота в деионизированной воде	0,0136
4	нитрит-ион в деионизированной воде	0,0675

В исследуемом тесте некоторая часть образующегося из SNP оксида азота (II) вступала в реакцию с аскорбиновой кислотой. Остальная же

часть, как и в контрольной пробе, превращалась в нитрит-ион и взаимодействовала с реактивом Грисса. Взаимодействие аскорбата с радикалами NO приводит к снижению оптической плотности исследуемой тест-системы в сравнении с контрольной. NO-акцепторную активность аскорбиновой кислоты оценивали по следующей формуле:

$$\%I = [(D_{\text{контр. тест}} - D_{\text{исслед.тест}})/(D_{\text{контр.тест}})] \times 100, \quad (6)$$

где %I – NO-акцепторная активность соединения, %;

$D_{\text{контр. тест}}$  – оптическая плотность контрольного теста;

$D_{\text{исслед.тест}}$  – оптическая плотность исследуемого теста.

Так, аскорбиновая кислота проявляет способность акцептировать радикалы NO, величина ее NO-активности при концентрации, равной 0,5 мМ, составляет 25,34%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выбраны оптимальные условия оценки NO-активности соединений с помощью спектрофотометрического метода. В основе методики лежит реакция окисления NO до нитрит-аниона, который определяли с помощью модифицированного реактива Грисса. Разработанная методика является высоко чувствительной и позволяет детектировать низкие количества нитрит-иона, при этом использован простой и доступный метод. NO-акцепторная активность аскорбиновой кислоты составила 25,34%.

## **Библиографический список**

1. Kumaran, A. Nitric oxide radical scavenging active components from phyllanthus emblica L. / A. Kumaran, R. J. Karunakaran // Plant Foods for Human Nutrition. – 2006. – Vol. 61, № 1. – P. 1–5.
2. Detection and quantification of nitric oxide-derived oxidants in biological systems / Matías N. Möller [et. al.] // J Biol Chem. – 2019. – № 40. – P. 14776-14802.
3. Jie Sun. Measurement of Nitric Oxide Production in Biological Systems by Using Griess Reaction Assay / Jie Sun, Xueji Zhang, Mark Broderick, Harry Fein // Sensors. – 2003. – № 3. – P. 276-284.
4. Evaluation of the Nitric Oxide Radical Scavenging Activity of Manganese Complexes of Curcumin and Its Derivative / Y. Sumanont [et. al.] // Biological & Pharmaceutical Bulletin. – 2004. – Vol. 27, № 2. – P. 170–173.



# СЛУЧАЙНЫЙ ПОИСК В ЗАДАЧЕ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**В. В. Мацкевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*matskevich1997@gmail.com;*

*науч. рук. – В. В. Краснопрошин, д.т.н., проф.*

В работе рассматривается актуальная проблема, связанная с обучением нейронных сетей. На сегодняшний день широко распространены градиентные алгоритмы обучения. Разработано множество модификаций градиента для повышения качества обучения. Наилучшей модификацией считается метод адаптивного момента [1]. Методы обучения на основе случайного поиска, к сожалению, мало изучены. Это связано, как принято считать, с медленной сходимостью подобных методов. Из-за чего они ранее считались трудно применимыми на практике.

Целью данной работы является разработка алгоритма обучения нейронных сетей на основе метода отжига. Представленный в работе алгоритм гарантированно сходится к оптимальному решению. Показано, что с ростом производительности компьютеров появляются большие перспективы для его практического использования. Для проверки эффективности разработанного алгоритма проводится его сравнение (на примере решения задачи сжатия цветных изображений) с методом адаптивного момента [1].

**Ключевые слова:** случайный поиск, метод отжига, нейронная сеть, обучение, метод градиентного спуска.

## АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Алгоритмы обучения на основе метода градиентного спуска обладают высокой скоростью сходимости, следовательно, не требуют большого объема вычислений и времени для обучения. Однако данные алгоритмы обладают рядом недостатков: целевая функция, должна быть дифференцируемой, что сужает класс решаемых задач; алгоритм сходится в точках, где величина градиента равна нулю, это точки перегиба либо локальных минимумов. Все это означает, что полученное алгоритмом решение, как правило, далеко от оптимально.

Для устранения указанных недостатков предлагается использовать алгоритмы обучения на основе случайного поиска, в которых на каждой итерации новое решение генерируется случайным образом на основе текущего. Это существенно расширяет пространство поиска, что в итоге повышает вероятность нахождения оптимального решения. Единственным недостатком такого подхода является медленная

сходимость алгоритма. На этапе становления нейронных сетей вычислительная мощность компьютеров была недостаточной для применения данного подхода, из-за чего сейчас повсеместно используются градиентные алгоритмы обучения.

## АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ

На сегодняшний день существует два основных метода, основанные на идее случайного поиска: генетический алгоритм и метод отжига. Если градиентные алгоритмы невозможно применить, то используются, как правило, генетические алгоритмы. Однако, на практике они не гарантируют получения оптимального решения.

Метод отжига, напротив, при определенных условиях, обладает свойством сходимости к оптимальному решению, причем из любого начального приближения [2]. Единственным недостатком метода является, как принято считать, чрезмерно медленная сходимость, из-за чего он не получил широкого распространения.

Рассмотрим вначале архитектуру ограниченной машины Больцмана (ОМБ) типа Гаусс-Бернулли. Именно этот тип сети будет использоваться в экспериментах. Архитектура состоит из двух слоев нейронов – входного и скрытого. Они связаны между собой весами, образуя двудольный граф. Конкретная ОМБ задается фиксацией значений всех ее параметров – четырех групп параметров. Весов  $w$ , смещений входного и скрытого слоев ( $b, fb$ ) и параметра «сигма» входного слоя  $\sigma$ . Таким образом, ОМБ задается следующим образом  $RBM=(w, \sigma, fb, b)$ . Алгоритм минимизации целевой функции  $F$  является итерационным.

Опишем теперь предлагаемый алгоритм, реализующий метод отжига.

**Предварительный шаг.** Инициализация начального состояния нейронной сети  $RBM_0=(w_0, \sigma_0, fb_0, b_0)$  и последовательности температур, связанных следующим соотношением:

$$T_k = \frac{T_0}{\ln(k+3)}, k > 0, \quad (1)$$

где  $T_0$  – заранее заданное значение.

**Общий  $k$ -ый шаг.** Шаг 1.

Генерация четырех равномерно распределенных дискретных случайных величин  $a, b, c, d$  на отрезке от нуля до количества параметров в группе. Генерация четырех случайных перестановок длиной, равной количеству параметров в группе. Первые  $a, b, c, d$  элементов перестановок задают индексы изменяемых параметров в каждой группе параметров соответственно.

Шаг 2. Генерация нового решения. Для каждого изменяемого параметра генерируется две равномерно распределенные случайные величины  $e, g$  на отрезках  $[0;1], [0;l/2]$ . Величина  $l$  зависит от того, какой группе принадлежит изменяемый параметр и равна  $l_a, l_b, l_c, l_d$  соответственно. Значения  $l$  для каждой группы задаются как параметры алгоритма. Пусть  $x_i$  – изменяемый параметр, а его новое значение  $x_i'$ , тогда:

$$x_i' = \begin{cases} x_i + g, e \leq 0,5 \\ x_i - g, e > 0,5 \end{cases}$$

Шаг 3. Принятие решения о переходе. Пусть  $x$  текущее решение,  $y$  – новое, сгенерированное на шаге 2 решение. Тогда решение  $x'$  на следующей итерации определяется следующим образом:

$$P(x' = y | x) = \min \left\{ 1, \exp \left( \frac{F(x) - F(y)}{T_k} \right) \right\} \quad (2)$$

Шаг 4. Проверка критерия останова. Если время на обучение нейронной сети истекло, то алгоритм завершается. В противном случае производится переход на следующую итерацию.

Стоит отметить, с учетом разработанного генератора новых решений, использования правила перехода (2) и формулы охлаждения (1), выполняется критерий сходимости [2], а значит, алгоритм сходится к оптимальному решению, причем из любого начального приближения.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для экспериментов была выбрана выборка CIFAR-10 [3]. Для экспериментов были зафиксированы три различные степени сжатия: 16-кратное, 32-кратное и 64-кратное. Данные варианты сжатия были выбраны из двух соображений. Более высокие степени сжатия приводят к слишком большим потерям, а более низкие не представляют большого интереса. Т.к. существует достаточно большое количество эффективных алгоритмов для низких степеней сжатия, в том числе и без потерь.

Для сжатия изображений использовался ансамбль из ОМБ. Количество нейронов во входном и скрытом слое отдельной машины зависит от степени сжатия изображений. Каждая отдельная ОМБ обрабатывала отдельный фрагмент изображения. При этом фрагменты не пересекаются.

Для 16-кратного сжатия в каждой машине было установлено 48 нейронов во входном слое и 24 в скрытом. Для 32-кратного сжатия было установлено 48 нейронов во входном слое и 12 в скрытом по аналогичной

логике. Для 64-кратного сжатия было установлено 96 нейронов во входном слое и 12 в скрытом.

Для оценки потерь при сжатии использовались наиболее распространенные функционалы: корень среднеквадратической ошибки (MSER), соотношение максимального сигнала к шуму (PSNR), в том числе с поправкой на зрение человека (PSNR\_HVS), структурная схожесть изображений (SSIM).

#### Результаты обучения

Алгоритм обучения	Метод отжига			Метод градиентного спуска		
	1,5	0,75	0,375	1,5	0,75	0,375
Степень сжатия, бит/пиксель						
MSE	413	684	855	2221	1898	2385
PSNR	22,1	19,9	18,9	14,8	15,5	14,6
PSNR_HVS	22,3	20,1	19,1	14,9	15,6	14,7
SSIM	0,767	0,668	0,602	0,307	0,383	0,27
Время обучения, ч	3	3	1	0,041	0,142	0,08

Из полученных результатов (см. Таблица) видно, что разработанный алгоритм более, чем в 2,5 раза превосходит градиентные методы по качеству обучения. Однако, разработанный алгоритм более, чем в 10 медленнее градиентов. Т.к. время обучения для метода отжига является приемлемым и нейронная сеть обучается лишь один раз, а дальше имеет значение скорость функционирования обученной сети, то медлительность алгоритма обучения в данном случае не является критичной. Стоит также отметить, не смотря на то, что обучение производилось на видеокарте nvidia 1070 ti, т.е. средней мощности, разработанный алгоритм оказался применим на практике.

С ростом вычислительной мощности компьютеров растет качество обучения и при этом существенно сокращается время. Градиентным алгоритмам рост вычислительной мощности не дает преимуществ. Незначительное сокращение времени обучения не повлияет на конечный результат, а качество обучения от этого не меняется.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный алгоритм обладает большой перспективой в обучении нейронных сетей.

#### Библиографические ссылки

1. Kingma D.P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D.P. Kingma, J.L. Ba, // Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), pp. 1-15.
2. Hajek B. Cooling schedules for optimal annealing / B. Hajek // Mathematics of operations research, vol. 13, iss. 2, 1988.
3. Выборка CIFAR-10 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html> – Дата доступа: 04.03.2020.

# НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА $h$ -ЦЕЛЫХ ФУНКЦИЙ

**В. А. Павловский**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*pavlad95@gmail.com*

*науч. рук. – И. Л. Васильев, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе рассматриваются целые функции  $h$ -комплексного переменного и их свойства, отличные от свойств целых функций комплексного переменного. Даются определения  $h$ -целой функции; функции,  $h$ -аналитической на всём множестве  $h$ -комплексных чисел; первичного множителя и канонического произведения. Формулируется и доказывается критерий аналитичности  $h$ -целой функции. Показывается, что  $h$ -целая функция, представимая в виде канонического произведения есть функция  $h$ -аналитическая на всём множестве  $h$ -комплексных чисел. Также приводится теорема, утверждающая, что ограниченность производных  $h$ -целой функции является достаточным условием её аналитичности.

**Ключевые слова:** множество  $h$ -комплексных чисел; делители нуля;  $h$ -целая функция; аналитичность  $h$ -целой функции;  $h$ -комплексный степенной ряд; первичный множитель; каноническое произведение.

## $h$ -ЦЕЛЫЕ ФУНКЦИИ

Обозначим через  $C_h$  кольцо  $h$ -комплексных (двойных) чисел [1,2] вида  $z = x + jy$ , где  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $j^2 = 1$ ,  $j \neq \pm 1$ , с нормой  $\|z\| = |x| + |y|$ . Кольцо  $C_h$  обладает делителями нуля, каковыми являются числа вида  $t \pm jt$ ,  $t \in \mathbb{R}$ .

**Определение 1.** Функция  $f(z) = u(x, y) + jv(x, y)$  называется  $h$ -целой, если  $u(x, y)$  и  $v(x, y)$  бесконечно дифференцируемы в  $\mathbb{R}^2$  и выполняется

$$u'_x(x, y) = v'_y(x, y), \quad u'_y(x, y) = v'_x(x, y).$$

Для  $h$ -целой функции во всех точках  $z \in C_h$  верно представление [2]

$$f(z) = \frac{1+j}{2} f(x+y) + \frac{1-j}{2} f(x-y). \quad (1)$$

Для её производных верна формула

$$f^{(k)}(z) = \frac{1+j}{2} f^{(k)}(x+y) + \frac{1-j}{2} f^{(k)}(x-y), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Из формулы (1) следует, что если  $h$ -целая функция ограничена на вещественной оси, то она ограничена всюду в  $C_h$ . Например,  $\forall z \in C_h$   $\|\sin z\| \leq 1$ ,  $\|e^{-z^2}\| \leq 1$ . Таким образом, теорема Лиувилля в  $C_h$  не имеет места.

## АНАЛИТИЧНОСТЬ $h$ -ЦЕЛЫХ ФУНКЦИЙ

**Определение 2.** Функцию  $f(z)$  назовём  $h$ -аналитической в  $C_h$ , если она представима в виде суммы сходящегося во всех точках  $z \in C_h$  степенного ряда

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} d_n z^n. \quad (3)$$

Несложно показать, что степенной ряд (3) сходится абсолютно и равномерно в любом  $h$ -круге  $\{\|z\| \leq R\}$  [2], функция  $f(z)$  в (3) является  $h$ -целой и  $d_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$ .

**Определение 3.** Бесконечно дифференцируемую функцию  $f: \mathbb{R} \rightarrow C_h$  назовём  $h$ -аналитической в  $\mathbb{R}$ , если она представима в виде суммы сходящегося во всех точках  $t \in \mathbb{R}$  степенного ряда

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} d_n t^n. \quad (4)$$

**Теорема 1.**  $h$ -Целая функция  $f(z)$   $h$ -аналитична в  $C_h$  тогда и только тогда, когда функция  $f(z)$  является  $h$ -аналитической в  $\mathbb{R}$ .

**Доказательство.** Если ряд (3) сходится  $\forall z \in C_h$ , то сходится ряд (4). Обратно, пусть  $\forall t \in \mathbb{R}$  сходится ряд (4). Из равенства

$$z^n = (x + jy)^n = \frac{1+j}{2}(x+y)^n + \frac{1-j}{2}(x-y)^n \quad \forall n = 0, 1, 2, \dots$$

вытекает сходимость ряда (3) во всех точках  $z \in C_h$ .

**Определение 4.** Первичным множителем назовём функцию

$$G(u; p) = (1-u)e^{u + \frac{1}{2}u^2 + \dots + \frac{1}{p}u^p}, \quad \text{где } p \in \mathbb{N}.$$

При  $p = 0$  справедливо

$$G(u; 0) = 1 - u.$$

Пусть  $c_k \in C_h$  – последовательность такая, что:

1.  $0 < \|c_1\| \leq \dots \leq \|c_k\| \leq \|c_{k+1}\| \leq \dots$ ,
2.  $c_k$  не является делителем нуля  $\forall k \in \mathbb{N}$ ,
3.  $\lim_{k \rightarrow \infty} c_k = \infty$ ,  $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{c_k} = 0$ .

**Определение 5.** Каноническим произведением назовём равномерно сходящееся бесконечное произведение

$$F(z) = \prod_{k=1}^{\infty} G\left(\frac{z}{c_k}; p\right), \quad (5)$$

где  $p$  – наименьшее целое число, при котором сходится ряд  $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{|c_k|^{p+1}}$ .

Число  $p$  назовём порядком канонического произведения (5).

**Теорема 2.**  $h$ -Целая  $F(z)$ , представимая в виде канонического произведения (5), является  $h$ -аналитической в  $C_h$ .

**Доказательство.** Действительно, такая функция представляется на действительной оси в виде равномерно сходящегося бесконечного произведения

$$F(t) = \prod_{k=1}^{\infty} G\left(\frac{t}{a_k}; p\right).$$

В классическом комплексном анализе показывается [3], что  $F(t)$  продолжается в  $C$  как целая функция и, следовательно, на  $R$  представима в виде суммы степенного ряда (4).

**Следствие 1.** Пусть  $f_1(z), f_2(z), \dots, f_N(z)$  –  $h$ -целые функции, удовлетворяющие условиям теоремы 2, тогда их сумма и произведение есть функции,  $h$ -аналитические в  $C_h$ .

**Замечание 1.** Существуют  $h$ -целые функции  $f(z)$ , не являющиеся  $h$ -аналитическими в  $C_h$ .

**Пример 1.** Рассмотрим функцию вещественной переменной

$$f(t) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{t^2}}, & t \neq 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases}.$$

В [4] показано, что  $f(t) \in C^\infty(R)$ ,  $f^{(n)}(0) = 0$ ,  $\forall n = 0, 1, 2, \dots$ , однако эту функцию нельзя представить в виде суммы сходящегося на  $R$  степенного ряда (4). Определим для любого  $z \in C_h$  функцию  $f(z)$  по  $f(t)$  с помощью (1). Очевидно  $f(0) = 0$ . В делителях нуля вида  $z = (1 \pm j)\tau$ ,  $\tau \neq 0$  имеем  $f(z) = f(\tau \pm j\tau) = \frac{1 \pm j}{2} e^{-\frac{1}{4\tau^2}}$ . Таким образом определяемая функция окажется  $h$ -целой. Производные определяются по формуле (2), причём  $f^{(n)}(0) = 0$ ,  $f^{(n)}(\tau \pm j\tau) = \frac{1 \pm j}{2} j \left( e^{-\frac{1}{4\tau^2}} \right)^{(n)}$ , однако в силу теоремы 1 не  $f(z)$  является  $h$ -аналитической в  $C_h$ .

**Теорема 3.** Пусть  $f(z)$   $h$ -целая функция и для её производных верна оценка

$$\|f^{(k)}(z)\| \leq Mq^k \|z\|^{\alpha k} e^{A\|z\|^\rho} \quad (6)$$

$\forall k = 0, 1, 2, \dots, \forall z \in C_h$ , где  $M, q, \alpha, A, \rho > 0$  – постоянные. Тогда  $f(z)$  является  $h$ -аналитической в  $C_h$ .

**Доказательство.** Запишем  $f(z)$  в виде

$$f(z) = f(0) + \frac{f^{(1)}(0)}{1!}z + \frac{f^{(2)}(0)}{2!}z^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}z^n + r_n(z) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(0)}{k!}z^k + r_n(z).$$

Положим  $F(t) = f(z) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(t)}{k!}(z-t)^k$ . Имеем:  $F(z) = 0, F(0) = r_n(z),$

$F'(t) = -\frac{f^{(n+1)}(t)}{n!}(z-t)^n$ . Тогда в силу теоремы о конечных приращениях [2] получим

$$\|r_n(z)\| = \|F(z) - F(0)\| \leq 2 \max_{\tau \in [0, z]} \|F'(\tau)\| \|z\| \leq \frac{2Mq^{n+1}r^{\alpha(n+1)}e^{Ar^\rho}r^{n+1}}{n!} = \frac{2Me^{Ar^\rho}(qr^{\alpha+1})^{n+1}}{n!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Следовательно, степенной ряд  $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(0)}{k!}z^k$  сходится к  $f(z)$  равномерно в любом  $h$ -круге  $\{\|z\| \leq r\}$ , что и доказывает теорему.

**Замечание 2.** Условиям теоремы 3 удовлетворяет, например, функция  $f(z) = \operatorname{ch}(z) = \frac{e^z + e^{-z}}{2}$ , однако эти условия не являются необходимыми. Например, функция

$$e^{z^2} = 1 + z^2 + \frac{z^4}{2!} + \dots + \frac{z^{2n}}{n!} + \dots$$

является  $h$ -аналитической в  $C_h$ , хотя условия (6) для неё не выполняются.

#### Библиографические ссылки

1. Яглом, И. М. Комплексные числа и их применение в геометрии / И. М. Яглом. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 192 с.
2. Павловский, В. А. О свойствах  $h$ -дифференцируемых функций / В. А. Павловский, И. Л. Васильев // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2021. № 2. – С. 29-37.
3. Левин, Б. Я. Распределение корней целых функций / Б. Я. Левин. – М.: Ленанд, 2022. – 632 с.
4. Зверович, Э. И. Вещественный и комплексный анализ в 6 ч. Часть 6. Теория аналитических функций комплексного переменного: учебное пособие для студентов / Э. И. Зверович. – Минск: Вышэйшая школа, 2008. – 316 с.