

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАУКИ**

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

**Материалы конференции**

**В трех частях**

**Часть 1**

**Минск, 11–22 мая 2020 г.**

Научное электронное издание

МИНСК, БГУ, 2020

**ISBN 978-985-881-080-1 (ч. 1)  
ISBN 978-985-881-077-1**

© БГУ, 2020

УДК 5(06)+004(06)  
ББК 2я431+32.97я431

**Редакционная коллегия:**

В. Г. Сафонов (*гл. ред.*), О. Н. Янковский (*зам. гл. ред.*),  
А. Г. Захаров (*зам. гл. ред.*), А. А. Кухаренко (*отв. секретарь*),  
М. Н. Василевич, А. В. Вериго, О. В. Вологина, Д. С. Воробьев,  
М. Г. Герменчук, О. И. Губич, Т. А. Железнякова, С. А. Захаркевич,  
Н. А. Зубченко, И. М. Кимленко, А. В. Коклевский, И. Н. Колядко,  
В. И. Малюгин, В. В. Манкевич, В. С. Михайловский,  
К. А. Тананушко, Е. В. Хомцова, С. И. Шатравский, В. И. Шиманский

**77-я научная** конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета [Электронный ресурс] : материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 11–22 мая 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-985-881-080-1.

В первую часть издания включены доклады студентов и аспирантов механико-математического факультета, факультета прикладной математики и информатики, факультета радиофизики и компьютерных технологий, 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 *Е. К. Калюко*

Подписано к использованию 31.12.2020. Объем 15,8 МБ.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Захаров А. Г., Ключев В. Д., Кухаренко А. А.</b> Информация об итогах 77-й научной конференции студентов и аспирантов бгу.....	9
---	---

### МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<b>Бадак Б. А.</b> Образовательный сайт как одно из методических средств дистанционного обучения в работе начинающего педагога.....	12
<b>Булавская К. Д., Фролова Н. В.</b> Внедрение дистанционных технологий в тестирование по теоретической механике.....	16
<b>Иванов Д. В.</b> Применение двухфакторной аутентификации с аппаратным ключом в веб-разработке.....	20
<b>Пашкевич А. Д.</b> Агентное моделирование в динамически изменяющейся среде.....	24
<b>Соловей У. В.</b> Дидактика в пиринговом обучении математики.....	29
<b>Сорокина В. В.</b> О свойствах специальных полиномов, связанных с уравнениями Пенлеве.....	33
<b>Спесивцева К.А.</b> Достаточная корректность смешанной задачи для волнового уравнения при характеристических вторых производных.....	37
<b>Устилко Е.В.</b> Гладкие решения смешанной задачи для волнового уравнения при характеристической первой кривой производной.....	41

### ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

<b>Бакун И. И.</b> Разработка системы сокрытия текстовой рекламы в динамическом видеопотоке.....	45
<b>Бороховский А. В.</b> Анализ бизнес-цикла с использованием индекса экономических настроений.....	50
<b>Дементей В. Ю., Егоров А. А.</b> Разработка клиент-серверного приложения по распознаванию партитур музыкальных произведений.....	54
<b>Дыбовская Д. А.</b> Слабые реберные покрытия и ассоциированные с ними классы графов.....	58
<b>Жерело М. А.</b> Разработка и применение опционных стратегий в алгоритмах автоматической торговли.....	62
<b>Кизенков В. С., Полетаева Т. С.</b> Распознавание партитур музыкальных произведений с помощью нейронных сетей и преобразование их в MIDI файлы.....	66
<b>Ключев В. Д.</b> Статистический анализ текста и исследование его целевого назначения.....	70
<b>Коба Р. Ю.</b> Задача навигации на основе динамической информации о трафике.....	75
<b>Кузьмик А.С.</b> Сегментация и трехмерная реконструкция моделей по снимкам компьютерной томографии.....	79

<b>Лапицкая С. А., Гецевич Ю. С.</b> Разработка алгоритмов распознавания интонация речи.....	83
<b>Лукашевич М. Н., Ковалев М. Я.</b> Модель оптимального планирования работ по проверке и ремонту грузовых контейнеров.....	88
<b>Меркушова А. В., Андрианов А. М.</b> Компьютерное моделирование потенциальных противоопухолевых препаратов на основе известных ингибиторов теломеразы .....	92
<b>Наумович А. И.</b> Алгоритмы распознавания аномальных ситуаций в программных логах.....	97
<b>Осипенко В. О.</b> Анализ кредитоспособности нефинансовых организаций Республики Беларусь на основе панельных данных с кластерной структурой.....	101
<b>Пестрак М. С., Ульяницкий В. А.</b> Реализация приложения под платформу Android синхронного перевода речи в анимацию языка жестов .....	105
<b>Реентович В. В.</b> Обучение глубоких нейронных сетей с подкреплением .....	109
<b>Рунец В. О.</b> Разработка системы рекомендаций .....	114
<b>Трубач Г. Г.</b> Использование анализа данных в образовании.....	119
<b>Федченков И. В.</b> Разработка и тестирование алгоритмического и программного обеспечения оптимизации торговых финансовых стратегий .....	123
<b>Хлебович А. В.</b> Анализ риска артериальной гипертензии с использованием методов машинного обучения .....	128
<b>Шарыкин Р.Е.</b> Модель распределенных объектно-ориентированных стохастических гибридных систем и ее анализ .....	132
<b>Якимович Е. В.</b> Разработка системы для изучения слов иностранного языка.....	136

#### ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

<b>Акула К. А.</b> Обучение с подкреплением мультиагентных систем.....	140
<b>Астрамович Д. А.</b> Расчёт интенсивности рассеяния электронов на ионизированной примеси в полупроводниках методом Ридли .....	144
<b>Баранова В. С.</b> Распознавание и идентификация космического мусора посредством визуальной навигации .....	149
<b>Будько М. И.</b> Классификация молекул РНК с использованием моделей векторизации.....	153
<b>Верстаковская А. П.</b> Аппаратные средства для построения мобильных станций приема телеметрии и измерения параметров орбиты малых космических аппаратов.....	157
<b>Горбунова А. А.</b> Сравнительный анализ алгоритмов снижения размерности данных для исследования экспрессии генов.....	161

<b>Горшков И. Д.</b> Автоматизация работы сотрудников кухни объектов общественного питания.....	165
<b>Гребенник В. Н.</b> Имитационная модель для анализа алгоритмов автоматического отбора признаков.....	169
<b>Евчик В. Е.</b> Макет системы ориентации и стабилизации наноспутника.....	173
<b>Искренков Е. Д.</b> Разработка приложения для отслеживания расписания студентами факультета радиофизики и компьютерных технологий.....	177
<b>Исмаилова А. С., Парфимович И. Д.</b> Исследование структурных характеристик функционализированных углеродных нанотрубок, синтезированных на различных каталитических системах.....	181
<b>Кезик А. Г.</b> Моделирование орбитального движения космических объектов в программе visual space.....	185
<b>Козинская Е. В.</b> Разработка модуля мониторинга состояния окружающей среды для беспилотного летательного аппарата.....	189
<b>Кольчевская М. Н., Парфимович И. Д., Савкин Н. А.</b> Эффективный радиопоглощающий композитный материал на основе полиуретана с углеродными нанотрубками.....	193
<b>Корнелюк В. В.</b> Верификация и оптимизация программной реализации модели магнитного поля земли.....	197
<b>Курочкин М. Н.</b> Трехмерная реконструкция лица по фотографиям.....	201
<b>Медведев В. М.</b> Алгоритмы идентификации личности в системах массового интерактивного пользовательского взаимодействия.....	205
<b>Нехай В. В.</b> Цифровая система обработки сигнала для декодирования протокола AX.25 на ОС Windows и ее использование при приеме сигналов студенческих наноспутников.....	209
<b>Одинец А. Л.</b> Разделение транскрипционных сигналов клеточных популяций опухолевых тканей рака легкого с использованием метода независимых компонент.....	213
<b>Поживилко А. О.</b> Комбинированный газовый разряд высокой частоты и постоянного тока.....	217
<b>Радион В. А.</b> Перестройка частоты излучения в полупроводниковых лазерах с «kink» эффектом.....	221
<b>Семенович А. С.</b> Программируемый электронный тренажер для развития реакции и координации.....	225
<b>Сечко И. К.</b> Алгоритм поиска родственных связей на основании данных из социальных сетей.....	229
<b>Синяков А. В.</b> Таргетный анализ кривых затухания флуоресценции.....	233
<b>Смягликова А. И.</b> Исследование информационных характеристик волоконно-оптических динамических запоминающих устройств рециркуляционного типа с Zr-регенерацией.....	237

<b>Хомюк Р. И., Милошевский В. В.</b> Моделирование многочастичным методом Монте-Карло дрейфовой скорости электронов в арсениде галлия в сильных электрических полях .....	241
<b>Цалко Е. Л.</b> Определение эмоционального состояния человека с помощью алгоритмов машинного обучения .....	245
<b>Шиманская А. Д.</b> Мобильная робототехническая платформа с комплексной программой управления движением .....	249

#### ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<b>Горина А. А.</b> Квази-фрактальная столкновительная динамика солитонов в двухкомпонентной самодуальной теории $\phi^4$ .....	253
<b>Гулевич П. Е.</b> Микроконтроллерная система управлением метостанцией .....	258
<b>Гулицкий А. А.</b> Применение сверточных нейронных сетей для задачи детектирования объектов в реальном времени .....	265
<b>Никифоров А. В.</b> Визуализация и анализ электрической активности нейронов среза гиппокампа крысы .....	269
<b>Николайчик А. В.</b> Освоение Монте-Карло программы openmc и расчет международного бенчмарка wwg тох .....	273
<b>Пилипович А.С.</b> Спектрально-люминесцентные свойства аминок-производного циклического $\beta$ –трикетона в растворах и полимерных пленках .....	277
<b>Сикорский А. И.</b> Оптимизация метода электрохимического осаждения тонких плёнок оксида меди (I) .....	281
<b>Титовец Я. Д.</b> Исследование конвекции Бенара-Рэлея методом трассировки частиц .....	286
<b>Шевелёва В.В., Прилуцкий С.А.</b> Влияние высокоэнергетического плазменного воздействия на окисление циркония .....	291

#### БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<b>Авимова К. П.</b> Сравнение уровня кортикостерона в моче лабораторных мышей, содержащихся в разных условиях .....	297
<b>Боброва Н. М., Дубовик С. А.</b> Перенос компонентов системы Crispr/Cas9 в клетки человека INVITRO .....	301
<b>Борейко Н.В.</b> Морфофункциональные показатели харовых водорослей в оз. Нарочь .....	305
<b>Василевская М. Е.</b> Нокаут генов дагф–синтаз II типа <i>Pseudomonas chlororaphis</i> subsp. <i>aurantiaca</i> B–162 .....	310
<b>Заинчковская А.Н.</b> Получение аналогрезистентных мутантов бактерий <i>pseudomonas fluorescens</i> и изучение их влияния на повышенную устойчивость растений огурца сорта «конкурент» к абиотическому стрессу .....	314

<b>Карманова В.В.</b> Биологическое разнообразие микромицетов восточной антарктиды .....	319
<b>Карпаева А.Ю.</b> Видовой состав и таксономическая структура фитоперифитона в карьерных водоемах гродненского мелового месторождения .....	323
<b>Койда Е.С.</b> Конструирование и характеристика делеционного мутанта по гену глобального транскрипционного регулятора <i>slyA</i> у бактерий <i>erwinia amylovora</i> .....	327
<b>Кучвальский М.В.</b> У измененных форм микобактерий туберкулеза трансформируется клеточная стенка под воздействием антибиотиков.....	331
<b>Лицкевич К.С.</b> Анализ воздействия $Ni^{2+}$ на ростовые параметры и генерацию АФК у различных линий <i>arabidopsis thaliana</i> l. heynh.....	335
<b>Мельничек А. Г.</b> Видовой состав и уровень количественного развития фитопланктона в карьерных водоемах гродненского мелового месторождения .....	339
<b>Перковский Н.А.</b> Адаптация методов культивирования <i>in vitro</i> плодовых годных растений.....	343
<b>Приступа К.В., Курган В.Д.</b> Активность ферментов окисления аскорбиновой кислоты и фенольных соединений в трансгенных растениях <i>Nicotianatabacum</i> , выращенных в условиях абиотического стресса.....	346
<b>Рекиш А. Л., Шикер А. А.</b> Влияние никеля и никель–гистиридиновых комплексов на рост корней высших растений.....	351
<b>Сяо Юйтин</b> Сравнительная характеристика мутантов и исходных форм фасоли обыкновенной по устойчивости к антракнозу .....	355
<b>Федоринчик К. А., Сахвон В. В.</b> Динамика структуры населения птиц и ее связь с синурбизацией (на примере памятника природы республиканского значения «Дубрава», Минск) .....	359
<b>Харькова В.Д.</b> Генерация <i>in vitro</i> культуры <i>chaenomeles japonica</i> (thunb.) lindl. ex sprach .....	363
<b>Шонина М.Ю., Сенковская И.Э.</b> Поиск природных изолятов спорообразующих микроорганизмов с высокой экзоферментативной активностью и способностью к росту в широком диапазоне условий.....	367

## ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<b>Бобров Д. И.</b> Влияние изотопного h-d эффекта на радиационно-индуцированные превращения водных растворов глицерина.....	371
<b>Варанчук В.В, Минеева И.В.</b> Синтез $C^1-C^8$ строительного блока амфидинолидов С и F.....	377
<b>Гурова А. И.</b> Получение магнитных полимерных частиц полиметилметакрилат/магнетит для иммуноанализа.....	381
<b>Кмит А. А.</b> Синтез азокрасителей для конъюгации с биомолекулами.....	386

<b>Орлович А.Ю.</b> Энтальпия образования этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата и его бензол производного в газовой фазе .....	389
<b>Рагойжа Е.Г</b> Квантово-химическое исследование поверхности катализатора восстановления оксидов азота на основе Ag/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	394
<b>Раковец А.Ю.</b> Синтез, исследование свойств и анализ биоактивности композиционных материалов на основе полилактида и фосфатов кальция.....	400
<b>Урбанович О. В., Савко А. В.</b> Влияние дейтерообмена на образование продуктов радиационно-химических превращений пропандиола-1,2 в деаэрированных водных растворах при рН 7.....	405
<b>Швайба А. В., Исаков В. Е.</b> Синтез (3z,6z,9z)-1,3,6,9-нонадекатетраена – полового феромона зимней пяденицы ( <i>operophtera brumata</i> ).....	410
<b>Шевченко Е. Д., Черепица С. В., Сытова С. Н., Коваленко А. Н.</b> Анализ методов определения количественного содержания летучих компонентов в алкогольной продукции.....	413
<b>Шевченко М. А. , Болотина Е. А. , Чернявский Е. А.</b> Влияние низкочастотного ультразвука на фибрин и процессы его ферментативного гидролиза.....	417
<b>Щербакова В. Б., Садовская Л. Ю., Логвинович А. С.</b> Композиционные материалы на основе гетерополимолибдатов с функцией аккумуляирования фотогенерированного заряда .....	422
<b>Юркштович Я. Н.</b> Стандартные энтальпии образования темозоломида в кристаллическом и газообразном агрегатных состояниях .....	427



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИТОГАХ 77-Й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ БГУ

А. Г. ЗАХАРОВ, В. Д. КЛЮЕВ, А. А. КУХАРЕНКО

С 11 по 22 мая 2020 года в Белорусском государственном университете была проведена 77-я научная конференция студентов и аспирантов. Заслушивание докладов было организовано в онлайн-формате на 313 секциях 18 подразделений университета. На конференции выступили с докладами 3553 участника из БГУ, других УВО Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья. В рамках конференции было прочитано 3738 докладов. По 2 доклада подготовили 343 участника, по 3 доклада – 40 участников, по 4 доклада – 8 участников. В работе конференции также приняли участие учащиеся гимназий и лицеев г. Минска.

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

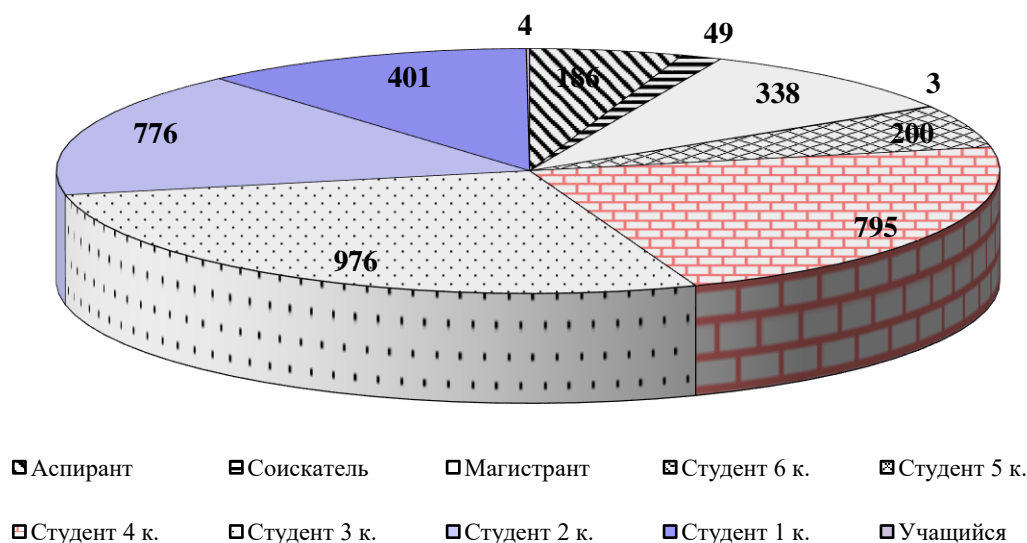
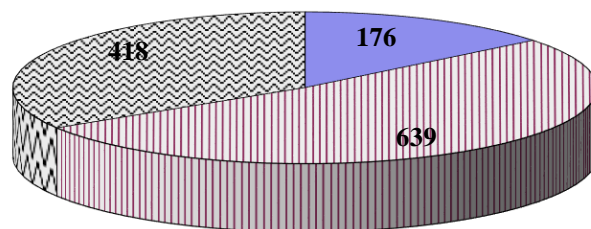


Рис. 1. Участники конференции

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



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

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

Доклады подготовлены под руководством 1369 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	498	254	160	87	65	43	32	19	17	10	13
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

*Продолжение таблицы 1*

Количество научных руководителей докладчиков	10	6	6	2	1	5	1	1	1	1
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	12	13	14	15	16	17	20	22	23	41

Эффективность участия в конференции студентов и аспирантов разных подразделений БГУ отражена в таблице 2. Наибольшее количество участников (624 человека) являются студентами и аспирантами факультета международных отношений, они прочитали 748 докладов на 77 секциях.

Таблица 2

**Количество участников и докладов, представленных на конференции**

Название подразделения БГУ	Кол-во докладов	Кол-во участников	Кол-во заседаний
Факультет международных отношений	748	624	77
Филологический факультет	354	335	37
Юридический факультет	343	326	20
ГУО «Институт бизнеса Белорусского государственного университета»	307	331	12
Факультет социокультурных коммуникаций	271	267	25
Факультет философии и социальных наук	248	235	27
Исторический факультет	225	214	17
Факультет журналистики	208	190	15
Экономический факультет	205	210	12
Факультет прикладной математики и информатики	193	197	15
Факультет географии и геоинформатики	147	147	12
Факультет радиофизики и компьютерных технологий	140	143	8
Химический факультет	135	135	13
Физический факультет	79	81	10
Механико-математический факультет	73	75	8
Биологический факультет	35	44	3
Кафедра педагогики и проблем развития образования	16	20	1
ГУО «Институт теологии имени святых Мефодия и Кирилла» БГУ	11	11	1

Таким образом, 77-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 премирования, а также отобраны работы для участия в конкурсе на лучшие научные работы студентов БГУ и XXVII Республиканском конкурсе научных работ студентов учреждений высшего образования Республики Беларусь.

# МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ САЙТ КАК ОДНО ИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ В РАБОТЕ НАЧИНАЮЩЕГО ПЕДАГОГА

**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 рассмотрены пути разрешения проблемы организации образовательного процесса в работе молодого специалиста во время мировой пандемии. Представлен пример создания образовательного сайта с помощью универсального конструктора Tilda.

**Ключевые слова:** образовательный сайт, виртуальная платформа, смешанное обучение, конструктор сайтов.

В настоящее время происходит быстрое развитие и распространение новых информационных технологий, что создает предпосылки для широкого использования электронного обучения в образовании и развитии новой технологии обучения – смешанного обучения. Данная технология совмещает в себе лучшие аспекты и преимущества преподавания в школе, как в очном режиме, так и в дистанционном.

Итак, как организовать образовательный процесс в мире электронной информации? Какие же условия способствуют успешной реализации данной технологии? Какая проблема стоит в первую очередь перед педагогом?

### **ПУТИ РАЗРЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ:**

#### **1. Необходимо наличие виртуальной платформы!**

Один из ее вариантов – **личный сайт учителя**. Сайт – информационно-компьютерный проект, виртуальная площадка учебных практик по предмету, средство организации образовательного процесса [2].

*Актуальность сайта* определяется необходимостью создания современной образовательной платформы с широкими возможностями, необходимостью организации управления системой смешанного обучения в школе.

*Эффективность и практическая значимость* данной платформы заключаются в систематизации и рациональной подаче всего учебного материала, перспективной наглядности, доступности ресурсов, что помогает оптимально регулировать учебный процесс.

*Целевое назначение площадки* – обеспечение обучающихся электронными образовательными материалами для самостоятельной работы в любое время.

## **2. Проектирование как метод описания дидактической системы**

Педагогическое проектирование – прогностическая деятельность педагога, состоящая в разработке дидактической системы и соответствующих дидактических процессов, которые носят характер инновационной для данного учителя практики [1].

Под современными дидактическими системами будем понимать такие системы, которые удовлетворяют критериям актуальности, перспективности, эффективности, альтернативности, открытости, оптимальности и ресурсной обеспеченности соответствующего образовательного процесса [1].

## **3. Как создать сайт? Какой конструктор сайтов выбрать?**

Самый простой способ создания сайта – с помощью визуального редактора на основе готовых шаблонов с бесплатным предоставлением хостинга.

Приведём примеры популярных конструкторов сайтов: **Ucoz, Setup, Fo, Nethouse, Umi, A5, Okis, Wix, Jimdo, Google, WordPress, Tilda.**

Я использовала для создания своего проекта такой конструктор сайтов, как **Tilda**. В конструкторе сайтов Tilda впервые использована модульная система создания сайта, которую впоследствии стали использовать и другие сервисы.

### **Функциональные возможности конструктора сайтов Tilda [3]:**

- инновационный блочный механизм редактирования;
- профессиональная анимация в ZeroBlock;
- форма обратной связи: интеграция с 18 сервисами приёма данных;
- адаптивный дизайн для мобильных;
- создание email и отправка через сервисы рассылок;
- подключение своего домена;
- оптимизация (SEO) и продвижение в соц. сетях;
- встроенная статистика и аналитика;
- экспорт кода и API и др.

<http://badak-school-by.tilda.ws> – сайт Бадак Бажены Александровны, преподавателя математики и информатики ГУО «Лицей № 1 г. Минска», преподаватель в Школе юного математика механико-математического факультета БГУ. На сайте представлены авторские методические материалы. Имеется множество ссылок на другие ресурсы, в частности, на такие журналы как, «Квант», «Молодой учёный» и др. Приведены

публикации, а также собрана коллекция материалов полезных как начинающим педагогам, так и учащимся.

Разделы «Методические разработки», «Тестирование», «Дорога в мир познания», блок «Олимпиадный уголок» содержит материалы, которые могут быть использованы при подготовке и проведения уроков в профильных классах, а также помогут учащимся подготовиться к олимпиадам и экзаменам.

Приведём структуру образовательного сайта (рис. 1):



Рис. 1. Структура образовательного сайта

Я являюсь преподавателем лицея и имею опыт администратора сайта учреждения образования, хотелось бы поделиться опытом по организации удалённого обучения. В разделе «Актуально сегодня» приведены ссылки на различные материалы и ресурсы, которые будут являться «настоящим помощником» в данное время.

В своей педагогической деятельности в качестве обратной связи с учениками использую Google Диск для размещения дополнительных материалов большого объема и аккумуляции выполненных заданий от учащихся, а также Googleclass, платформу Эффор, Якласс и др.

Описанные популярные сервисы помогут учителю добиться эффективной организации работы сайта в смешанном обучении (рис.2).

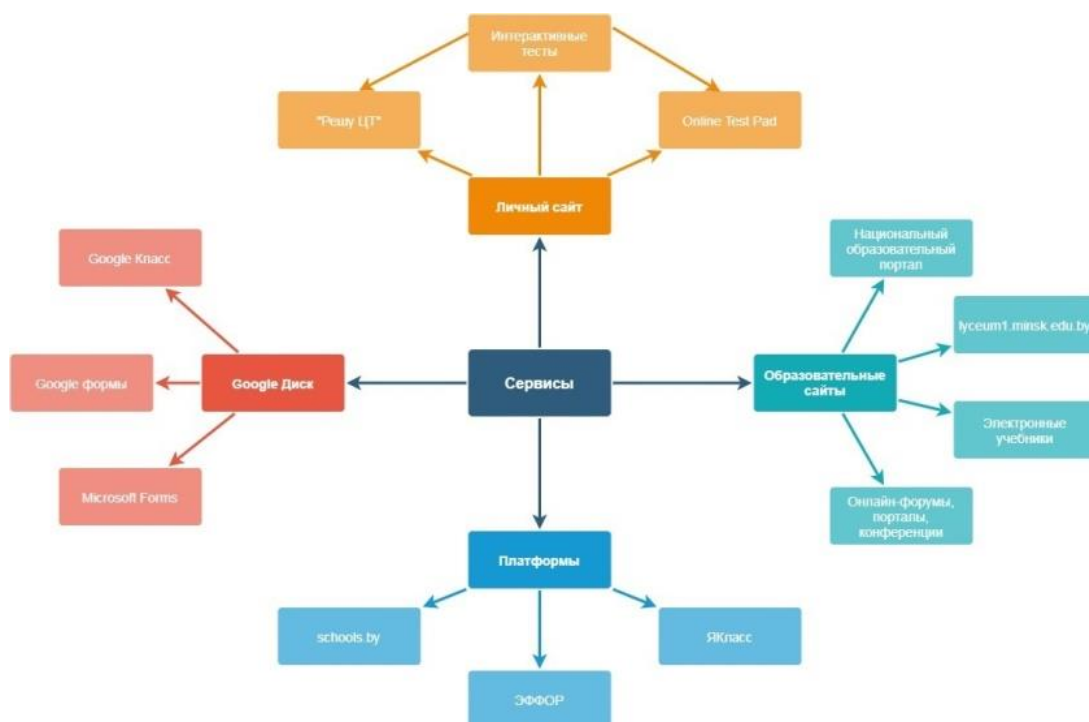


Рис. 2. Интеграция сайта с внешними сервисами

После создания сайта работа только начинается. Разумеется, он не должен оставаться статичным, сообщая только о своем существовании. Теперь данный образовательный сайт – средство достижения поставленных целей и задач; он должен быть динамичным и результативным, его необходимо обновлять и пополнять новой информацией. На данном этапе <http://badak-school-by.tilda.ws> находится на стадии разработки, но в дальнейшем сайт планируется сделать интерактивным, что создаст возможность управления образовательным процессом. Интерактивности можно добиться, установив форму обратной связи, форум, блок комментариев, блог, онлайн связь через различные сервисы и платформы.

### Библиографические ссылки

1. Запрудский Н. И. Моделирование и проектирование авторских дидактических систем: пособие для учителя. Минск, 2008.
2. Родионова И. А. Личный сайт педагога как одно из условий успешной педагогической деятельности [Электронный ресурс] // Современная педагогика. 2017. № 5. URL: <http://pedagogika.snauka.ru/2017/05/7129> (дата обращения 10.04.2020).
3. Полное описание возможностей Tilda Publishing [Электронный ресурс]. URL: <https://tilda.cc/ru/features/> (дата обращения 05.02.2020).

# ВНЕДРЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕСТИРОВАНИЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

**К. Д. Булавская, Н. В. Фролова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
feelingblue@gmail.com, nadya.frolova0024@gmail.com;  
науч. рук. – Ю. В. Позняк, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В данной публикации нами рассматривается проблема разработки курса по теоретической механике, который предполагает большое количество материала и отведение большого количества времени на самостоятельную работу учащихся. В данном случае использование дистанционных технологий позволяет не тратить время на элементарные задания закрытого типа, а сосредоточиться на более сложных задачах. В связи с этим актуальность данного исследования очевидна.

**Ключевые слова:** дистанционное обучение; Moodle; электронный курс; тестирование; теоретическая механика.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является разработка комплекса тестовых заданий в среде Moodle для организации контроля знаний по теоретической механике на основе Учебно-методического комплекса. [1]

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1. Изучить технологию дистанционного обучения;
2. Изучить структуру системы дистанционного обучения Moodle;
3. Создать банк тестовых заданий на основе карточек Учебно-методического комплекса;
4. Разработать и апробировать электронный ресурс «Тестирование по теоретической механике» в среде Moodle.

Объектом разработки является электронный курс на базе программного обеспечения Moodle, размещенной на технической площадке «Портал смешанного и дистанционного обучения БГУ».

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанный дистанционный электронный курс может применяться в обучении студентов дисциплине «Теоретическая механика».



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Под дистанционным обучением (ДО) понимается учебный процесс, при котором все или часть учебных занятий осуществляется с использованием современных информационных технологий при территориальной разобщенности преподавателя и студентов.

Анализ отечественной и зарубежной теории и практики позволил отметить характерные особенности ДО. Среди них:

- Модульность. Возможность формировать учебный план, отвечающий индивидуальным и групповым потребностям обучающихся.
- Гибкость. Обучающиеся занимаются в удобное для себя время, в удобном месте и темпе.
- Дальнодействие. Расстояние от места нахождения обучающегося до образовательного учреждения не влияет на качество образовательного процесса. [2]

В нынешней ситуации в связи с пандемией более 1,5 миллиарда учащихся вузов и школ вынужденно перешли на дистанционное обучение впервые за всю историю, подобрав для так называемые системы управления обучением (LMS – Learning Management System).

В качестве среды разработки нами был выбран Moodle – аббревиатура от Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment (модульная объектно-ориентированная динамическая учебная среда). Он является одним из самых популярных открытых систем, которую в БГУ установили для каждого факультета, предоставив отдельные виртуальные машины. Система используется в десятках тысяч учебных заведений в 245 странах мира и переведена на 82 языка. Более 200 миллионов преподавателей и студентов по всему миру используют Moodle для обучения. [5]

Компьютерное тестирование – это средство, которое позволяет с минимальными затратами времени преподавателя объективно проверить знание большого количества студентов.

Рассмотренные информационные технологии были апробированы на примере 140 тестовых заданий различного уровня сложности по статике, кинематике, динамике точки и системы для дисциплины «Теоретическая механика».

Модуль для проведения тестов в Moodle – один из самых сложных и интенсивно используемых. Многообразие возможных вариантов использования и внутреннего устройства тестов обуславливает некоторую сложность организации тестовых заданий.

Для эффективной работы с тестами все тестовые задания в рамках одного курса объединяются в банк вопросов, а отдельные тесты являются лишь

контейнерами, которые заполняются ссылками на банк вопросов. Таким образом, создание теста в Moodle состоит из следующих этапов:

- Создание теста как контрольной работы (определение таких атрибутов как дата начала, окончания, лимит времени и др.)
- Разработка тестовых заданий и внесение их в банк вопросов.
- Наполнение теста заданиями из банка вопросов и определение его внутренней структуры. [3]

Банк тестовых заданий (банк вопросов) в Moodle отделён от тестов: в банке вопросов находятся все тестовые задания курса, в то время как тесты ссылаются на отдельные вопросы из банка. Такая важная функция как создание иерархической структуры банка вопросов (категорий, подкатегорий) предоставляется только системой Moodle.

Работа над тестом начинается с заполнения банка вопросов тестовыми заданиями. Для наполнения теста заданиями используется специальный «конструктор», который отображается сразу после создания теста. После того, как тест будет пройден хотя бы одним студентом, преподавателю будет доступна страница с результатами тестирования с подробным отчётом. [6]

Составление тестов как совокупности тестовых заданий связано с соблюдением определенных правил, которые предполагают ясность и лаконичность формулировки заданий, сочетание различных их видов. Одним из компонентов тестовых заданий рассматривается иллюстрация как средство наглядности.

Для задач, требующих дополнительных построений, была выбрана динамическая среда GeoGebra. [4] Для выполнения статических изображений был выбран онлайн-сервис Figma, используемый дизайнерами для разработки интерфейсов и прототипирования. Фильтр "Формулы в формате TeX" преобразовывает выражения TeX в изображения в формате GIF.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе работы над курсовым проектом нами был создан электронный курс «Теоретическая механика» на платформе Moodle, в рамках которого разработаны 29 тестов. Каждый тест состоит из 5-6 тестовых заданий различного уровня сложности (рис. 1).

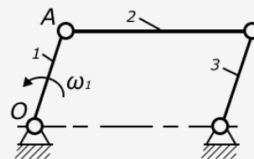
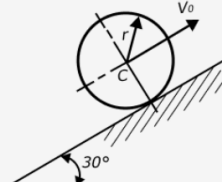
<p><b>Вопрос 4</b> Пока нет ответа Балл: 8,00 Отметить вопрос Редактировать вопрос</p>	<p>Кривошип 1 шарнирного параллелограмма вращается равномерно с угловой скоростью <math>\omega_1 = 5 \text{ рад/с}</math>. Определить модуль главного вектора внешних сил, действующих на звено 2, если его масса <math>m = 8 \text{ кг}</math>, длина <math>OA = 0,4 \text{ м}</math>.</p>  <p>Ответ: <input type="text"/></p>
<p><b>Вопрос 5</b> Пока нет ответа Балл: 10,00 Отметить вопрос Редактировать вопрос</p>	<p>Однородный диск массой <math>m</math> и радиуса <math>r</math> катится без скольжения по наклонной плоскости вверх. В начальный момент времени скорость центра диска <math>V_0 = 4 \text{ м/с}</math>. Определить путь, пройденный центром <math>C</math> диска до остановки.</p>  <p>Ответ: <input type="text"/></p>

Рис. 1. Пример тестовых заданий

Разработанный комплекс тестовых заданий по курсу «Теоретическая механика» в СДО Moodle предполагается внедрить в учебный процесс на кафедре теоретической механики БГУ для тестирования по данному курсу студентов специальности «Механика и математическое моделирование».

### Библиографические ссылки

1. Вярвьильская О. Н., Медведев Д. Г. Учебно-методический комплекс по учебной дисциплине Теоретическая механика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/31516>. – Дата доступа: 24.02.2020.
2. Дистанционное образование – одно из направлений информатизации вуза // Российско-американский форум образования: электронный журнал 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusameeduforum.com/content/ru/?task=art&article=1000858&iid=10>. – Дата доступа: 29.04.2020.
3. Кравченко, Г.В. Работа в системе Moodle: руководство пользователя // Учебное пособие [Текст] / Г.В. Кравченко, Н.В. Волженина. – Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2012. – 123 с.
4. Официальный сайт программы GeoGebra [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geogebra.org>. – Дата доступа: 03.05.2020.
5. Costello E. Opening up to open source: Looking at how Moodle was adopted in higher education, Open Learning // The Journal of Open, Distance and e-Learning. 2013. V. 28. № 3. P. 187-200.
6. MoodleDocs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.moodle.org/ru/>. – Дата доступа: 02.05.2020.

# ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ С АППАРАТНЫМ КЛЮЧОМ В ВЕБ-РАЗРАБОТКЕ

**Д. В. Иванов**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
d.ivanov1243@gmail.com;  
науч. рук. – Е. В. Кремень, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В данной статье рассмотрим двухфакторную аутентификацию, а также особенности двухфакторной аутентификации с аппаратным ключом. Определим, как преимущества предоставляет использования такого способа аутентификации для обычных пользователей и для бизнеса. Рассмотрим применение аппаратного ключа в веб-разработке в связке с программной средой Node.js.

**Ключевые слова:** защита данных; двухфакторная аутентификация; аппаратный ключ; Node.js.

Защита пользовательских данных – далеко не новая проблема. Наиболее уязвимыми являются данные аутентификации, ведь насколько эффективными бы не были методы шифрования хранимых и передаваемых данных, такие методы окажутся бесполезными, как только будет скомпрометирован логин и пароль.

Для усиления степени защиты используется двухфакторная аутентификация – комбинация из пароля и ключа-подтверждения. Наиболее часто используемые методы двухфакторной аутентификации работают по номеру телефона или электронной почте. Такие методы предоставляют больший уровень безопасности, чем однофакторная аутентификация, однако все еще могут быть подвержены фишингу и могут быть неудобны в ряде ситуаций (например, подтверждение по номеру телефона, когда вы находитесь в роуминге).

Более безопасным вариантом многофакторной аутентификации является аппаратный ключ – небольшое устройство, оснащенное криптопроцессором и интерфейсом Bluetooth, NFC или USB. Аппаратный ключ является быстрым и надежным способом защитить пользовательские данные. Такой способ защиты подойдет для людей, работающих с конфиденциальной и личной информацией, таких как администраторы баз данных, системные администраторы, сетевые администраторы и администраторы безопасности, разработчики приложений, сотрудники, работающие с финансами, топ-менеджеры и сотрудники отдела кадров.

Аппаратный ключ позволяет улучшить безопасность как устаревших, так и современных способов многофакторной аутентификации, таких как FIDO2 или WebAuth. Аппаратный ключ использует микрочип для генера-

ции секретных ключей и такой алгоритм генерации не может быть скопирован или украден удаленно, что делает его наилучшим решением для привилегированных пользователей.

Фишинг – один из способов добычи персональных данных, логины и пароли зачастую являются главными мишенями таких атак. По данным Google [3], 68% фишинговых атак (рис. 1) – новые вариации писем, никогда не наблюдаемых ранее, из чего можно сделать вывод что такой тип угроз продолжает расти и развиваться.

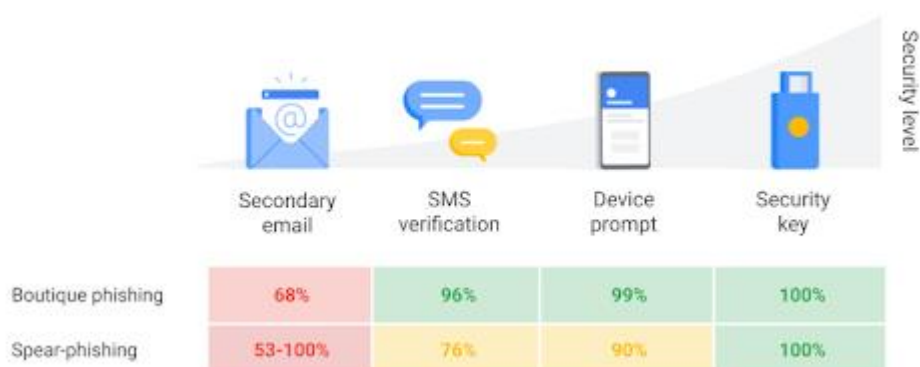


Рис. 1. Степень защиты различных методов двухфакторной аутентификации

Аппаратные ключи надежно защищают от таких угроз и предоставляют самый надежный способ защиты от захвата аккаунтов путем таргетированных фишинг-атак. Даже в случае, когда персональные данные скомпрометированы, защиту аппаратным ключом не получится обойти, так как учетные данные привязаны к реальному сайту и новая кодовая комбинация генерируется при каждой новой попытке авторизации.

От использования аппаратного ключа могут выиграть разные типы пользователей. Компании могут снизить затраты на обслуживание аккаунтов в случае утери или кражи данных авторизации. Исходя из отчета компании Yubico за 2019 год, от 20% до 50% звонков в службу поддержки представляли из себя запросы на сброс пароля [4]. Такие запросы могут обходиться компаниям в среднем по \$70 за каждый. Использование аппаратных ключей значительно снижает необходимость обслуживания паролей.

Обычные пользователи, также могут воспользоваться преимуществами аппаратных ключей, крупные платформы на аппаратных ключах поддерживают двухфакторную аутентификацию на многих платформах, куда входят социальные сети (Facebook, Twitter, Instagram), все сервисы Google (Google Диск, Gmail, YouTube), менеджеры паролей, прочие почтовые клиенты и облачные хранилища. Также поддерживается аутентификация в системах Windows, MacOS и Linux.

Многие производители предоставляют API и SDK для интеграции аппаратных ключей в приложения для персональных компьютеров, мобильных устройств, а также веб-сервисы, поддерживая языки Python, Java и C [1].

### Применение ключа Yubikey в WEB на примере Node.js

В данном случае двухфакторная аутентификация была реализована при помощи библиотеки «yubikey-client» [2]. Ключ Yubikey позволяет реализовать как подтверждаемую онлайн, так и оффлайн аутентификацию используя OTP (одноразовый пароль). Ключ может использоваться как для подтверждения пользовательской сессии, так и для выполнения различных чувствительных к атакам действий.

```
{
  t: '2013-08-31T07:13:27Z0111',
  otp: 'cccaccbtbvkwjjirhcctvdgbahdbijduldcjdurgjgfi',
  nonce: '50fb8a88a327b4af16e6e7bd9ec4e4e6c692f2e5',
  sl: '25',
  status: 'OK',
  signatureVerified: true,
  nonceVerified: true,
  identity: 'cccaccbtbvkw',
  serial: 123456,
  valid: true
}
```

Рис. 2. Пример данных yub.verify библиотеки yubikey-client

Для онлайн-аутентификации сервис должен быть зарегистрирован в сервисе Yubico, с получением API ключа. При онлайн-аутентификации клиент-модуль считывает секретную комбинацию аппаратного ключа, затем комбинация передается на сервер, а затем на сервер Yubico для подтверждения. При оффлайн-авторизации параметр nonceVerified (рис. 2) всегда равен false, что означает что сгенерированный ключ не был подтвержден сервером Yubico.

Таким образом, аппаратный ключ предоставляет повышенный уровень защиты пользовательских данных и большую простоту использования по сравнению с другими методами двухфакторной аутентификации, позволяет уменьшить затраты на обслуживание пользовательских аккаунтов для больших компаний и унифицировать способ авторизации для обычных пользователей без потери степени безопасности.

### **Библиографические ссылки**

1. Yubico Developers [Electronic resource]. URL: <https://developers.yubico.com/> (date of access: 12.05.2020).
2. Yubikey-client – npm [Electronic resource]. URL: <https://www.npmjs.com/package/yubikey-client> (date of access: 12.05.2020).
3. Google Online Security Blog: Understanding why phishing attacks are so effective and how to mitigate them [Electronic resource]. URL: <https://security.googleblog.com/2019/08/understanding-why-phishing-attacks-are.html> (date of access: 12.05.2020).
4. The 2019 State of Password and Authentication Security Behaviors Report [Electronic resource]. URL: <https://www.yubico.com/wp-content/uploads/2019/01/Ponemon-Authentication-Report.pdf> (date of access: 12.05.2020).

# АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ

А. Д. Пашкевич

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

*angelinapd98@gmail.com*

*науч. рук. – О. А. Лаврова, канд. физ.-мат. наук*

В данной статье строятся и изучаются агентные модели движения птиц в стае с глобальным и локальным контролем агентами динамически изменяющейся среды. Одна из моделей реализуется на основе комбинации агентного подхода для описания движения птиц и численного решения краевой задачи для задания градиентного поля в среде агентной модели. Предложены две агентные модели, основанные на использовании агентами-птицами только локальной информации из своей области видимости в среде. Новизна результатов состоит в добавлении в среду агентной модели препятствий, положение которых изменяется со временем, и агента-лидера, ведущего агентов-птиц на облет препятствий. Результаты статьи могут быть использованы для дальнейшего изучения механизмов адаптации в мультиагентных автономных системах.

**Ключевые слова:** агентное моделирование; локальные правила поведения; динамически изменяющаяся среда; градиентное поле.

Агентное моделирование систем основано на описании локальных правил поведения участников системы (агентов) и последующей эмуляции этих поведений на микроуровне для получения закономерностей поведения исходной системы на макроуровне. Кроме локальных правил поведения агентов в модели может быть определено глобальное управление с помощью градиентного поля для моделирования поведения системы в динамически изменяющейся среде [1].

В статье изучаются агентные модели движения птиц в стае. В классической модели каждая птица является агентом, регулирующим свое движение в направлении других агентов, находящихся в области видимости исходного агента. В частности, для классической модели определены следующие локальные правила поведения, общие для всех агентов: разделение (избегание столкновений с агентами-соседями), выравнивание (ориентация движения на среднее направление агентов-соседей), сплоченность (ориентация на среднюю позицию агентов-соседей) [2].

## АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ С ГЛОБАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ СРЕДЫ

Модель движения стаи птиц в среде с препятствиями является усложнением классической модели. В среде новой агентной модели создаются области-препятствия, столкновения с которыми агенты должны избегать.



Градиентное поле, описывающее среду, можно построить, решив задачу Дирихле для уравнения Лапласа в области среды  $\Omega$ :

$$\begin{cases} \Delta u = 0, \\ u|_{\partial\Omega} = 0, \\ u|_{\partial\Omega^{(1)}(t) \cup \partial\Omega^{(2)}(t)} = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где области  $\Omega^{(1)}(t)$  и  $\Omega^{(2)}(t)$  представляют собой препятствия, расположенные внутри среды  $\Omega$  и изменяющие свое положение в зависимости от времени  $t$ . Краевая задача **Ошибка! Источник ссылки не найден.** в каждый момент времени  $t$  численно решается с помощью метода конечных элементов средствами библиотеки FEniCS в Python [3]. Расчетная сетка при некотором значении времени  $t$  представлена на рис. 1. Численно полученное градиентное поле приведено на рис. 2. Таким образом, если агент находится в точке, где значения градиента от функции  $u(x, y)$  увеличивается, то агент близок к препятствию и, возможно, движется в его направлении.

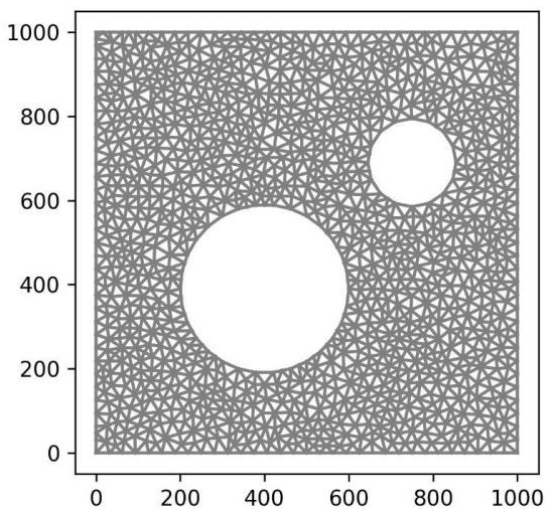


Рис. 1. Расчетная сетка для численного решения задачи **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

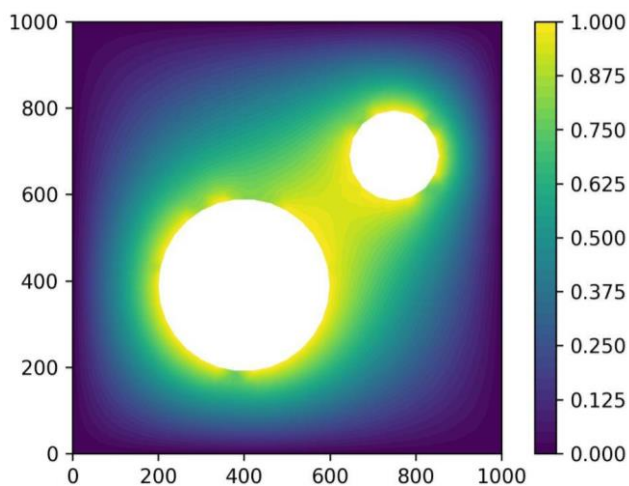


Рис. 2. Градиентное поле решения задачи **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Каждый агент в соответствии с правилами локального поведения классической модели регулирует направление своего движения. Если же дополнительно агент расположен вблизи препятствия, то его направление пересчитывается по правилу предотвращения столкновения:

1. вычисляется вектор градиентного поля  $grad(x, y)$  в точке  $(x, y)$  расположения агента, и нормируется:  $\vartheta = (\vartheta_x, \vartheta_y) := \frac{grad(x, y)}{\|grad(x, y)\|}$ ;

2. вычисляются два касательных направления к препятствию в точке, где расположен агент:  $tangent_1 := (\vartheta_y, -\vartheta_x)$ ,  $tangent_2 := (-\vartheta_y, \vartheta_x)$ ;

3. пусть  $heading$  является вектором направления, выбранным по правилам локального поведения; тогда из двух направлений касательных выбирается то, которое составляет наименьший угол с подсчитанным направлением: если  $\langle tangent_1, \frac{heading}{\|heading\|} \rangle \geq \langle tangent_2, \frac{heading}{\|heading\|} \rangle$ , то  $tangent := tangent_1$ , иначе  $tangent := tangent_2$ ;

4. вычисляется новый вектор направления агента  $heading := 0,9tangent - 0,1 \frac{grad(x,y)}{\|grad(x,y)\|}$  для избегания захождения в область препятствия при высокой скорости.

Расчеты с градиентным полем требуют больших вычислительных затрат, так как на каждом временном шаге необходимо решать краевую задачу **Ошибка! Источник ссылки не найден.** с новыми условиями. Под новыми условиями понимается изменение положений областей-препятствий, на которых задаются граничные условия.

### АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ С ЛОКАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ СРЕДЫ

В агентной модели с локальным контролем среды у агентов сохраняются правила поведения из классической модели и добавляется новое правило предотвращения столкновения с препятствием. Локальные правила поведения позволяют агенту выбрать направление движения без последующего столкновения на основании локальной информацией о расположении агентов-соседей и о наличии препятствий в области видимости. Таким образом, после выбора направления движения в соответствии с правилами локального поведения агент выполняет следующие действия:

1. агент-птица анализирует, есть ли препятствия в области его видимости; если препятствий нету, то направление движения, вычисленное по классическим локальным правилам поведения, не изменяется;

2. если в зоне видимости агента-птицы обнаружено препятствие, то вычисляется вектор между координатой центра препятствия  $(bx, by)$  и координатой  $(x, y)$ , в которой находится агент-птица, и нормируется:  $\vartheta = (\vartheta_x, \vartheta_y) := \frac{(dx, dy)}{\|(dx, dy)\|}$ , где  $dx = bx - x, dy = by - y$ ;

3. вычисляется нормальное направление к полученному в п. 2 вектору и нормируется:  $norm := \frac{(-\vartheta_y, \vartheta_x)}{\|(-\vartheta_y, \vartheta_x)\|}$ ;

4. пусть  $heading$  является вектором направления, выбранным по правилам локального поведения; вычисляется новый вектор направления

агента  $heading := 0,03heading + (1 - 0,03)norm$  для избегания попадания в область препятствия при высокой скорости; новый вектор направления нормируется.

## АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ С ЛОКАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ СРЕДЫ И АГЕНТОМ-ЛИДЕРОМ

В новой агентной модели контроль среды производится на локальном уровне и появляется агент-лидер. У агентов-птиц сохраняются правила поведения из классической модели и модели с локальным контролем. При этом добавляется правило ориентации на агента-лидера, которое позволяет агенту следовать за агентом-лидером, если он находится в зоне его видимости. После выбора направления движения в соответствии с правилами локального поведения агент выполняет следующие действия:

1. агент-птица анализирует, есть ли агент-лидер в области его видимости; если агента-лидера нету, то вычисленное ранее направление движения не изменяется;

2. если в зоне видимости агента-птицы обнаружен агент-лидер, то вводится декартова система координат на плоскости с началом координат в точке расположения агента-лидера и направлением оси абсцисс, совпадающим с направлением вектора скорости агента-лидера;

3. если во введенной системе координат агент-птица имеет координату  $(x, y)$  и расположен позади агента-лидера, т.е.  $y < 0$ , то скорость агента-птицы уменьшается и:

1. если  $x > 0$ , то угол направления изменяется на значение  $+\frac{\pi}{2}$ ,

2. если  $x < 0$ , то угол направления изменяется на значение  $-\frac{\pi}{2}$ ;

4. если во введенной системе координат агент-птица идет наравне с агентом-лидером или обгоняет его, т.е. у агента-птицы координата  $y \geq 0$ , то угол направления движения агента-птицы полагается равным соответствующему углу агента-лидера;

5. если скорость агента-лидера больше скорости агента-птицы, то скорость агента-птицы увеличивается, иначе уменьшается по правилу:  $v := (1 + \alpha)v$ , где  $\alpha = -0,06$ , если скорость нужно уменьшить, и  $\alpha = 0,06$ , если скорость нужно увеличить.

Далее агент-птица выполняет действия по правилам предотвращения столкновения с препятствием, описанным в предыдущем разделе.

Добавление в систему агента-лидера является дополнительным механизмом для адаптивного поведения агентной системы. Агент-лидер может быть использован для моделирования задач целевого поведения системы, таких как облет препятствий, преследование объектов или достижение системой заданного положения в пространстве.

### Библиографические ссылки

1. *Goldenstein S.* Scalable dynamical systems for multi-agent steering and simulation / S. Goldenstein [et al.] // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Seoul, South Korea, May 21–26 2001), 2001. Vol. 4. P. 3973–3980.  
DOI: 10.1109/ROBOT.2001.933237.
2. *Reynolds C. W.* Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model // Computer Graphics. 1987. Vol. 21. P. 25–34. DOI: 10.1145/37402.37406.
3. *Alnaes M. S.* The FEniCS Project Version 1.5 / M. S. Alnaes [et al.] // Archive of Numerical Software. 2015. Vol. 3, № 100. P. 9–23. DOI: 10.11588/ans.2015.100.20553.

# ДИДАКТИКА В ПИРИНГОВОМ ОБУЧЕНИИ МАТЕМАТИКИ

У. В. Соловей

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*salaveiulyana@gmail.com;*

*науч. рук. – Н. В. Бровка, д-р пед. наук, канд. физ.-мат. наук, проф.*

В статье рассматриваются вопросы, связанные с внедрением пирингового метода обучения в математическое обучение, а также возможности использования пирингового метода в обучении математике с точки зрения принципов дидактики. Отмечается важность сочетания пирингового обучения в очном и дистанционном обучении.

**Ключевые слова:** пиринговое обучение, информационные образовательные технологии, пиринговое оценивание, дистанционное обучение, дидактика электронного обучения, массовые открытые онлайн-курсы

Современная общеобразовательная школа и университет в настоящее время вынуждена организовывать новую образовательную математическую среду, которая отвечает на вызовы системной цифровизации, охватившей в последнее время все сферы нашей жизни, и особенно сейчас во время обостренной эпидемиологической обстановки в мире.

Активное использование пиринговой формы обучения преподавателями престижных университетов, таких как Гарвард (Harvard), Стэнфорд (Stanford) и Корнелл (Cornell) указывает на ее высокую эффективность и актуальность в наше время.

Пиринговое (англ. peer – сверстник, коллега) обучение является учебной практикой, в которой учащиеся взаимодействуют с другими учащимися для достижения образовательных целей» [2].

Термин «пирингового обучения» имеет несколько определений.

Бесплатные массовые онлайн курсы без преподавателя, например на платформах *Coursera*, *P2PU*, *Udacity*, *Stepik*, *My Mocc* и *Khan Academy*, главным принципом которых является образование в сотрудничестве – «peer-to-peer» или сокращённо P2P (англ. – «на равных») [1].

Метод взаимодействия коллег, которое должно быть взаимовыгодным и включать обмен знаниями, идеями и опытом между участниками для достижения образовательных целей. [3]

Пиринговое обучение имеет своё особое место в дидактике обучения математике и ярко выражено в следующих принципах (рис.1):

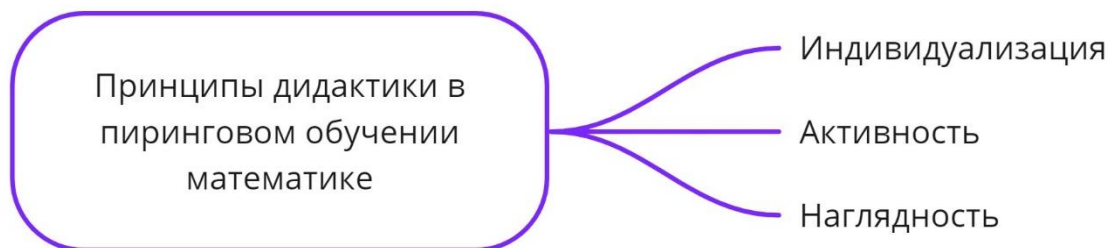


Рис. 1. Преобладающие принципы в пиринговом обучении математики

В пиринговом обучении необходимо учитывать, что основой является активность обучения в специфической мыслительной деятельности определенной математической структуры. Принцип активного обучения в пиринговом методе обеспечивается за счет следующих способов взаимодействия между учащимися: консультирование, наставничество и объяснение друг другу. Примером практического применения этого принципа можно наблюдать на образовательных курсах *Coursera* ([www.coursera.org](http://www.coursera.org)) и *Stepik* ([welcome.stepik.org](http://welcome.stepik.org)), на платформах организовали форумы для обсуждения учебных задач. Особенность форума на *Stepik* в том, что там можно задавать вопросы об условии или решении задачи, но нельзя спрашивать ответ или отвечать ответом на задачу. Особенность *Coursera* в том, что там можно самостоятельно формировать на форуме учебные группы для обсуждения любых вопросов и задач в течение курса. В начале обучения многие авторы курсов сами рекомендуют данные группы, потому что вдумчивое чтение форума и участие в обсуждениях помогает в решении неоднозначных вопросов на зачётах.

Возможности пирингового обучения в мультимедийных технологиях помогают сделать уроки математики максимально наглядными. Такие задания можно найти на платформе *ЯКласс* ([www.yaklass.by](http://www.yaklass.by)) интегрированных с фирмой *1С:Школа* (<https://obr.1c.ru>), которая занимается разработкой образовательных мультимедийных продуктов не только для школьников, но и для высшей школы.

Например, рассмотрим исследовательскую задачу на платформе *ЯКласс*. В начале можно скрыть условия задачи от обучающихся и предложить понаблюдать за ситуацией. В данном случае (рис.2) мы меняем количество секторов, разбивающих круг, и замечаем, что изображение внизу всё больше приближается к изображению параллелограмма. Затем мы предлагаем ученикам подумать как это можно использовать и какие выводы можно сделать. Далее открываем условие задачи и сравниваем ответы с первоначальным условием.

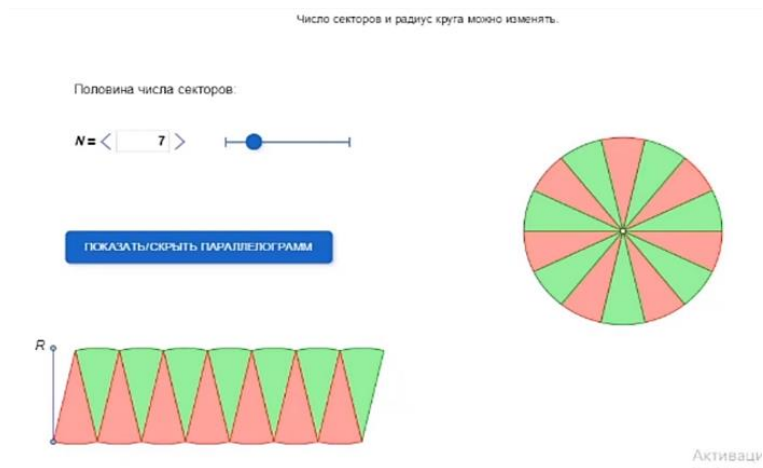


Рис. 2. Исследовательская задача

Пиринговое обучение не ограничивается работой на самом занятии, но также возможно и при выполнении учениками домашней работы. Во время проверки домашних заданий друг друга, у учащихся есть возможность научиться делать самостоятельные выводы, приобрести умение анализировать, систематизировать и применять знания в новой ситуации при решении исследовательских задач или выполнения проектов, что делает обучение математике более индивидуальным и эффективным.

Дистанционное и пиринговое обучение опираются на одинаковые электронные средства (образовательные платформы, тестирующие системы, электронные тренажеры, мультимедийные ресурсы и т.д.) для организации учебного процесса. Одно из основных особенностей онлайн-курсов – отсутствие живого общения с преподавателем (рис 3).

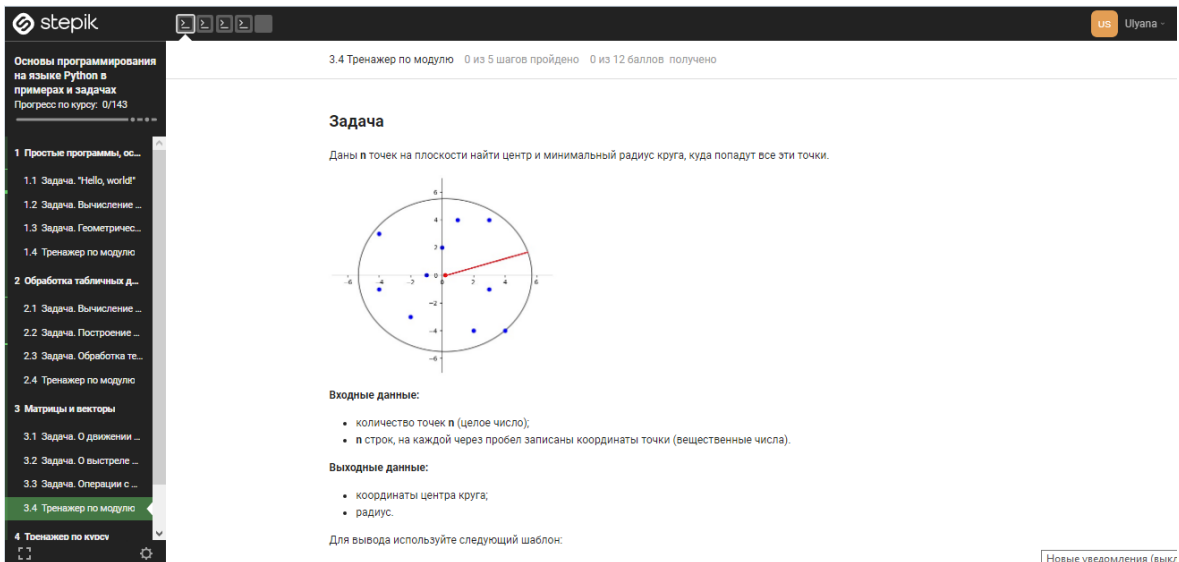


Рис. 3. Платформа Stepik

Ввиду того, что это массовые онлайн курсы, а они проходят без преподавателей, учащиеся не могут рассчитывать на конструктивное общение с

автором курса один на один, поэтому лучше полагаться только на форумы и помощь коллег-студентов. В дистанционном образовательном процессе руководит педагог или учитель. Однако не нужно забывать, что работа в дистанционном формате не является очным обучением. Ввиду специфики обучения математике, применение пирингового обучения в дистанционном особенно эффективно. В таком случае обучаемый учится рассуждать и обсуждать свои умозаключения с одноклассниками, сочетать интеллектуальную, практическую и оценочную деятельность, а также воспринимает ее как самообучение, саморазвитие, самоактуализацию.

Таким образом, пиринговое обучение – дидактически обоснованный метод обучения, который способствует более активному, наглядному и индивидуальному обучению, в частности, математике. Учащиеся будут с большей заинтересованностью и мотивацией изучать математические законы, теоремы, аксиомы и решать задачи. Благодаря гибкости и высокой адаптивности метода, сфера его применения очень широкая. Его можно использовать не только как самостоятельную форму обучения, но также применять в очной и дистанционной форме для повышения эффективности и качества обучения.

#### **Библиографические ссылки**

1. Информационно-коммуникационные технологии в образовании Хабаровского края – 2015: опыт, проблемы и перспективы // Материалы XIII краевой научно-практической конференции / Под общ. ред. Николаевой М.А., Семеновы С.В., Поповой Е.В. – Хабаровск: ХК ИРО, 2015.
2. *O'Donnell A. M. Cognitive perspectives on peer learning / O'Donnell, A. M. & King, A. (Eds.). – The Rutgers Invitational Symposium On Education Series. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1999. – 376 p.*
3. *Boud D., Cohen R., Sampson J. Peer Learning in Higher Education: Learning from & with Each Other, edited / David Boud, Ruth Cohen, Jane Sampson. – Published by Kogan Page Limited, UK and Stylus Publishing Inc., USA, 2001.*



## О СВОЙСТВАХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ, СВЯЗАННЫХ С УРАВНЕНИЯМИ ПЕНЛЕВЕ

**В. В. Сорокина**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*viktoriasorokina.96@gmail.com;*

*науч. рук. – В. И. Громак, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Рассматривается уравнение шестого порядка обобщенной иерархии второго уравнения Пенлеве. Исследования проводятся в рамках задач аналитической теории дифференциальных уравнений: анализа специальных полиномов, определяющих рациональные решения иерархии второго уравнения Пенлеве. В работе получены рациональные решения уравнения шестого порядка обобщенной иерархии второго уравнения Пенлеве; построены преобразования Беклунда; получены и проанализированы первые полиномы Яблонского-Воробьева для рассматриваемого уравнения; проведен анализ о количестве полюсов рациональных решений уравнения и их вычетах и на его основе сформулированы 2 теоремы.

**Ключевые слова:** полиномы Яблонского-Воробьева; обобщенная иерархия второго уравнения Пенлеве; преобразование Беклунда; число полюсов рациональных решений и их вычетов.

В общей теории обыкновенных дифференциальных уравнений важное место занимает теория уравнений Пенлеве и их высших аналогов, поскольку данный раздел позволяет провести анализ прикладных нелинейных систем со свойством Пенлеве.

Шесть уравнений Пенлеве (PI–PVI) были впервые обнаружены приблизительно в начале двадцатого века Пенлеве, Гамбье и их коллегами при исследовании нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. В последнее время проявляется значительный интерес к уравнениям Пенлеве, главным образом благодаря факту, что они возникают как сокращения солитонных уравнений, которые разрешимы с помощью обратного рассеяния.

Уравнения Пенлеве могут рассматриваться как нелинейные аналоги классических специальных функций. Они имеют иерархии рациональных решений и однопараметрические семейства решений, выражаемых через классические специальные функции. Кроме того, уравнения Пенлеве допускают симметрии относительно аффинных групп Вейля, которые связаны с преобразованиями Беклунда.

Для рациональных решений возникает задача представления их через специальные полиномы. Для иерархии второго уравнения Пенлеве – это полиномы Яблонского-Воробьева.

В процессе выполнения работы рассматривалась связь полиномов Яблонского-Воробьева, их структуры и числа полюсов рациональных решений, а также их вычетов.

Цель данной работы – развить подход построения и анализа специальных полиномов, определяющих рациональные решения уравнения шестого порядка обобщенной иерархии второго уравнения Пенлеве.

## ПОЛИНОМЫ ЯБЛОНСКОГО-ВОРОБЬЕВА И РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим уравнение шестого порядка обобщенной иерархии второго уравнения Пенлеве [1]

$$\begin{aligned} \tilde{P}_2^{[6]} \equiv w^{(6)} = & 2w^2(5(\beta_1 + \beta_2)w'' + 7w^4) - w^{(4)}(\beta_1 + \beta_2) - \beta_1\beta_2w'' + \\ & + w(z + 10(\beta_1 + \beta_2)(w')^2 + 42(w'')^2 + 56w'(w')^3) + 70w''((w')^2 - \\ & - w^4) + 2w^3(\beta_1\beta_2 - 70(w')^2) - 6w^5(\beta_1 + \beta_2) + 20w^7 + \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

Полиномы Яблонского-Воробьева для (1) имеют структуру [2]

$$\begin{aligned} P^{[3]}(z) &= P_1^1 Q_1^0 P_2^3 Q_2^1 P_3^6 Q_3^3, \\ Q^{[3]}(z) &= P_1^0 Q_1^1 P_2^1 Q_2^3 P_3^3 Q_3^6. \end{aligned} \quad (2)$$

Первые несколько полиномов Яблонского-Воробьева имеют вид

$$\begin{aligned} Q_0^{[3]}(z) &= 1, \\ Q_1^{[3]}(z) &= z, \\ Q_2^{[3]}(z) &= z^3 + 4\beta_1\beta_2, \\ Q_3^{[3]}(z) &= z^6 + 20z^3\beta_1\beta_2 - 144z(\beta_1 + \beta_2) - 80\beta_1^2\beta_2^2. \end{aligned}$$

Корни в зависимости от значений параметров представлены на рис.1.

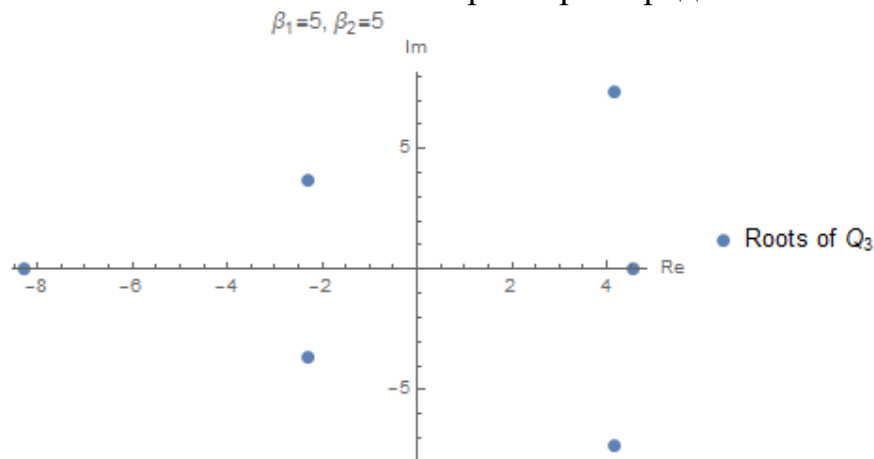


Рис.1. Корни  $Q_3$  полинома

Рациональные решения уравнения (1) могут быть представлены при помощи полиномов Яблонского-Воробьева [3]

$$w_n^{[3]}(z) = \frac{(Q_{n-1}(z))'}{Q_{n-1}(z)} - \frac{(Q_n(z))'}{Q_n(z)}.$$

Несколько рациональных решений уравнения (1)

$$w^{[3]}(z, 0, \beta_1, \beta_2) = 0,$$

$$w^{[3]}(z, 1, \beta_1, \beta_2) = -\frac{1}{z},$$

$$w^{[3]}(z, 2, \beta_1, \beta_2) = \frac{1}{z} - \frac{3z^2}{z^3 + 4\beta_1\beta_2}.$$

### О ЧИСЛЕ ПОЛЮСОВ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ И ИХ ВЫЧЕТАХ

Рассмотрим серию В-полиномов, определяемых рекуррентным соотношением

$$B_n^{[3]}(\beta) = \frac{1}{k_n} \text{Resultant}[Q_{n-1}(z), Q_n(z), z], B_0^{[3]} = 1, n = 1, 2, \dots$$

где  $k_n \neq 0$  – нормирующие постоянные,  $\alpha = n$ .

Если  $\alpha = n \in \mathbf{Z}$ , а для параметра  $\beta$  выполнено условие  $B_{|n|}(\beta) \neq 0$ , то рациональное решение  $w(z, n, \beta)$  уравнения (1) не имеет полюсов с вычетом из множества  $\{\pm 2, \pm 3\}$ , при этом справедливо распределение

$$l_1^+ = \frac{1}{2}\alpha(\alpha - 1), l_1^- = \frac{1}{2}\alpha(\alpha + 1), l_k^\pm = 0, k \in \{2, \dots, N\}. \quad (3)$$

#### Теорема (о характере полюсов).

Пусть  $B_n = 0$  для некоторых  $\beta_1^0, \beta_2^0$ . Тогда  $\exists z_0$ , что  $Q_n(z_0) = Q_{n-1}(z_0) = 0$ . При этом, исходя из структуры полиномов Яблонского-Воробьева (2), возможен только один из следующих случаев:

1.  $z_0$  – трехкратный корень  $Q_2$  и простой корень  $Q_3$ ;
2.  $z_0$  – простой корень  $Q_2$  и трехкратный корень  $Q_3$ ;
3.  $z_0$  – трехкратный корень  $Q_2$  и шестикратный корень  $Q_3$ ;
4.  $z_0$  – шестикратный корень  $Q_2$  и трехкратный корень  $Q_3$ .

В первом случае  $z_0$  является полюсом для  $w(z)$  с вычетом  $+2$ , во втором – полюсом с вычетом  $-2$ , в третьем – полюсом с вычетом  $-3$ , в четвертом – полюсом с вычетом  $-3$ .

Пользуясь теоремой о равенстве нулю суммы вычетов в расширенной комплексной плоскости и разложением в окрестности бесконечно удаленной точки, имеем

$$\sum_{k=1}^3 k(l_k^+ - l_k^-) = -\alpha. \quad (4)$$

Также справедлива следующая формула

$$\sum_{k=1}^3 k^2 (l_k^+ + l_k^-) = \alpha^2. \quad (5)$$

### **Теорема-уточнение (о числе полюсов).**

Для  $\alpha = 3$ , пользуясь формулами (4) и (5), а также теоремой о характере полюсов, имеем один из следующих случаев:

1.  $l_3^- = 1, l_1^- = l_1^+ = l_2^- = l_2^+ = l_3^+ = 0$ ;
2.  $l_1^- = 5, l_2^+ = 1, l_1^+ = l_2^- = l_3^- = l_3^+ = 0$ ;
3.  $l_1^+ = 1, l_2^- = 2, l_1^- = l_2^+ = l_3^- = l_3^+ = 0$ ;
4.  $l_1^- = 3, l_1^+ = 2, l_2^- = 1, l_2^+ = l_3^- = l_3^+ = 0$ ;
5.  $l_1^- = 6, l_1^+ = 3, l_2^+ = l_2^- = l_3^- = l_3^+ = 0$ .

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты работы могут быть использованы для исследования числа полюсов рациональных решений высших аналогов уравнения Пенлеве и их вычетов, а также найти применение в аналитической теории дифференциальных уравнений, при решении задач теоретической и математической физики и построении математических моделей в теории нелинейных колебаний и квантовой теории поля. Сформулированную теорему и ее уточнение можно обобщить для всей модифицированной иерархии второго уравнения Пенлеве.

### **Библиографические ссылки**

1. *Gromak V.I.*, On solutions of Painlevé equations of higher orders, in *Analytic Methods of Analysis and Differential Equations // Theses of International Science Seminar*, September 11–14, 2012, Minsk, Ed. by Rogozin, S.V., p. 27.
2. *Gromak V.I. and Zenchenko A.S.*, On the theory of higher-order Painlevé equations // *J. Differential Equations*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 625–633.
3. *Clarkson P.A. and Mansfield E.L.*, The second Painlevé equation, its hierarchy and associated special polynomials // *Nonlinearity*, 2003, vol. 16, no. 3, pp. R1–R26.
4. *Gromak V.I., Laine I., and Shimomura S.*, Painlevé Differential Equations in the Complex Plane // *De Gruyter Studies in Mathematics*, Vol. 28, Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2002.
5. *Airault H.*, Rational solutions of Painlevé equations // *Stud. Appl. Math.*, 1979, vol. 61, no. 1, pp. 31–53.

# ДОСТАТОЧНАЯ КОРРЕКТНОСТЬ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Спесивцева К.А.

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*ksenia.spesivtseva@gmail.com*;  
 науч. рук. – Ф. Е. Ломовцев, д-р физ.-мат. наук, проф.

Найдены достаточные условия корректности по Адамару однозначной и устойчивой везде разрешимости смешанной задачи для волнового уравнения при характеристических вторых косых производных в пространствах решений высокой гладкости.

**Ключевые слова:** характеристические вторые производные, гладкое решение.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В первой четверти плоскости  $\mathcal{G}_\infty$  решается смешанная задача

$$u_{tt}(x,t) + (a_1 - a_2)u_{xt}(x,t) - a_1 a_2 u_{xx}(x,t) = f(x,t), \quad (x,t) \in \mathcal{G}_\infty = (0, +\infty) \times (0, +\infty), \quad (1)$$

$$u(x,t)|_{t=0} = \varphi(x), \quad u_t(x,t)|_{t=0} = \psi(x), \quad x > 0, \quad (2)$$

$$\Gamma(t)u \equiv [\zeta(t)u_{tt} + \xi(t)u_{xt} + \theta(t)u_{xx} + \alpha(t)u_t + \beta(t)u_x + \gamma(t)u]|_{x=0} = \mu(t), \quad t > 0. \quad (3)$$

Пусть  $C^k(\Omega)$  – множество  $k$  раз непрерывно дифференцируемых функций на подмножестве  $\Omega$  плоскости  $R^2$ .

**Определение 1.** Функция  $u \in C^m(G_\infty)$ ,  $G_\infty = [0, +\infty) \times [0, +\infty)$ , называется *гладким* ( $m$  раз непрерывно дифференцируемым) решением смешанной задачи (1)–(3), если она удовлетворяет уравнению (1) на  $\mathcal{G}_\infty$  в обычном смысле, а начальным условиям (2) и граничному режиму (3) в смысле пределов соответствующих выражений от ее значений  $u(x,t)$  во внутренних точках  $(x,t) \in \mathcal{G}_\infty$  для всех указанных граничных точек  $x$  и  $t$ .

## УСЛОВИЯ СОГЛАСОВАНИЯ

Для задачи (1)–(3) справедливы достаточные условия согласования граничного режима (3) с начальными условиями (2) и уравнением (1):

$$Y_{k+1} \equiv \sum_{i=0}^k Z_{i,k} = \mu^{(k)}(0), \quad k \in [0, m-1], \quad m \geq 2, \quad (4)$$

$$Z_{i,k} \equiv \frac{k!}{i!(k-i)!} \left\{ S_{i,k} + \alpha^{(k-i)}(0)A_i + \beta^{(k-i)}(0)B_i + [\eta_i \alpha^{(k-i)}(0) + \eta_{i-1} \beta^{(k-i)}(0)] \varphi^{(i+1)}(0) + \right.$$

$$\left. + [\rho_i \alpha^{(k-i)}(0) + \rho_{i-1} \beta^{(k-i)}(0)] \psi^{(i)}(0) + \gamma^{(k-i)}(0) [D_i + \eta_{i-1} \varphi^{(i)}(0) + \rho_{i-1} \psi^{(i-1)}(0)] \right\},$$

$$S_{i,k} = \zeta^{(k-i)}(0) \left\{ f^{(0,i)}(0,0) + (a_2 - a_1)Z_i + (a_2 - a_1)a_2^i [a_1 \varphi^{(i+2)}(0) + \psi^{(i+1)}(0)] \right\} +$$

$$+\xi^{(k-i)}(0)\{\Xi_i + a_2^i[a_1\varphi^{(i+2)}(0) + \psi^{(i+1)}(0)]\}, i \in [0, k], k \in [0, m-1],$$

где слагаемые  $A_i, B_i, D_i, Z_i, \Xi_i$  и коэффициенты  $\rho_j, \eta_j$  имеют вид:

$$A_i = \sum_{s=1}^i \rho_{s-1} f^{(s-1, i-s)}(0, 0), \quad i \geq 1, \quad A_0 = 0, \quad B_i = \sum_{s=1}^{i-1} \rho_{s-1} f^{(s, i-s-1)}(0, 0), \quad i \geq 2, \quad B_0 = B_1 = 0,$$

$$D_i = \sum_{s=1}^{i-1} \rho_{s-1} f^{(s-1, i-s-1)}(0, 0), \quad i \geq 2, \quad D_0 = D_1 = 0, \quad Z_i = \sum_{s=1}^i a_2^{s-1} f^{(s, i-s)}(0, 0), \quad i \geq 1, \quad Z_0 = 0,$$

$$\Xi_i = \sum_{s=1}^i a_2^{s-1} f^{(s, i-s)}(0, 0), \quad i \geq 1, \quad \Xi_0 = 0,$$

$$\rho_j = (a_2 - a_1)\rho_{j-1} + a_1 a_2 \rho_{j-2}, \quad j \geq 1, \quad \rho_{-1} = 0, \quad \rho_0 = 1, \quad \rho_1 = a_2 - a_1,$$

$$\eta_j = (a_2 - a_1)\eta_{j-1} + a_1 a_2 \eta_{j-2}, \quad j \geq 1, \quad \eta_{-1} = 1, \quad \eta_0 = 0, \quad \eta_1 = a_1 a_2.$$

Теперь возьмем  $m = 2n$  – четные числа для всех целых  $n \in N$ . Тогда для всех правых частей  $f \in C^{m-1}(G_\infty)$  выражение  $S_{m-1, m-1}$  при  $\varphi = \psi = 0$  равно

$$K_m \equiv \|\mathbf{V}_1\| \frac{\partial f^{(0, m-2)}(0, 0)}{\partial \mathbf{V}_1} + \{(a_2 - a_1)\zeta(0) + \xi(0)\} \|\mathbf{V}_2\| \frac{\partial}{\partial \mathbf{V}_2} \left[ \sum_{s=1}^{(m/2)-1} a_2^s f^{(2s, m-2s-2)} \right] (0, 0) \in R, \quad (5)$$

где  $\partial \mathbf{g}(0, 0) / \partial \mathbf{V}_l$  – значения производных по векторам  $\mathbf{V}_l$  в начале координат  $(0, 0)$ ,  $\|\mathbf{V}_l\|$  – длины векторов  $\mathbf{V}_1 = \{(a_2 - a_1)\zeta(0) + \xi(0), \zeta(0)\}$  и  $\mathbf{V}_2 = \{a_2, 1\}$ .

**Определение 2.** Если существует конечный предел  $K_m$  суммы (5) по всем функциям  $f \in C^{m-1}(G_\infty)$ , которые сходятся к менее гладким функциям  $f \in C^{m-2}(G_\infty)$ , удовлетворяющим следующему требованию гладкости

$$a_2 \xi(t) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \int_0^t f(a_2(t-\tau), \tau) d\tau \right] + \\ + \theta(t) \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{a_1 - a_2}{a_1} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_0^t f(a_2(t-\tau), \tau) d\tau \right] - f(0, t) \right\} \in C^{m-2}(R_+), \quad R_+ = [0, +\infty), \quad (6)$$

то этот предел  $K_m$  называется *критериальным* значением старших производных от  $f$  в условиях согласования (4) при  $m = 2n$  для целых  $n \in N$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика  $x = a_1 t$  делит первую четверть  $G_\infty$  плоскости  $R^2$  на  $G_- = \{(x, t) \in G_\infty : x > a_1 t > 0\}$  и  $G_+ = \{(x, t) \in G_\infty : 0 \leq x \leq a_1 t\}$ . Используем частные классические решения неоднородного уравнения (1) в  $\mathcal{G}_\infty$  из работы [1]:

$$F_i(x, t) = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ \int_0^{t_i(x)} \int_{x_i(t, \tau)}^{x+a_2(t-\tau)} f(s, \tau) ds d\tau + \int_{t_i(x)}^t \int_{x-a_1(t-\tau)}^{x+a_2(t-\tau)} f(s, \tau) ds d\tau \right], \quad (7)$$

где  $t_i(x) = (-1)^i [t - (x/a_1)]$  и  $x_i(t, \tau) = [1 - (-1)^i ((a_2/a_1) + 1)](x - a_1 t) - a_2 \tau$ ,  $i = 1, 2$ .

Введем следующие обозначения

$$L(y) = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ a_1 \varphi(y) + a_2 \varphi(0) + \int_0^y \psi(s) ds \right], M(t) = \Gamma(t) [L(x + a_2 t) + F_2(x, t)].$$

**Теорема.** Пусть в граничном режиме (3) коэффициенты  $\zeta, \xi, \theta, \alpha, \beta, \gamma \in C^{m-1}(R_+)$ , нехарактеристические первые косые производные, т. е.  $a_1 \alpha(t) \neq \beta(t)$ ,  $t \in R_+$ , и характеристические вторые косые производные [2], т. е.  $a_1^2 \zeta(t) - a_1 \xi(t) + \theta(t) \equiv 0$ ,  $t \in R_+$ . Тогда смешанная задача (1)–(3) на  $\mathcal{G}_\infty^\&$  при  $m = 2n$ ,  $n \in N$ , имеет единственное и устойчивое по  $f, \varphi, \psi, \mu$  решение  $u \in C^m(G_\infty)$  для тех данных  $f, \varphi, \psi, \mu$ , которые имеют гладкость:

$$f \in C^{m-2}(G_\infty), \varphi \in C^m(R_+), \psi \in C^{m-1}(R_+), \mu \in C^{m-1}(R_+), \quad (8)$$

$$\int_0^t f(x + a_2(t - \tau), \tau) d\tau \in C^{m-1}(G_\infty), \quad (9)$$

$$[1 - (-1)^i (a_2/a_1 + 1)] \int_0^{t_i(x)} f(x_i(t, \tau), \tau) d\tau + \int_{t_i(x)}^t f(x - a_1(t - \tau), \tau) d\tau \in C^{m-1}(G_\infty), i = 1, 2, \quad (10)$$

$$[(a_2 - a_1)\zeta(t) + \xi(t)]\varphi^{(m+1)}(a_2 t), [(a_2 - a_1)\zeta(t) + \xi(t)]\psi^{(m)}(a_2 t) \in C(R_+) \quad (11)$$

и выполняются условия согласования (4) при  $m = 2n$ ,  $n \in N$ , с критериальным значением  $K_m$  из (5) для старших производных от правой части  $f \in C^{m-2}(G_\infty)$ , удовлетворяющей требованию гладкости (6). Этим гладким решением  $u \in C^m(G_\infty)$  задачи (1)–(3) на  $\mathcal{G}_\infty^\&$  является функция:

$$u_-(x, t) = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ a_1 \varphi(x + a_2 t) + a_2 \varphi(x - a_1 t) + \int_{x - a_1 t}^{x + a_2 t} \psi(s) ds + \int_0^t \int_{x - a_1(t - \tau)}^{x + a_2(t - \tau)} f(s, \tau) ds d\tau \right], (x, t) \in G_-,$$

$$u_+(x, t) = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ a_1 \varphi(x + a_2 t) + a_2 \varphi(0) + \int_0^{x + a_2 t} \psi(s) ds \right] +$$

$$+ a_1 \int_0^{t_2(x)} e^{a_1 \int_{t_2(x)}^{\rho} \frac{\gamma(v)}{a_1 \alpha(v) - \beta(v)} dv} \frac{\mu(\rho) - M(\rho)}{a_1 \alpha(\rho) - \beta(\rho)} d\rho + F_2(x, t), (x, t) \in G_+. \quad (12)$$

**Схема доказательства.** Формулы (12) единственного гладкого решения  $u \in C^m(G_\infty)$  задачи (1)–(3) на  $\mathcal{G}_\infty^\&$  очевидно совпадают с формулами единственного классического решения  $u \in C^2(G_\infty)$  этой задачи из [3]:  $u_-$  – решение задачи Коши (1), (2) на  $G_-$ , а  $u_+$  – решение задачи Пикара (1), (3) и равенства  $u_+ = u_-$  для  $x = a_1 t$  на  $G_+$ .

Показывается достаточность требований гладкости (8)–(10) для  $m$  раз непрерывной дифференцируемости функций  $u_-$  на  $G_-$  и  $u_+$  на  $G_+$ . Необходимость и достаточность интегральных требований гладкости (9), (10) на  $f \in C^{m-2}(G_\infty)$  для  $m$  раз непрерывной дифференцируемости функций (7) на  $G_\infty$  устанавливается аналогично тому, как это сделано для частных классических решений (7) неоднородного уравнения (1) на  $G_\infty$  в [1].

Для начальных данных  $\varphi \in C^m(R_+)$ ,  $\psi \in C^{m-1}(R_+)$  из (8) необходимая гладкость (11) из [3] очевидно достаточна для существования ограниченных слагаемых  $[(a_2 - a_1)\zeta(0) + \xi(0)]\varphi^{(m+1)}(0)$ ,  $[(a_2 - a_1)\zeta(0) + \xi(0)]\psi^{(m)}(0) \in R$  в выражении  $S_{m-1,m-1}$  условий согласования (4) при всех  $m \geq 2$ .

Выражаются значения частных производных до порядка  $m \geq 2$  включительно от разности функций  $u_+$  и  $u_-$  на характеристике  $x = a_1 t$  через значения разностей  $Y_{k+1} - \mu^{(k)}(0)$ ,  $k \in [0, m-1]$ . С помощью критериального значения  $K_m$  отсюда выводится  $m$  раз непрерывная дифференцируемость  $u_+$  и  $u_-$  на  $x = a_1 t$  из условий согласования (4) при четных  $m = 2n$ ,  $n \in N$ .

Устойчивость решения  $u_-$  в  $G_-$  и  $u_+$  в  $G_+$  по соответствующим нормам банаховых пространств гладкого решения и соответствующих исходных данных  $f$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\mu$  непосредственно выводится из формул (12).

**Замечания.** Определение характеристических вторых косых производных в граничном режиме (3) дано в статье [2]. Критериальное значение  $K_m$  при  $m = 2$  из сформулированной выше теоремы становится производной  $f'_{v_1}(0,0)$  по вектору  $v_1^1$  от  $f$  в  $(0,0)$  из критерия корректности в [3]. Отсюда мы взяли название значения  $K_m$  для четных  $m = 2n$ ,  $n \in N$ . Ясно, что при  $m > 2$  существование конечного предела не суммы  $K_m$  производных по векторам  $v_1^1$  и  $v_2^1$  для  $(0,0)$  вида (5), а обеих из них в отдельности служит лишь достаточным требованием корректности задачи (1)–(3).

#### Библиографические ссылки

1. Ломовцев Ф. Е. Метод корректировки пробных решений общего волнового уравнения в первой четверти плоскости для минимальной гладкости его правой части. // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. № 3. С. 38–52.
2. Ломовцев Ф. Е., Лысенко В. В. Нехарактеристическая смешанная задача для одномерного волнового уравнения в первой четверти плоскости при нестационарных граничных вторых производных. // Веснік Віцеб. дзярж. ун-та. 2019. № 3. С. 5–17.
3. Спесивцева К. А., Ломовцев Ф. Е. Критерий корректности начально-краевой задачи для общего волнового уравнения при характеристических вторых производных в нестационарном граничном условии. // XIX Межд. научн. конф. по дифференциальным уравнениям (еругинские чтения-2019), Могилев, 14–17 мая 2019 г. / БРУ / Материалы Межд. научн. конф. Минск : 2019. Ч. 2. С. 34–36.



# ГЛАДКИЕ РЕШЕНИЯ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ПЕРВОЙ КОСОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Устилко Е.В.

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
ustilko@tut.by;  
науч. рук. – Ф. Е. Ломовцев, д-р физ.-мат. наук, проф.

Выведен критерий корректности (по Адамару) смешанной задачи для одномерного волнового уравнения с характеристической первой косою производной в нестационарном граничном режиме для решений целых высших порядков гладкости.

**Ключевые слова:** смешанная задача, нестационарное граничное условие, характеристическая первая косою производная, критерий корректности.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В первой четверти плоскости  $\mathcal{G}_\infty$  решается смешанная задача

$$u_{tt}(x,t) + (a_1 - a_2)u_{xt}(x,t) - a_1a_2u_{xx}(x,t) = f(x,t), \quad (x,t) \in \mathcal{G}_\infty = (0, +\infty) \times (0, +\infty), \quad (1)$$

$$u(x,t)|_{t=0} = \varphi(x), \quad u_t(x,t)|_{t=0} = \psi(x), \quad x > 0, \quad (2)$$

$$\Gamma(t)u \equiv [\alpha(t)(u_t + a_1u_x) + \gamma(t)u]|_{x=0} = \mu(t), \quad t > 0. \quad (3)$$

Пусть  $C^k(\Omega)$  – множество  $k$  раз непрерывно дифференцируемых функций на подмножестве  $\Omega$  плоскости  $R^2$ .

**Определение 1.** Функция  $u \in C^m(G_\infty)$ ,  $G_\infty = [0, +\infty) \times [0, +\infty)$ , называется гладким ( $m$  раз непрерывно дифференцируемым) решением смешанной задачи (1)–(3), если она удовлетворяет уравнению (1) на  $\mathcal{G}_\infty$  в обычном смысле, а начальным условиям (2) и граничному режиму (3) в смысле пределов соответствующих выражений от ее значений  $u(x,t)$  во внутренних точках  $(x,t) \in \mathcal{G}_\infty$  для всех указанных граничных точек  $x$  и  $t$ .

## УСЛОВИЯ СОГЛАСОВАНИЯ

Для задачи (1)–(3) следующие условия согласования граничного режима (3) с начальными условиями (2) и уравнением (1) выведены в [1]:

$$J_1 \equiv \alpha(0)[\psi(0) + a_1\varphi'(0)] + \gamma(0)\varphi(0) = \mu(0),$$

$$J_2 \equiv \alpha'(0)[\psi(0) + a_1\varphi'(0)] + \gamma'(0)\varphi(0) +$$

$$+\alpha(0)\langle a_2[\psi'(0) + a_1\phi''(0)] + f(0,0) \rangle + \gamma(0)\psi(0) = \mu'(0),$$

$$\begin{aligned} J_{q+1} \equiv & \alpha^{(q)}(0)[\psi(0) + a_1\phi'(0)] + \gamma^{(q)}(0)\phi(0) + q \left\{ \alpha^{(q-1)}(0) \langle a_2[\psi'(0) + a_1\phi''(0)] + f(0,0) \rangle + \right. \\ & \left. + \gamma^{(q-1)}(0)\psi(0) \right\} + \sum_{i=2}^q C_q^i \left\{ \alpha^{(q-i)}(0) \left\langle a_2^i [\psi^{(i)}(0) + a_1\phi^{(i+1)}(0)] + \sum_{j=0}^{i-1} a_2^j f^{(j;i-j-1)}(0,0) \right\rangle + \right. \\ & \left. + \gamma^{(q-i)}(0) \left\langle a_2 \frac{a_2^{i-1} - (-a_1)^{i-1}}{a_1 + a_2} [\psi^{(i-1)}(0) + a_1\phi^{(i)}(0)] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{k=0}^{i-2} \frac{a_2^{k+1} - (-a_1)^{k+1}}{a_1 + a_2} f^{(k;i-k-2)}(0,0) + (-a_1)^{i-1} \psi^{(i-1)}(0) \right\rangle \right\} = \mu^{(q)}(0), \quad q = 2, 3, \dots, m. \quad (4) \end{aligned}$$

Рассмотрим внимательно сумму, которая присутствует в (4) при  $q = m$  :

$$K_m \equiv \sum_{j=0}^{m-1} a_2^j f^{(j;m-j-1)}(0,0) \quad (5)$$

Для всех правых частей  $f \in C^{m-1}(G_\infty)$  выражение (5) конечно.

**Определение 2.** Если существует конечный предел  $K_m$  суммы (5) по всем функциям  $f \in C^{m-1}(G_\infty)$ , которые сходятся к менее гладким функциям  $f \in C^{m-2}(G_\infty)$ , удовлетворяющим следующему требованию гладкости

$$\alpha(t) \frac{\partial^m}{\partial t^m} \left( \int_0^t f(a_2(t-\tau), \tau) d\tau \right) \in C(R_+), \quad R_+ = [0, +\infty), \quad (6)$$

то этот предел  $K_m$  называется *критериальным* значением старших производных от  $f$  в условиях согласования (4) при  $q = m$  для целых  $m \in N$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Уравнение (1) в плоскости  $R^2$  переменных  $x, t$  имеет два различных семейства характеристик:  $x - a_1t = C_1$ ,  $x + a_2t = C_2$ ,  $\forall C_1, C_2 \in R$ . Первая четверть плоскости  $G_\infty$  делится характеристикой  $x = a_1t$  на два множества  $G_- = \{(x, t) \in G_\infty : x > a_1t > 0\}$  и  $G_+ = \{(x, t) \in G_\infty : 0 \leq x \leq a_1t\}$ . Из работы [2] мы используем частные решения неоднородного уравнения (1) в  $\mathcal{G}_\infty$  :

$$F_i(x, t) = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ \int_0^{t_i(x)} \int_{x_i(t, \tau)}^{x+a_2(t-\tau)} f(s, \tau) ds d\tau + \int_{t_i(x)}^t \int_{x-a_1(t-\tau)}^{x+a_2(t-\tau)} f(s, \tau) ds d\tau \right],$$

где  $t_i(x) = (-1)^i [t - (x/a_1)]$  и  $x_i(t, \tau) = [1 - (-1)^i ((a_2/a_1) + 1)](x - a_1t) - a_2\tau$ ,  $i = 1, 2$ .

**Теорема 1.** Пусть в граничном режиме (3) коэффициенты  $\alpha, \gamma \in C^m(R_+)$  для целых  $m \geq 2$ ,  $\gamma(t) \neq 0$ ,  $t \in R_+$ . Для того чтобы смешанная задача (1)–(3) в  $\mathcal{G}_\infty$  имела единственное и устойчивое по  $\varphi, \psi, \mu, f$  решение  $u \in C^m(G_\infty)$ , необходимо и достаточно условий гладкости (6),

$$f \in C^{m-2}(G_\infty), \varphi \in C^m(R_+), \psi \in C^{m-1}(R_+), \quad (7)$$

$$\int_0^t f(x + a_2(t - \tau), \tau) d\tau \in C^{m-1}(G_\infty), \quad (8)$$

$$\left[1 - (-1)^i (a_2 / a_1 + 1)\right] \int_0^{t_i(x)} f(x_i(t, \tau), \tau) d\tau + \int_{t_i(x)}^t f(x - a_1(t - \tau), \tau) d\tau \in C^{m-1}(G_\infty), i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\mu \in C^m(R_+), \alpha(t)\varphi^{(m+1)}(a_2 t), \alpha(t)\psi^{(m)}(a_2 t) \in C(R_+), \quad (10)$$

выполняются условия согласования (4) с критериальным значением  $K_m$  из (5) для старших производных от правой части  $f \in C^{m-2}(G_\infty)$ , удовлетворяющей требованию гладкости (6). Этим гладким решением  $u \in C^m(G_\infty)$  характеристической задачи (1)–(3) на  $\mathcal{G}_\infty$  является функция:

$$\begin{aligned} u_-(x, t) &= \frac{1}{a_1 + a_2} \left[ a_1 \varphi(x + a_2 t) + a_2 \varphi(x - a_1 t) + \int_{x - a_1 t}^{x + a_2 t} \psi(s) ds \right] + \\ &+ \frac{1}{a_1 + a_2} \int_0^t \int_{x - a_1(t - \tau)}^{x + a_2(t - \tau)} f(s, \tau) ds d\tau, \quad (x, t) \in G_-, \\ u_+(x, t) &= \frac{1}{a_1 + a_2} \left\{ a_1 \left[ \varphi(x + a_2 t) - \varphi\left(a_2 \left(t - \frac{x}{a_1}\right)\right) \right] + \int_{a_2(t - x/a_1)}^{x + a_2 t} \psi(s) ds \right\} + \\ &+ F_2(x, t) + \gamma^{-1} \left(t - \frac{x}{a_1}\right) \left\{ \mu\left(t - \frac{x}{a_1}\right) - \alpha\left(t - \frac{x}{a_1}\right) \left[ a_1 \varphi'\left(a_2 \left(t - \frac{x}{a_1}\right)\right) + \psi\left(a_2 \left(t - \frac{x}{a_1}\right)\right) \right] - \right. \\ &\left. - \alpha\left(t - \frac{x}{a_1}\right) \int_0^{t - x/a_1} f\left(a_2(t - \tau) - \frac{a_2}{a_1} x, \tau\right) d\tau \right\}, \quad (x, t) \in G_+. \quad (11) \end{aligned}$$

**Идея доказательства.** Формулы (11) единственного гладкого решения  $u \in C^m(G_\infty)$  смешанной задачи (1)–(3) на  $\mathcal{G}_\infty$  очевидно совпадают с формулами единственного классического решения  $u \in C^2(G_\infty)$  этой задачи при  $m = 2$  в [3]:  $u_-$  – решение задачи Коши (1), (2) на  $G_-$ , а  $u_+$  – решение задачи Пикара (1), (3) с равенством  $u_+ = u_-$  на характеристике  $x = a_1 t$  в  $G_+$ .

Из самой постановки смешанной задачи (1)–(3) и определения 1 гладких решений  $u \in C^m(G_\infty)$  вытекают очевидные необходимые требования гладкости (7). Доказывается необходимость и достаточность требований

гладкости (6), (8)–(10) для  $m$  раз непрерывной дифференцируемости функций  $u_-$  на  $G_-$  и  $u_+$  на  $G_+$ . Процесс доказательства во многом похож на доказательство аналогичных требований для выше поставленной характеристической смешанной задачи при  $m = 2$  в [3].

Выражаются значения частных производных всех целых порядков до порядка  $m \geq 2$  включительно от разности функций  $u_+$  и  $u_-$  на критической характеристике  $x = a_1 t$  через значения разностей  $\mu^{(k)}(0) - J_{k+1}$ ,  $k \in [0, m]$ . Используя критериальные значения  $K_m$  из определения 2, отсюда выводится  $m$  раз непрерывная дифференцируемость функций  $u_+$  и  $u_-$  на прямой  $x = a_1 t$  из условий согласования (4) граничного данного  $\mu$  с начальными данными  $\varphi$ ,  $\psi$  и правой частью  $f$  уравнения (1).

Устойчивость решения  $u_-$  на  $G_-$  и  $u_+$  на  $G_+$  в соответствующем банаховом пространстве гладкого решения  $u \in C^m(G_\infty)$  и произведении соответствующих банаховых пространств исходных данных  $f$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\mu$  непосредственно можно установить из формул (11). Нормы этих банаховых пространств классического решения и исходных данных смешанной задачи (1)–(3) для  $m = 2$  имеются в статье [3].

**Замечание.** В нашей теореме 1 критериальные значения  $K_m$  при всех чётных  $m = 2, 4, 6, \dots$ , фактически равны значениям

$$K_m = \alpha(0) \sqrt{a_2^2 + 1} \frac{\partial}{\partial v_2} \left( \sum_{j=0}^{(m-2)/2} a_2^{2j} f^{(2j; m-2j-2)} \right) (0, 0), \quad m = 2, 4, 6, \dots,$$

производной по вектору  $v_2 = \{a_2, 1\}$  от указанных в круглых скобках сумм частных производных порядка  $m-2$  от правой части  $f$  в начале координат  $(0, 0)$  с общим множителем  $\alpha(0) \sqrt{a_2^2 + 1}$ .

### Библиографические ссылки

1. Устилко Е. В. Условия согласования значений характеристической кривой производной на конце струны, начальных данных и правой части волнового уравнения. / Е. В. Устилко, Ф. Е. Ломовцев // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2020. № 1. С. 30–37.
2. Ломовцев Ф. Е. Метод корректировки пробных решений общего волнового уравнения в первой четверти плоскости для минимальной гладкости его правой части. // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. № 3. С. 38–52.
3. Ломовцев Ф. Е. Критерий корректности смешанной задачи для общего уравнения колебаний полуограниченной струны с нестационарной характеристической первой кривой производной в граничном условии. / Ф. Е. Ломовцев, Е. В. Устилко // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2018. № 4 (101). С. 18–28.

# ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

---

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СОКРЫТИЯ ТЕКСТОВОЙ РЕКЛАМЫ В ДИНАМИЧЕСКОМ ВИДЕОПОТОКЕ

**И. И. Бакун**

*Белорусский государственный университет, г. Минск  
ilyabakun@gmail.com*

*науч. рук. – В. А. Образцов, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В современном мире реклама может являться мощным орудием в различных сферах жизни. Поэтому нужно уметь контролировать её поток.

Цель данной работы – разработать систему, способную распознать текстовую рекламу в видеопотоке и скрыть её.

Идеи, применяемые при разработке этой системы, будут полезны в решении задачи поиска и распознавания текста на изображении. Об актуальности этой проблемы говорит тот факт, что на данный момент лучшие системы поиска – OCR-программы (англ. Optical Character Recognition) – работают только с изображениями документов, что позволяет делать некоторые допущения: белый фон и чёрный текст, довольно хорошее качество изображений, приоритет точности над скоростью работы – все они не приемлемы для нашей задачи.

Также система может применяться в задачах фильтрации спама, так как одним из способов обхода текстовых классификаторов для него на данный момент является отправка писем с рекламой, размещенной внутри прикрепленного изображения.

В данной статье рассмотрены основные этапы работы системы и приведены алгоритмы для их решения, а также произведен её анализ.

**Ключевые слова:** реклама; видеопоток; распознавание текста; сокрытие рекламы; обработка изображений; классификатор рекламы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Поскольку видеопоток представим в виде последовательности изображений, то для каждого из них можно рассмотреть задачу поиска и сокрытия рекламы.

Для решения этой задачи можно выделить следующие этапы:

1. Предварительная обработка изображения;
2. Распознавание текста на изображении;
3. Распознавание рекламы среди текста;
4. Сокрытие рекламы.

Рассмотрим каждый из этапов.

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

На этом этапе необходимо улучшить качество поступающего на вход изображения. Основными причинами ухудшения качества изображений являются шум и неравномерное освещение.

Для устранения шума вида «соль-перец» (самый распространённый вид шума) используются фильтры. Однако у них есть уязвимость – они размывают контуры объектов изображений, что может ухудшить качество распознавания. Поэтому в нашей системе применим их модификацию, которая несёт минимальные потери четкости картинки с хорошим удалением шума – адаптивный медианный фильтр. Этот вид фильтров вызывается только для зашумленных пикселей. В статье [1] приведено несколько таких фильтров и произведен их анализ.

Для решения проблемы неравномерного освещения выбран алгоритм Retinex, который устраняет как глобальные, так и локальные области с проблемным освещением и имеет низкую чувствительность к шуму.

## **РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕКСТА НА ИЗОБРАЖЕНИИ**

На данном этапе необходимо в поступающем на вход изображении найти области с текстом, их локализовать и распознать. Выделим и кратко опишем этапы для решения данной задачи.

## **ПОИСК ОБЛАСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ТЕКСТ, ЕГО ЛОКАЛИЗАЦИЯ**

Для решения задач поиска объектов применяются так называемые методы «скользящего окна». Суть их в том, что берут прямоугольники различных размеров (окна) и проходят ими по всему изображению, проверяя, является ли часть, ограниченная каждым прямоугольником, искомым объектом. Данный процесс очень затратен по времени. Поэтому мы попытаемся сначала ограничить число окон-кандидатов. Для этого воспользуемся алгоритмом Edge Boxes. Он работает с контурами на изображении и вычисляет по ним вероятности нахождения объекта внутри каждого окна. Сам алгоритм с соответствующими формулами описан в статье [2]. Из-за несложных вычислений алгоритм является быстрым, но выделяет много лишних областей. Поэтому, после ограничения количества окон-кандидатов для регрессии неверных областей в системе применяется классификатор Random Forest, основанный на деревьях принятия решений с использованием гистограммы направленных градиентов [3].

## **БИНАРИЗАЦИЯ ЛОКАЛИЗИРОВАННОЙ ОБЛАСТИ**

Бинаризация изображения поможет нам убрать лишнюю информацию и ускорить работу системы. Для этого используем один из самых эффективных алгоритмов для преобразования изображения в черно-белое – метод Отсу. Этот алгоритм сам подбирает порог бинаризации для каждого изображения, основываясь на дисперсии между классами черных и белых пикселей.

## **СЕГМЕНТАЦИЯ ТЕКСТА НА СТРОКИ, СЛОВА И СИМВОЛЫ**

Когда получено локализованное изображение текста, надо его разбить на строки, слова и символы. Одним из лучших решений этой задачи является алгоритм Docstrum, основанный на методах связных компонент и  $k$ -ближайших соседей. Связная компонента – группа пикселей одного цвета, между любыми членами которой можно проложить путь, состоящий только из элементов этой группы. Считается, что связная компонента выполняет роль символа текста. Для каждой компоненты ищутся  $k$  ближайших и строится гистограмма расстояний между ними, где выбираются 3 пика – интервалы между символами, словами и строками.

Преимуществами этого алгоритма являются независимость работы от угла поворота текста и точные результаты. На практике достаточным является  $k=5$ : захватываются символы слева, справа, сверху, снизу и один дополнительный. Подробнее алгоритм описан в статье [4].

## **РАСПОЗНАВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СИМВОЛОВ И СЛОВАРНАЯ ПРОВЕРКА**

Для распознавания символов воспользуемся нейронной сетью. Она имеет хорошую точность распознавания и быструю скорость работы.

Далее, основываясь на результатах Docstrum, объединяем полученные символы в слова, а слова в предложения. Поскольку идеального распознавания быть не может из-за плохого качества изображения и близких символов (например, «0» и «O»), следует проводить словарную проверку: полученные слова ищутся в словаре, и если такое слово не найдено, то оно меняется на ближайшее по расстоянию Левенштейна.

## **РАСПОЗНАВАНИЕ РЕКЛАМЫ**

На этом этапе необходимо определить является ли поступивший на вход текст рекламой.

Поскольку тестовая реклама имеет много общего со спамом, для решения этого этапа задачи воспользуемся тем, что эффективно решает задачу классификации текстового спама – наивный байесовский классификатор. Данный метод прост, удобен и эффективен (после обучения на достаточно большой выборке отсекает до 95–97 % спама).

### СОКРЫТИЕ РЕКЛАМЫ

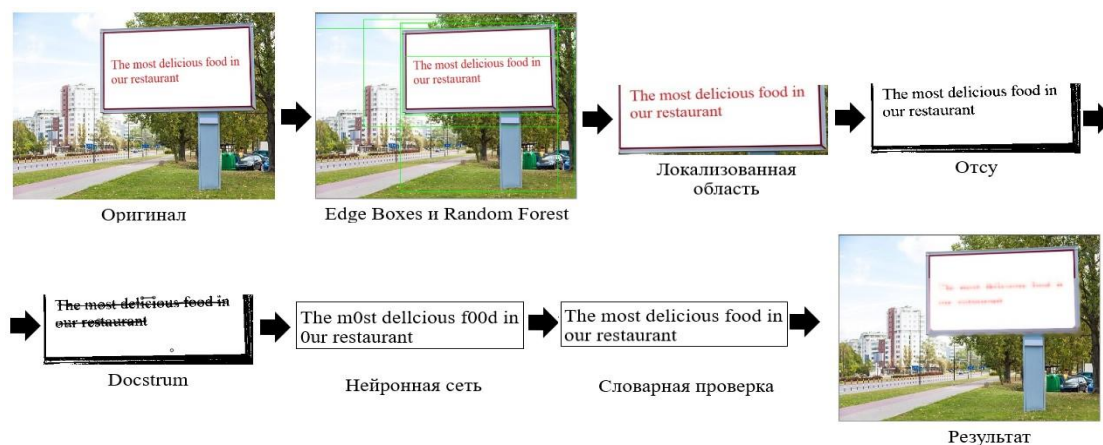
На этом этапе необходимо все области с рекламой скрыть. Поскольку координаты этих областей у нас имеются, мы можем применить к каждой из них медианный фильтр большого размера (например, 15×15). Такой фильтр очень сильно размажет область и тем самым скроет текст.

### ТЕСТИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ СИСТЕМЫ

Оценка результата для данной системы – нетривиальная задача по причине отсутствия крупной базы, содержащей изображения с рекламами и экспертными представлениями результата. Поэтому оценку результата будем проводить по проценту правильно распознанных рекламных областей. Было взято 30 произвольных изображений и проведён анализ результата вручную. Результатом работы системы является 73,3% правильно распознанной и скрытой рекламы. Причем, Edge Voxes и Random Forest находят около 88% текстовых областей, а остальные 15% теряются на этапе распознавания текста и рекламы.

Также был рассмотрен ещё один показатель – производительность. Согласно экспериментам, на обработку небольших изображений система тратит от 0,5 секунд, что говорит о больших временных затратах для работы с видеопотоком, где на 1 секунду видео приходится более 24 кадров. Решить данную проблему можно аппаратными средствами (многопоточность), что довольно дорого, или же пропуском некоторых кадров, что приведёт к неточностям работы.

Пример работы системы приведён на рисунке ниже.





### Библиографические ссылки

1. *Н.И. Червяков, П.А. Ляхов, А.Р. Оразаев.* Два метода адаптивной медианной фильтрации импульсного шума на изображениях // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 4. С. 667-678. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-667-678.
2. *Zitnick, C. L., Dollár, P.* Edge boxes: Locating object proposals from edges // Computer vision ECCV 2014 13th European conference, Zurich, Switzerland. 2014. Part IV. P. 391–405.
3. *Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R.* Additive logistic regression: A statistical view of boosting // Annals of Statistics. 2000. Т. 28, № 2. P. 337–407.
4. *Болотова, Ю.А.* Обзор алгоритмов детектирования текстовых областей на изображениях и видеозаписях / Ю.А. Болотова, В.Г. Спицын, П.М. Осина // Компьютерная оптика. 2017. Т.41, №3. С.441-452. DOI:10.18287/2412-6179-2017-41-3-441-452.

# АНАЛИЗ БИЗНЕС-ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ЭКОНОМИЧЕСКИХ НАСТРОЕНИЙ

**А. В. Бороховский**

*Белорусский государственный университет*

*Navibaru@gmail.com;*

*науч. рук. – В. И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Статья посвящена анализу бизнес-цикла и эконометрическому прогнозированию экономической активности белорусской экономики с использованием рассчитанного по обновленным данным индекса экономической настроений (ИЭН). Исследуются поворотные точки бизнес-цикла с помощью фильтра Ходрика–Прескотта и предлагается модель векторной авторегрессии для прогнозирования темпов роста реального ВВП.

**Ключевые слова:** индекс экономических настроений, бизнес-цикл, реальный ВВП, фильтр Ходрика – Прескотта, предиктивные эконометрические модели.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка систем раннего обнаружения смены фаз экономических циклов на основе опережающих экономических индикаторов – это важная задача анализа и прогнозирования экономической активности. В странах Европейского союза в настоящее время используется методология построения системы опережающих индикаторов по опросным данным, разработанная Статистическим департаментом организации экономического сотрудничества и развития и Европейской комиссией (ОЭСР-ЕК) [1], включающая: индексы доверия для отдельных видов экономической деятельности (ВЭД) и индекс экономических настроений (*economic sentiments index* – ESI) для экономики в целом (ИЭН). Методика ОЭСР-ЕК в настоящее время выступает в качестве общепринятого мирового стандарта построения экономических индикаторов по опросным данным.

По заданию Национального банка Республики Беларусь (НБ РБ) в БГУ разработан алгоритмический и программный инструментарий в виде web-приложения ESI Analysis с графическим пользовательским интерфейсом на языке R, реализующий все этапы построения и применения указанных индексов для анализа циклических изменений в белорусской экономике в предположении о наличии двух классов состояний экономики (фаз бизнес-цикла): «подъем» и «спад» [1, 2]. В ходе проведенных исследований был установлен опережающий характер ИЭН по отношению к реальному ВВП (базисному экономическому индикатору), т.е. показано, что моменты смены фаз цикла (поворотные точки) ИЭН предшествуют моментам смены фаз цикла реального ВВП в среднем на 4 месяца. В [1, 2] были построены предиктивные эконометрические модели для

прогнозирования ежемесячных и годовых темпов роста реального ВВП с использованием построенного ИЭН для временного интервала с мая 2005 года по январь 2017 года.

Целью настоящего исследования является построение и применение указанных индексов для пролонгированного временного интервала с мая 2005 года по март 2020 года с использованием приложения ESI Analysis. Реальный ВВП используется в месячном исчислении на основе доступных квартальных значений. Исходными данными для построения ИЭН выступают результаты опросов порядка 2000 белорусских предприятий из четырех ВЭД (промышленность, строительство, торговля, транспорт) в виде временных рядов «балансов ответов» на вопросы анкеты «Конъюнктура» НБ РБ.

### ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИЭН ДЛЯ АНАЛИЗА БИЗНЕС-ЦИКЛА

Индекс ИЭН в данном исследовании рассчитывается по прямому методу [1]. Для выделения цикла во временных рядах ИЭН и реального ВВП на основании сравнительного анализа альтернативных походов [3], выбран статистический фильтр Ходрика – Прескотта. Выделению цикла в обоих рядах предшествует устранение сезонных изменений с помощью метода сезонной корректировки TRAMO/SEATS [1]. Для получения циклов применяется двухэтапная процедура, основанная на фильтре Ходрика – Прескотта с различными значения управляемого параметра  $\lambda$ : на этапе 1 (выделение тренда и получение цикла с шумовым компонентом)  $\lambda_1 = 42131.155$ ; на этапе 2 (очистка цикла от шумового компонента)  $\lambda_2 = 13.93$ .

Полученные циклы временных рядов ИЭН и реального ВВП приведены на рисунке 1. Сравнительный анализ моментов смены фаз циклов («подъем» и «спад») для двух временных рядов подтверждает опережающий характер ИЭН и соответственно позволяет в среднем за 6 месяцев до фактической смены фазы говорить о ее приближении.

Датировка соответствующих поворотных точек в циклах реального ВВП и ИЭН приведена в таблице 1.

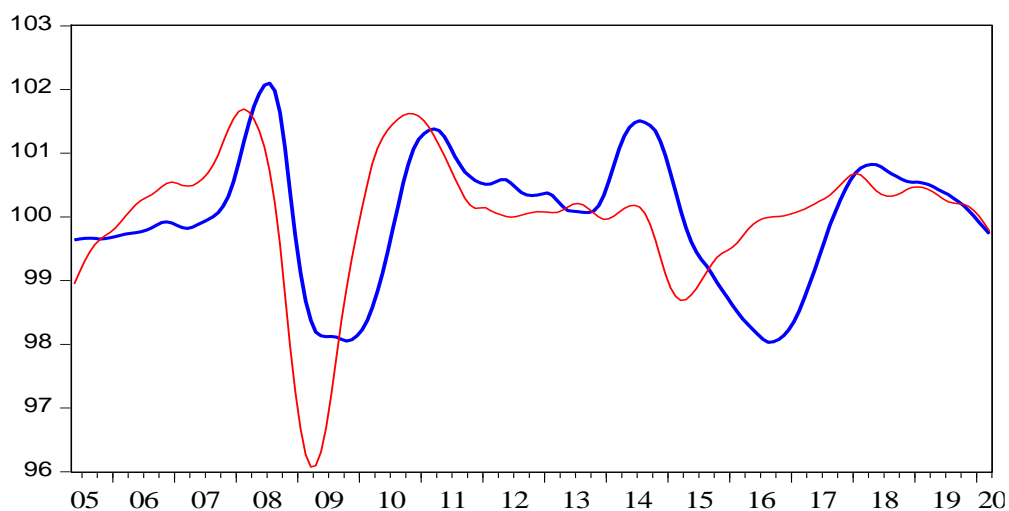


Рис 1. Циклы реального ВВП (жирная синяя линия) и ИЭН (тонкая красная линия) белорусской экономики

Таблица 1

**Датировка соответствующих поворотных точек циклов ИЭН и ВВП**

Тип	ИЭН	ВВП
	2008.02	2008.07
Дно	2009.03	2009.10
Пик	2010.10	2011.03
Дно	2011.11	2012.02
Пик	2012.01	2012.05
Дно	2012.06	2012.10
Пик	2012.11	2013.01
Дно	2013.03	2013.08
Пик	2013.07	2014.07
Дно	2013.12	-
Пик	2014.06	-
Дно	2015.03	2016.08
Пик	2018.01	2018.05
Дно	2018.07	2018.12
Пик	2019.01	-

**Примечание:** Пик – момент переключения с фазы «подъем» на фазу «спад»,

Дно – момент переключения с фазы «спад» на фазу «подъем».

Поворотные точки до конца 2016 г. соответствуют ранее полученным результатам для этого временного интервала в [1, 2].

Наибольший интерес представляет динамика циклов с 2017 г. по 2019 г. После подъема экономики со второй половины 2016 г. до конца 2017 г., который ожидался на основе ИЭН в марте 2015 г., в январе 2018 г от ИЭН

поступил сигнал о грядущем снижении экономической активности за 5 месяцев до реально начавшегося снижения.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЭН ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВВП

Для оценки предиктивных возможностей ИЭН в моделях для реального ВВП приведем результаты построения совместного анализа этих переменных. С помощью теста BPUR (Break Point UR Test), предназначенного для тестирования типа модели временного ряда в присутствии структурных изменений, установлено (таблица 1), что временные ряды логарифмов темпов роста ВВП и ИЭН, обозначаемые DLGDP, DLSEI являются стационарными и имеют аддитивное аномальное наблюдение в октябре 2008 г.

Таблица 2

Результаты тестирования временных рядов

Переменная	Статистика	Пороговые значения			Дата структурного изменения	Р-значение
	BPUR	0.01	0.05	0.1		
DLGDP	-21.533	-4.949	-4.444	-4.193	2010.08	<0.01
DLESI	-8.315	-4.949	-4.444	-4.193	2010.02	<0.01

На этом основании построена модель векторной авторегрессии VAR(3) с импульсной фиктивной переменной DUM вида:

$$\begin{aligned}
 DLESI &= -0.07 - \mathbf{0.24}DLESI(-1) + 0.02DLESI(-2) + \mathbf{0.22}DLESI(-3) \\
 &+ 2.56DLGDP(-1) + 0.75DLGDP(-2) + 30.04DLGDP(-3) - \mathbf{16.76}DUM, \\
 DLGDP &= \mathbf{0.002} - 0.0004DLESI(-1) + \mathbf{0.0006}DLESI(-2) - 0.0003DLESI(-3) \\
 &- \mathbf{0.372}DLGDP(-1) + \mathbf{0.146}DLGDP(-2) + \mathbf{0.212}DLGDP(-3) - \mathbf{0.061}DUM.
 \end{aligned}$$

Модель статистически адекватна по всем тестам. Жирным выделены статистически значимые на уровне 0.05 оценки параметров. Среди них экзогенная переменная  $DLESI(-2)$  с лагом 2 в уравнении для  $DLGDP$ , что указывает на ее опережающий характер и предиктивные способности ИЭН по отношению к ВВП.

### Библиографические ссылки

1. Малюгин В. И., Крук Д. Э., Кондратович Е. В., Милевский П. С. Банковский вестник: Тематический выпуск / НБ РБ. Минск, 2019. Вып. 16. 29 с.
2. Малюгин В. И., Макаревич А. С. Модель MS-VARX и ее применение для анализа бизнес-цикла белорусской экономики. // Банковский вестник. 2020. № 4. С. 22-32.
3. Макаревич А. С., Малюгин В. И. Сравнительный анализ фильтров Ходрика-Прескотта и Хамильтона при оценивании поворотных точек бизнес-цикла и индекса экономических настроений белорусской экономики // Банковский вестник. 2018. № 8. С. 49-56.

# РАЗРАБОТКА КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ ПАРТИТУР МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ

**В. Ю. Дементей, А. А. Егоров**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
fpm.dementey@bsu.by, fpm.egorovaal@bsu.by,  
науч. рук. – С. В. Марков, доц, зав. кафедрой*

Важной частью разработки приложения, которое работает с музыкальными партитурами, является первичная обработка входных данных, а именно нотных листов. В статье описывается применение интеллектуальной обрезки изображения. Приведен алгоритм нахождения линеек нотного стана. Для удобной работы с клиентской частью рассмотрены и проанализированы варианты веб и мобильного приложений на платформе Android. Так как важной частью работы с нотами является наглядность на стороне клиента, осуществлена работа с музыкальной нотацией, рассмотрены преимущества ее использования. Описан прототип приложения конвертации музыкальных партитур в аудио формат с возможностью выбора или фотографирования изображения, выгрузки результирующего файла и дальнейшим его проигрыванием.

**Ключевые слова:** интеллектуальная обрезка изображения, клиент-серверное приложение, музыкальная нотация, мобильное приложение, одноканальное изображение.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Не мало важным процессом 21 века является оцифровка данных с целью получения электронных копий пригодных для более удобной работы, например, электронные книги, цифровые фото и видео, mp3 и т.д. Но само наличие цифровой копии, хранящейся в памяти компьютера не всегда решает проблему удобной работы с ней. При необходимости правки ошибок или копировании части текста нам необходим не просто цифровой скан носителя, но и представление его в виде понятном компьютеру. Ведь само изображение это всего лишь набор упорядоченных пикселей и невозможно создать универсальное программное обеспечение способное воспринимать их также как это делает человеческий мозг. Исходя из этого перед этапом распознавания нот необходимо улучшить изображение и привести его в наиболее пригодную форму, которая позволит снизить число ошибок и сбоев в работе других алгоритмов. Также в возможности серверной части распознавания партитур должна входить работа с изображением, в ходе которой четко определяется расположение горизонтальных полос нотного стана.

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРЕЗКА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Предположим, что изображение, полученное от пользователя, имеет небольшой наклон относительно горизонтали, необходимо это исправить. В начале применим двусторонний фильтр, позволяющий очистить изображение от нежелательных шумов, при этом оставляя контуры всех фигур неизменными.

После этого найдем границы всех объектов на изображении, воспользовавшись алгоритмом, разработанным Джоном Канни [1]. Следующим этапом необходимо получить координаты найденных контуров, чтобы определить какой из них является контуром нотной партитуры и произвести обрезку изображения по его периметру. Необходимо аппроксимировать все найденные контуры до простых фигур.

На последнем шаге необходимо выбрать именно тот аппроксимированный контур, который является искомым. Для этого отсортируем их всех по площади. После этого будем перебирать отсортированный массив начиная от самого большого в поисках того четырехугольника, который содержит внутри себя прямоугольнички меньших размеров и имеющих углы приближенно равные прямым. При таком подходе будет найден самый большой прямоугольник, содержащий внутри себя все неверно найденные контуры фигур. При отсутствии контура, удовлетворяющего всем условиям, считаем, что попытка интеллектуальной обрезки не удалась и завершаем работу алгоритма.

## **АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ЛИНЕЕК НОТНОГО СТАНА**

Необходимыми входными данными для этого алгоритма являются верхняя и нижняя граница нотного ключа, а также горизонтальное расположение ноты.

Далее приведено описание алгоритма. Для поиска координат будем устанавливать горизонтальный курсор в определенную позицию стана и перебирать все пиксели сверху вниз начиная от верхней границы стана, заканчивая нижней границей вдоль этого курсора.

Сперва необходимо разделить все пиксели по цветовому признаку – белые или черные. Так возможно будет определить какие пиксели принадлежат черной линейке, а какие являются промежутками между ними.

Переведем изображение в градации серого, тем самым закодируем каждый пиксель однобайтным значением характеризующем его прозрачность. После получения одноканального изображения избавимся от возможных шумов. Для этого применяется механизм усреднения значения пикселей. При рассмотрении конкретного пикселя вычисляются значения

всех его соседей и определяется математическое ожидание в доверительном интервале. Вычисленное значение заменяет исходный пиксель. Последним шагом получим само черно-белое изображение.

Вторым этапом необходимо найти горизонтальную позицию для курсора где нет ни одной ноты, чтобы при определении цвета пикселя, если он черный мы точно могли понимать, что это линейка стана, а не часть ноты.

Стартовую позицию курсора установим по горизонтали на центр выбранной ноты, по вертикали в верхнюю границу стана и начнем перебор всех пикселей сверху вниз пока не дойдем до нижней границы стана.

Если очередной пиксель классифицируется как белый, то пропускаем его, и смещаем курсор на один пиксель вниз.

Если же курсор встречает пиксель, классифицируемый как черный, то запоминается вертикальная позиция курсора (точка подозрительная на верхнюю границу линии) и запускается внутренний цикл, пропускающий все черные пиксели, пока не встретится белый. После выхода из внутреннего цикла получаем точку подозрительную на нижнюю границу линейки.

Добравшись до самой последней позиции курсора, которой является нижняя граница рассматриваемого стана, получаем массив, содержащий верхние и нижние позиции черных линий подозрительных на искомые данные. Подозрительными они являются, потому что курсор мог стать в горизонтальную позицию где по вертикали есть ноты или попасть на границу такта.

В результате работы алгоритма получаем массив из пяти элементов, каждый из которых содержит верхнюю и нижнюю границ соответствующей линейки на нотном стане для конкретной ноты.

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Процесс взаимодействия клиента и сервера строится по следующему сценарию: клиент отправляет запрос, содержащий некоторые входные данные, по сетевому соединению, которые затем обрабатываются. Принцип работы данного клиент-сервера заключается в следующем: на вход поступают данные (в нашем случае изображение нотной партитуры). Эти данные сохраняются в базе данных. Затем алгоритм распознавания находит все ноты в отправленном изображении и создает в соответствии для каждой ноты объект с параметрами длительности и тональности [2].

После этого, полученные объекты переводятся в MIDI – формат по соответствующим правилам. Когда файл будет получен он отправляется обратно на сторону клиента, где может быть воспроизведён.

Для удобства реализовано два клиента. Плюсы клиентской части на веб платформе заключаются в отсутствии большого объема занимаемой



памяти, возможности трансляции приложения на разных устройствах. А преимуществами Android приложения являются легкодоступность, возможность возвращаться к предыдущим результатам, возможность музыкальных плееров телефона поддерживать MIDI формат [3].

На клиентах также использовалась музыкальная нотация – формат для указания нот, использующий только строку символов. То есть для каждого действия и объекта существует свое соответствие при письме. Что помогает решать проблемы с графическим и функциональным представлением, например, осуществлять обрисовку нот, быстро редактировать погрешности распознавания, добавлять анимационные эффекты, синхронизировать мелодию и изображение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Как итог, с использованием вышеприведенных алгоритмов, разработано мобильное приложение на платформе Android, а также веб реализация, позволяющие конвертировать нотные партитуры музыкальных произведений в аудио формат. В ходе реализации можно выделить плюсы клиент-серверной архитектуры: простота написания различных клиентов, быстрое внесение правок, низкие технические требования, предъявляемые к клиентам, меньшее время, затрачиваемое на получение результата.

### **Библиографические ссылки**

1. Canny Edge Detection Step by Step in Python — Computer Vision // Towards Data Science [Электронный ресурс]. – 2019. - Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/canny-edge-detection-step-by-step-in-python-computer-vision-b49c3a2d812>
2. Кизенков В. С., Полетаева Т. С. Распознавание партитур музыкальных произведений и преобразование их в MIDI файлы // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета [Электронный ресурс]: материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 14–22 мая 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 202
3. Архитектура Android // Fandroid [Электронный ресурс]. – 2010. Режим доступа: <https://www.fandroid.info/category/arhitektura-klient-servernyh-android-prilozhenij/>.

# СЛАБЫЕ РЕБЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ И АССОЦИИРОВАННЫЕ С НИМИ КЛАССЫ ГРАФОВ

Д. А. Дыбовская

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*miss.dybowskaya@gmail.com*;  
науч. рук. – Ю. Л. Орлович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Целью настоящей работы является рассмотрение понятия слабого реберного покрытия графа и получение структурных характеристик классов графов, определяемые в терминах взаимосвязи между максимальными паросочетаниями или минимальными доминирующими множествами ребер графа и слабыми реберными покрытиями этого графа.

**Ключевые слова:** реберное покрытие, слабое реберное покрытие; паросочетание; доминирующее множество ребер, треугольный граф, наследственный класс; NP-полнота.

## ВВЕДЕНИЕ

Напомним, что подмножество ребер графа называется *реберным покрытием*, если оно покрывает все вершины графа, т. е. каждая вершина графа инцидентна по крайней мере одному ребру из этого подмножества. В работе рассматривается релаксированный вариант этого понятия – слабое реберное покрытие, предложенный Ю. Л. Орловичем. Множество  $M$  ребер графа называется его *слабым реберным покрытием*, если каждая вершина графа, не инцидентная никакому из ребер множества  $M$ , смежна с обеими вершинами некоторого ребра из этого множества (т. е. образует с этим ребром треугольник). Понятно, что в графе, не содержащем треугольников, понятие слабого реберного покрытия совпадает с классическим понятием реберного покрытия.

В [1] было введено понятие треугольного графа, как графа, в котором каждое максимальное независимое множество является его независимым окрестностным множеством. В настоящей работе будет рассмотрен реберный аналог таких графов – *паросочетательно треугольные графы* – графы, в которых каждое максимальное паросочетание является слабым реберным покрытием. Также будут введены в рассмотрение *доминантно-паросочетательно треугольные графы* – графы, в которых свойством слабого реберного покрытия обладает каждое минимальное доминирующее множество ребер. С одной стороны, доминантно-паросочетательно треугольные графы образуют собственный подкласс паросочетательно

треугольных графов, а с другой – являются реберным аналогом доминантно треугольных графов, введенных в [2].

В работе установлены структурные характеристики указанных классов графов и показано, что эти классы являются достаточно содержательными. Из полученных характеристик следует существование полиномиальных алгоритмов распознавания принадлежности графа соответствующим классам. Охарактеризованы максимальные наследственные подклассы паросочетательно треугольных и доминантно-паросочетательно треугольных графов. Также установлено, что классические задачи распознавания клика,  $k$ -раскраска графа и цепь наибольшей длины являются NP-полными в классе доминантно-паросочетательно треугольных графов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Все теоретико-графовые понятия, используемые в данной работе, соответствуют общепринятым (см., например, [3]). Предполагается, что рассматриваемые графы не содержат изолированных вершин.

Дадим определение слабого реберного покрытия графа.

**Определение 1.** Множество  $M \subseteq E(G)$  ребер графа  $G$  называется *слабым реберным покрытием* (сокращенно СРП) этого графа, если каждая вершина  $v \in V(G)$  инцидентна некоторому ребру из  $M$  или лежит в некотором треугольнике, содержащем ребро из  $M$ .

Можно дать альтернативное определение СРП.

**Утверждение 1.** Множество  $M \subseteq E(G)$  ребер графа  $G$  является СРП тогда и только тогда, когда каждая вершина  $v \in V(G)$  лежит в общей клике с некоторым ребром из  $M$ .

Любое реберное покрытие является также и СРП. Обратное, вообще говоря, неверно. В следующей теореме охарактеризованы графы, в которых каждое СРП является реберным покрытием.

**Теорема 1.** Пусть  $G$  – граф без изолированных вершин. В графе  $G$  каждое СРП является реберным покрытием тогда и только тогда, когда для любого треугольника графа  $G$  каждая вершина этого треугольника смежна с некоторой вершиной степени 1.

**Теорема 2.** Задача нахождения СРП наименьшей мощности является NP-трудной.

В [4] вводится следующее понятие расстояния в геометрическом графе. Пусть имеется изображение графа на плоскости, где вершинам соответствуют точки, а ребрам — соединяющие их отрезки, которые попарно не пересекаются кроме, возможно, своих концевых точек. Каждый отрезок имеет единичную длину, является замкнутым и прямолинейным. Расстояние между двумя произвольными точками  $p$  и  $q$  геометрического

графа определяется как наименьшая длина кривой, принадлежащей графу (проходящей по ребрам графа) и соединяющая эти точки.

Пусть  $M$  — СРП геометрического графа  $G$ . Это значит, что если установить метку в произвольной точке на каждом ребре из  $M$ , то расстояние от любой точки графа до некоторой метки не будет превосходить 2.

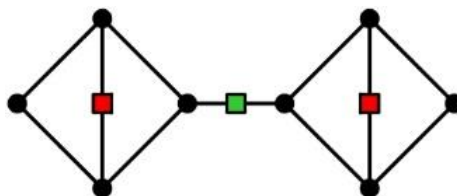


Рис. 1

Например, на рис. 1 СРП представлено “вертикальными” ребрами графа с красными метками, расположенными в серединах этих ребер. Зеленой меткой, расположенной в середине “горизонтального” ребра графа, отмечена точка, находящаяся на расстоянии 2 от любой из красных меток. Этот пример показывает, что понятие СРП может оказаться полезным при моделировании логистических задач, связанных с размещением объектов сервиса, например, заправочных станций на трассах.

Введем определение паросочетательно треугольного графа.

**Определение 2.** Граф  $G$  называется *паросочетательно треугольным*, если для любого максимального паросочетания  $M$  и любой вершины  $v$ , не инцидентной ни одному ребру из  $M$ , существует такое ребро  $e = uw \in M$ , что  $v$  одновременно смежна с  $u$ , и с  $w$ .

Таким образом, в паросочетательно треугольном графе каждое максимальное паросочетание является также и СРП. Обозначим через  $\mathcal{M}$  класс всех паросочетательно треугольных графов.

**Утверждение 2.** Для любого графа  $H$  существует паросочетательно треугольный граф  $G$ , содержащий  $H$  в качестве порожденного подграфа.

Следующая теорема по сути является критерием паросочетательно треугольности графа.

**Теорема 3.** Граф является паросочетательно треугольным тогда и только тогда, когда в нем не существует максимального паросочетания  $M$  и вершины  $v$  таких, что  $M$  покрывает все вершины  $N(v)$  и при этом не имеет общих ребер с подграфом, порожденным  $N(v) \cup \{v\}$ .

**Следствие 1.** Для задачи распознавания паросочетательно треугольных графов существует алгоритм с временной сложностью  $O(|G|^4)$ .

Введем понятие доминантно-паросочетательно треугольного графа.

**Определение 3.** Граф  $G$  называется *доминантно-паросочетательно треугольным*, если для любого его минимального доминирующего множества ребер  $D$  и любой вершины  $v \in V(G)$  выполнено: либо  $v$  инцидентна

некоторому ребру из  $D$ , либо  $v$  образует треугольник с некоторым ребром из  $D$ , т. е. существуют такие  $u, w \in V(G)$ , что  $uw \in D$  и  $v$  смежна с  $u$  и  $w$ .

Класс всех доминантно-паросочетательно треугольных графов обозначим  $\mathcal{DM}$ .

**Утверждение 3.** Имеет место строгое включение  $\mathcal{DM} \subset \mathcal{M}$ .

Следующая теорема является критерием доминантно-паросочетательной треугольности графа.

**Теорема 4.** Граф  $G$  без изолированных вершин является доминантно-паросочетательно треугольным тогда и только тогда, когда в нем не существует такой вершины  $v$ , что для любой вершины  $x \in N(v)$  найдется смежная с  $x$  вершина, не принадлежащая  $N(v) \cup \{v\}$ .

**Следствие 2.** Для задачи распознавания доминантно-паросочетательно треугольных графов существует алгоритм с временной сложностью  $O(|G|^3)$ .

**Теорема 5.** Задачи КЛИКА ( $k \geq 4$ ),  $k$ -РАСКРАСКА ( $k \geq 3$ ) и ЦЕПЬ НАИБОЛЬШЕЙ ДЛИНЫ являются NP-полными в классах  $\mathcal{DM}$  и  $\mathcal{M}$ .

Граф  $G$  назовем *сильно паросочетательно треугольным*, если каждый его порожденный подграф является паросочетательно треугольным. Аналогично определяется сильно доминантно-паросочетательно треугольный граф. Обозначим через  $\mathcal{HM}$  и  $\mathcal{HDM}$  наследственные классы сильно паросочетательно треугольных и сильно доминантно-паросочетательно треугольных графов соответственно.

**Теорема 6.** Наследственные классы  $\mathcal{HM}$  и  $\mathcal{HDM}$  совпадают и представляют собой класс  $P_3$ -свободных графов.

Таким образом, взаимосвязь между введенными классами графов можно выразить следующей цепочкой:  $\mathcal{HM} = \mathcal{HDM} \subset \mathcal{DM} \subset \mathcal{M}$ .

#### Библиографические ссылки

1. Orlovich, Y. Independent domination in triangle graphs / Y. Orlovich, I. Zverovich // Electron. Notes Discrete Math. – 2007. – Vol. 28. – P. 341–348.
2. Картынник, Ю. А. Доминантно-треугольные графы и графы верхних границ / Ю. А. Картынник, Ю. Л. Орлович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 1. – С. 16–25.
3. Лекции по теории графов / В.А. Емеличев [и др.]. – М.: Наука, 1990. 384 с.
4. Enami, K. Recursive formulas for beans functions of graphs / K. Enami, S. Negami // Theory and Applications of Graphs. – 2020. – Vol. 7, № 1. – Article 3.

# РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОПЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ В АЛГОРИТМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТОРГОВЛИ

М. А. Жерело

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*maxzherelo1@gmail.com*

*науч. рук. – В. И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье представлен алгоритм автоматической торговли на финансовом рынке, основанный на опционных стратегиях минимизирующих риски в условиях быстроменяющихся рынков. Алгоритм основывается на модели Блэка – Шоулза для цен опционов с оцениваемыми по реальным данным параметрами. Приводятся результаты апробации алгоритма на рынке Bitcoin.

**Ключевые слова:** автоматические торговые стратегии, модель с переключением состояний MS-GARCH, модель Нельсона – Сигеля, алгоритм торговли волатильностью, опционные стратегии.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе представляется алгоритм автоматической торговли на рынках финансовых активов [1, 2]. Он основан на опционных стратегиях, оптимальных в условиях различных режимов волатильности и смене тренда.

Начало современной теории оценивания опционов было положено в 1970-х годах моделью Блэка – Шоулза, позволившей в аналитическом виде вычислять стоимость опционов на покупку (колл) и на продажу (пут). Эта модель содержит некоторые предположения о поведении рынка, в частности, предполагается, что параметры модели являются постоянными. Для учёта динамики изменения волатильности базового актива при оценивании дериватива используются методы Монте Карло. Так же они позволяют учесть траекторию реализации стоимости базового актива при оценивании соответствующего финансового инструмента. Важным параметром моделей оценивания стоимости деривативов является безрисковая процентная ставка. На практике она не известна для произвольного срока действия. Поэтому возникает необходимость её моделирования. Для решения поставленной задачи в работе применяется модель Нельсона – Сигеля с использованием соответствующего класса моделей.

Актуальной проблемой при торговле на рынке остаётся задача выбора соответствующей опционной стратегии. Существуют стратегии, которые зависят от волатильности актива и позволяют получить прибыль при их корректном применении. Для моделирования волатильности обычно переходят к логарифмической доходности. Данные временные ряды обладают свойством условной гетероскедастичности, поэтому достаточно эффективными являются модели GARCH (generalized autoregressive conditional heteroscedasticity).

Для моделирования волатильности финансового рынка в работе используется модель условной гетероскедастичности с марковскими переключениями состояний (Markov switching GARCH – MS-GARCH) [3-5]. Эта модель основывается на предположении о том, что рынок может находиться в одном из классов состояний (подъема и спада), а случайная последовательность номеров классов состояний описывается однородной цепью Маркова.

## АЛГОРИТМ ТОРГОВЛИ ВОЛАТИЛЬНОСТЬЮ

Предлагается алгоритм автоматической «торговли волатильностью», в котором для хеджирования риска при смене состояния рынка используются специально сформированные опционные стратегии. Для оценки затрат на формирование опционных стратегий применяется модель Блэка – Шоулза, параметры которой (безрисковая ставка и дисперсия доходности базисного актива), оцениваются на основе моделей Нельсона – Сигеля и MS-GARCH соответственно по текущим статистическим данным. Общая схема алгоритма имеет следующий вид:

*Шаг 1.* Моделирование безрисковой процентной ставки на основе доходности казначейских облигации США (*US treasury bills*).

*Шаг 2.* Переход от цен к доходностям базового актива.

*Шаг 3.* Моделирование волатильности актива с помощью модели MS-GARCH.

*Шаг 4.* Оценивание стоимости опционных стратегий.

*Шаг 5.* Выбор оптимальной стратегии на основе теоритической вероятности убытка стратегии.

*Шаг 6.* Покупка/продажа опционов для формирование выбранной опционной стратегии.

Поскольку безрисковая ставка неизвестна для произвольного периода первым шагом итерации работы алгоритма является её моделирование с помощью модели Нельсона – Сигеля. Далее осуществляется расчёт ставки, соответствующей периоду действия стратегий. Следующим этапом является моделирование волатильности базового актива. Для этого осуществляется переход от цен к логарифмическим доходностям. В рамках разработанного алгоритма предполагается, что рынок может находиться в одном из двух состояний с высокой или низкой волатильностью. Поэтому для моделирования волатильности базового актива используется модель MS-GARCH. Глубина прогноза равна периоду действия опционной стратегии.

На четвёртом шаге осуществляется оценивание стоимости опционных стратегий. Для этого используются результаты предыдущих шагов. Цены опционов рассчитываются на основе модели Блэка – Шоулза с помощью ме-

тогда Монте-Карло. Далее производится оценивание теоретической вероятности убытков для каждой стратегии. Оптимальной, на конкретном временном интервале, признается стратегия с наименьшим риском возможных убытков. Последним шагом является формирование выбранной стратегии с помощью покупки и продажи соответствующих опционных контрактов.

Для реализации алгоритма в ходе работы был разработан программный модуль на языке Python и R.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ТОРГОВЛИ ВОЛАТИЛЬНОСТЬЮ

Для апробации алгоритма использовалась ежедневная котировка криптовалюты Bitcoin. Опционные контракты заключались на 100 единиц базового актива. На рис. 1 приведены графики ежедневных котировок и доходности Bitcoin.

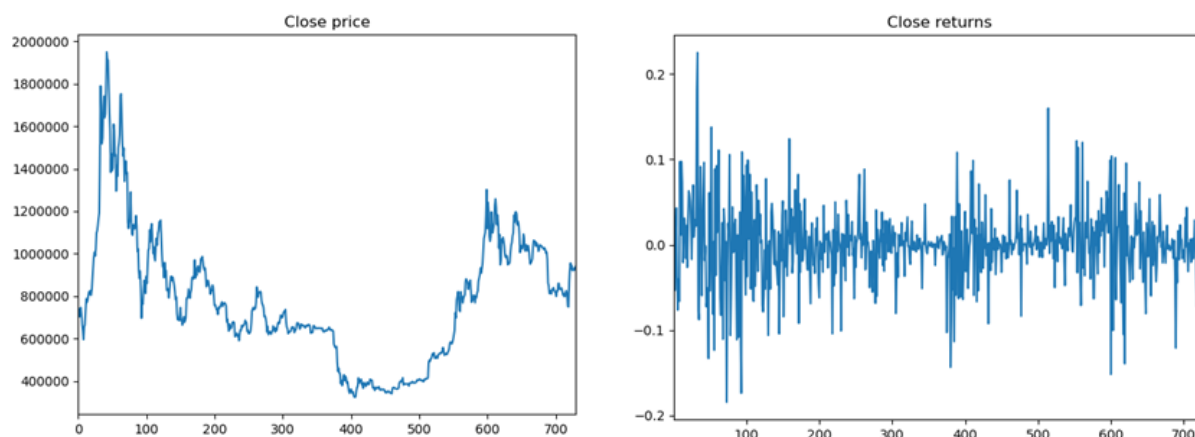


Рис. 1. Ежедневные котировки (левая панель) и доходности (правая панель) Bitcoin

На рисунке 2 представлены результаты моделирования безрисковой ставки с использованием 5-факторной модели Нельсона – Сигеля (левая панель), а также прогнозирования волатильности (правая панель). По графикам можно сделать следующие выводы: модель Нельсона – Сигеля достаточно хорошо описывает реальные данные (левая панель); имеет место высокая волатильность рынка, периоды низкой волатильности почти не наблюдаются (правая панель). Как показали эксперименты на рынке Bitcoin, алгоритм преимущественно выбирает стратегии, приносящие фиксированную прибыль и хеджирующие убытки на уровне стоимости стратегии. Также, при ожидании сильных колебаний курса актива, используется опционная стратегия стрэддл, которая выгодна в условиях относительно высокой волатильности [1].



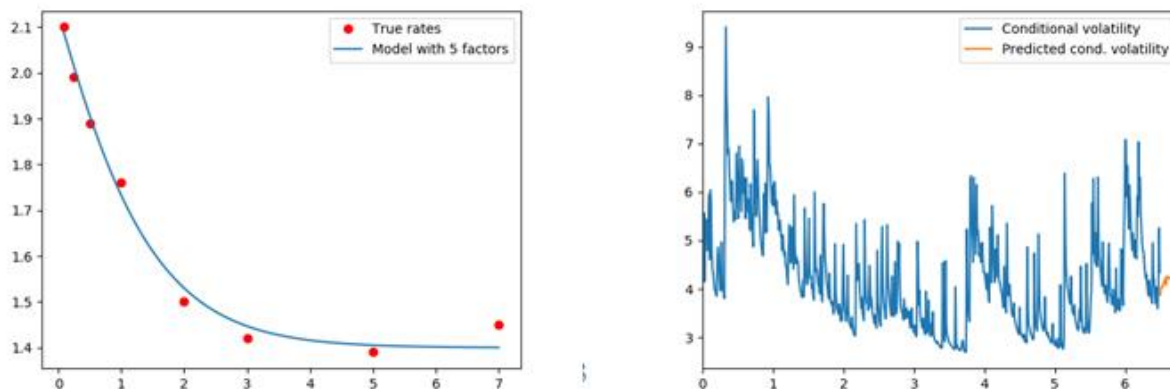


Рис.2. Результаты моделирования для Bitcoin: процентной ставки (левая панель) и волатильности доходности (правая панель)

На рис. 3 представлена визуализация реализованных ежедневных стратегий в течение рассматриваемого временного периода. В результате полного цикла торговли на рынке Bitcoin были реализованы 22 стратегии, из них 15 прибыльных. Доходность за весь торговый период составила 241%.

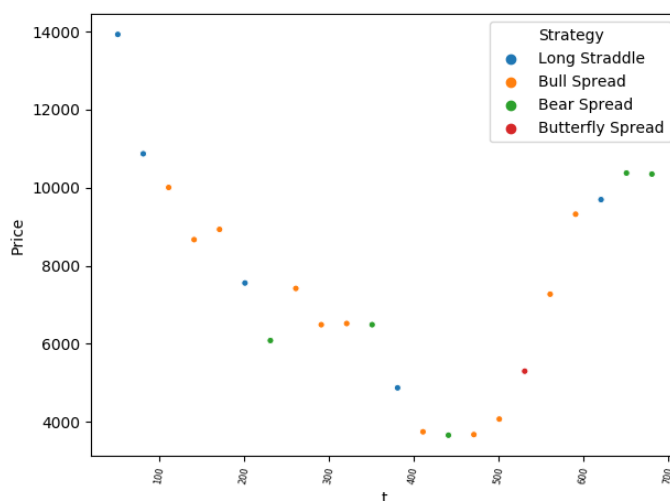


Рис. 3. Используемые стратегии в течение периода торговли на рынке Bitcoin

### Библиографические ссылки

1. Халл, Д. Опционы, фьючерсы и другие производные финансовые инструменты / Джон К. Халл. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 1045 с.
2. Малюгин В. И. Рынок ценных бумаг: Количественные методы анализа: Учебное пособие. – М.: Дело, 2003. – 320 с.
3. Tasneem Raihan Performance of Markov-Switching GARCH model forecasting inflation uncertainty / Tasneem Raihan – University of California, Riverside, 2017
4. Gianni Amisano Money Growth and inflation: a regime switching approach / Gianni Amisano, Gabriel Fagan – European Central Bank, 2010
5. John Simon A Markov-Switching model of inflation in Australia / John Simon – Reserve Bank of Australia, 1996

# РАСПОЗНАВАНИЕ ПАРТИТУР МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИХ В MIDI ФАЙЛЫ

В. С. Кизенков, Т. С. Полетаева

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
fpm.kizenkov@bsu.by, fpm.poletaev@bsu.by  
науч. рук. – О. Г. Казанцева, ст. преп.*

Способы получения информации совершенствуются с каждым днем, что трудно сказать об обучении музыкальной грамоте. В связи с этим рассмотрен альтернативный вариант работы с музыкальными партитурами, за счет конвертации изображения в аудио формат MIDI. В качестве способа перевода фотографии в звук, описаны и в дальнейшем использованы технологии распознавания с помощью нейронных сетей. Создан набор данных, на основе формата описания Pascal VOC. Приведен алгоритм пошагового распознавания, основным принципом которого является дробление распознаваемой партитуры. Выделены основные принципы выбора MIDI формата, как результата обработки цифрового изображения. Показана проблематика приложения и решения, принимаемые в ходе разработки.

**Ключевые слова:** аудио-формат, формат MIDI, нейронная сеть, кодирование клавиши, набор нотных данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Уже несколько десятилетий наблюдается серьезное развитие искусственного интеллекта. К тому же в век цифровых технологий, можно наблюдать большой переизбыток непроверенной, устаревшей и ненужной информации, что усложняет процесс изучения музыкальных партитур. Исходя из этого целью работы является изучение области конвертации нотных листов в MIDI формат, изучение алгоритмов распознавания нот, позволяющих улучшить и облегчить процесс музыкального обучения. Где основной упор сделан в сторону детализации объектов распознавания и функциональности, предоставленной техническим стандартом MIDI. Последующая реализация описанных алгоритмов, также позволит увеличить количество оцифрованных нот, позволит производить дальнейшую обработку MIDI файла.

## ПРОБЛЕМАТИКА КОНВЕРТАЦИИ ПАРТИТУРЫ В ЗВУК С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Основные проблемы выявлены в поиске набора данных и выборе музыкального формата данных.

Для работы с распознаванием музыкальных произведений надо сформировать большой объем данных для обучения нейронной сети, что в дальнейшем влияет на размер готового продукта. В качестве решения, алгоритм определения каждого символа нотной грамоты заменен выявлением самих нот на стане, а именно распознаются объекты, применяется алгоритм нахождения линеек нотного стана и после определяется высота звука каждой ноты в отдельности [1].

Среди всех аудио форматов отдельно выделяют модульные форматы, которые создаются искусственно за счет проигранных нот на инструментах. Сюда относят MIDI формат, который проигрывает музыку с помощью последовательности текстовых команд. При выборе аудио формата MIDI повлиял ряд следующих факторов:

- возможность кодирования нажатия клавиши;
- настройка акустических параметров;
- возможность использования с инструментами и другим программным обеспечением;
- структуризация объектов;
- возможность редактирования получившегося результата;
- размер MIDI файла не влияет на качество его звучания;
- широкий выбор музыкальных инструментов.

Не всё программное обеспечение способно поддерживать цифровой интерфейс MIDI, разложенный на инструменты. Это затрудняет воспроизведение на веб-платформах, поэтому реализован вариант выгрузки готового продукта, чтобы предоставить выбор среды работы с файлом.

## **АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ НОТ**

Для распознавания музыкальных нот на изображении, определения порядка их следования и принадлежности нотному стану, предложен следующий алгоритм:

1. Определить на изображении координаты начала и конца музыкального ключа, который находится в начале каждого нотного стана.
2. Зная верхний и нижний пределы ключа, определить, в каком диапазоне находится нотный стан.
3. Начиная с верхних координат скрипичного ключа вниз, с помощью алгоритма нахождения линеек (описанный в работе «Разработка клиент-серверного приложения по распознаванию партитур музыкальных произведений» [2]), определить координаты горизонтальных линий.
4. Распознать все ноты на линейках.

5. Далее, зная координату каждой ноты и координаты линеек, определить, какая именно это нота и номер ее октавы.

6. Сохранить все данные, отсортировав сначала по номеру музыкального лагеря, а затем увеличив координату X на изображении.

В итоге формируется последовательность объектов, параметры которых однозначно описывают каждую ноту. MIDI файл состоит из одного трека. А в трек помещаются заметки, которые формируются на этапе разбора списка полученных объектов, таким образом каждый объект распознанной ноты является кодированным MIDI событием результирующей мелодии.

### **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В MIDI ФАЙЛ**

Создание MIDI файла основывается на кодировании каждого музыкального события, для этого после создания трека, к нему добавляются MIDI-сообщения – инструкции, которые контролируют некоторые особенности принимающего устройства. MIDI-сообщение состоит из состояния, которое указывает тип сообщения, и данных, которые содержат параметры события [3]. Например, состояние дает инструкцию взять ноту, тогда в данных будет указано значение ноты и ее расположение в определенной октаве.

В разработанном модуле, преобразования в MIDI файл, функция принимает список из пар, в которую входят длительность и наименование ноты. Этот список образуется на этапе определения линий в нотном стане для каждой ноты. А значения длительностей, которые выявляет объект detector, определяются после этапа распознавания нот с помощью нейронной сети. Нейронная сеть распознает тип объекта, что и является определением длительности, и обрисовывает ноту, указывая координаты левого нижнего угла, от которого идет процесс нахождения положения ноты на нотном стане.

Мы узнаем координаты левого нижнего угла ноты, что дает возможность узнать их расположение относительно нотного стана. Используя эту информацию, а также информацию о типе объекта, каждой ноте ставится в соответствие MIDI событие. Один из параметров события – это высота звука (pitch). Этот параметр подбирается с помощью структуры ключ – значение, хранящей номер строки в стане и идентификационный номер ноты. Наличие у одной и той же ноты разных значений, объясняется принадлежностью ноты к определенной октаве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распознавание нотных партитур основывается на работе с нейронными сетями. С помощью описанного алгоритма приложение находит расположение нот, определяет высоту ноты и ее принадлежность определенной октаве. Посредством кодирования каждой ноты, распознанные данные преобразовываются в MIDI-файл. Важно отметить, что модель можно обучать дальше, добавляя больше объектов, таких как аккорды, другие типы клавиш, сложные паузы и т. д. Эти операции могут выполняться независимо от основной программы и просто обновлять версию параллельно, добавляя новые функциональные возможности. Технический стандарт MIDI также позволяет добавить интерфейсы различных музыкальных инструментов. Все это позволяет расширить применение данной работы.

### Библиографические ссылки

1. *Train object detection* //Medium [Электронный ресурс]. - 2017. - Режим доступа: <https://medium.com/deepquestai/train-object-detection-ai-with-6-lines-of-code-6d087063f6ff>
2. *Дементей В. Ю., Егоров А. А.* Разработка клиент-серверного приложения по распознаванию партитур музыкальных произведений // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета [Электронный ресурс]: материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 14–22 мая 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020.
3. *Wirt, W.* MIDIUtil Documentation/ M. Wirt // MIDIUtil [Электронный ресурс]. – 2018. – № 1.1.1. – Режим доступа: <https://readthedocs.org/projects/midiutil/downloads/pdf/latest>.

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕКСТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**В. Д. Ключев**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
vladislav.klyuev.work@gmail.com;  
науч. рук. – А. А. Лагуто, ст. преп.*

Целью данной работы является построение моделей машинного обучения на основании статистических признаков текста, а также программная реализация методов классификации текста.

**Ключевые слова:** статистический анализ текста, машинное обучение, анализ тональности текста, обработка естественного языка, классификация данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Сентимент-анализ или анализ тональности текста является областью компьютерной лингвистики, позволяющей автоматизировать нахождение в текстах эмоционально окрашенной лексики, эмоциональных оценок авторов. Одной из подзадач анализа тональности текста является определение полярности текста: позитивно или негативно окрашен исследуемый набор текстов, т.е. классификация текстов. Данная работа посвящена решению задачи бинарной классификации по 4 эмоциям с помощью классификаторов машинного обучения без нейронных сетей и с их использованием.

## НАБОРЫ ДАННЫХ И МЕТОДЫ

Наборов текстов с размеченными эмоциями относительно их контекста мало, и они имеют много минусов. Некоторые из них не являются достаточно надежными, так как основаны на потенциально недобросовестной разметке данных, и у каждого источника есть свой способ классификации. Поэтому сложно установить критерии оценки определенной эмоции.

Таким образом, возникает проблема поиска наборов данных для проведения анализа тональности текста. Для решения данной проблемы был создан свой набор данных на основе коротких сообщений из социальной сети Twitter длиной в 140 символов. Данные использовались на английском языке, так как в дальнейшем для обучения будут использоваться наборы с данными на английском языке.

В контролируемом обучении набор данных должен иметь метку для классификации данных. Поэтому были использованы встроенные элементы, определяющие эмоцию сообщения: хэштеги (например, #злость, #радость) и символы эмоций (англ. emoji, например, 😡). Это простой и достаточно надежный способ разметки данных, так как сам автор коротко обозначает свои эмоции. Используя распространенные символы эмоций и хэштеги, составляется таблица соотношения эмоций с символами эмоций и хэштегами. Для интерпретации символов эмоций в тексте была использована сторонняя библиотека Emoji.

Пример. Необходимо найти эмоции страха и злости. В качестве набора запросов для этих эмоций использованы следующие хэштеги: #страх и #ужас, а также символы эмоций 😨 и 😡, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

**Примеры символов эмоций, полученных по эмоции злости**

😡(:pouting_face:)	24301
🗨️(:face_with_symbols_on_mouth:)	1255
😡(:angry_face:)	671
😂(:face_with_tears_of_joy:)	610
🤧(:face_with_steam_from_nose:)	496
😭(:loudly_crying_face:)	455
🙄(:face_with_rolling_eyes:)	355

Первые две строки являются начальными символами эмоций. Остальные символы анализируются как потенциально подходящие под эмоцию в дальнейшем. Аналогичная операция была произведена и с хэштегами: был сформирован необходимый набор данных с размеченными эмоциями.

Для повышения доверия к созданной разметке использовался анализ тональности текста, с помощью которого были сделаны выводы о достоверности выборки. Имели место следующие суждения: если текст содержит метку злость, то он будет иметь отрицательную полярность после предсказания модели.

В качестве полярного набора данных использовалась база данных – Sentiment140. Данные этой базы также были собраны из социальной сети Twitter и содержат тексты, помеченные как отрицательные (0), нейтральные (2) или положительные (4).

Предварительная обработка текстов включала в себя преобразование текста в нижний регистр, удаление специальных символов, преобразование символов эмоций в текстовое представление, удаление повторов, замена сокращенных отрицаний, удаление стоп-слов. Затем было выполнено преобразование текста в векторное представление, основанное на оценке TF-IDF. Далее была определена модель машинного обучения –

GRU, или модель управляемых рекуррентных блоков. Для упрощения выходные данные были представлены в двоичной классификации: 1 – сообщения с положительной меткой (4), 0 – сообщения с отрицательной меткой (0), нейтральных значений в обучении не будет. Т.е. чем более отрицательный текст, тем больше выходное значение будет стремиться к 0. В результате получаем модель с бинарной классификацией.

Для проведения анализа на соответствие выборки по четырем эмоциям, были использованы среднее, максимальное, минимальное значения, а также стандартное отклонение [1]. В таблице 2 представлены результаты, сгруппированные по эмоциям.

Таблица 2

**Значения анализа выборки по 4 эмоциям**

	Эмоция	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Стандартное отклонение
0	Радость (joy)	0.791465	0.995362	0.016203	0.213368
1	Злость (anger)	0.458358	0.992345	0.005212	0.259689
2	Грусть (sadness)	0.244089	0.991080	0.001725	0.226408
3	Страх (fear)	0.498132	0.995031	0.005922	0.255033

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что данные являются скорее корректными, так как для эмоции радость среднее значение сгруппированного результата ближе к 1, чем к 0. Аналогичный, но обратный вывод, может быть сделан об эмоции грусти: среднее значение сгруппированного результата эмоции находится ближе к значению 0. Полученные значения являются ожидаемыми, поскольку эмоцию радости можно классифицировать как положительную, а эмоцию грусти – как отрицательную. Отметим, что сбалансированность выборки по количеству представленных эмоций была соблюдена.



В качестве архитектуры модели машинного обучения для выделения эмоции из подготовленных ранее данных использована двунаправленная модель LSTM со слоем CNN [2], представленная рисунком:

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 100)]	0	
embedding (Embedding)	(None, 100, 500)	5000000	input_1[0][0]
spatial_dropout1d (SpatialDropo	(None, 100, 500)	0	embedding[0][0]
bidirectional (Bidirectional)	(None, 100, 256)	644096	spatial_dropout1d[0][0]
conv1d (Conv1D)	(None, 98, 64)	49216	bidirectional[0][0]
global_average_pooling1d (Globa	(None, 64)	0	conv1d[0][0]
global_max_pooling1d (GlobalMax	(None, 64)	0	conv1d[0][0]
concatenate (Concatenate)	(None, 128)	0	global_average_pooling1d[0][0] global_max_pooling1d[0][0]
dense (Dense)	(None, 4)	516	concatenate[0][0]

Рис. Конечная архитектура двунаправленной модели LSTM со слоем CNN

Суть такого подхода в том, что модель LSTM собирает информацию о контексте предложения в тексте, а слой CNN извлекает отличительные особенности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе также была произведена классификация с помощью алгоритмов, не использующих нейронные сети обучения: «Случайный лес», «Полиномиальная логистическая регрессия», «К ближайших соседей» и «Метод стохастического градиентного спуска».

В таблице 3 представлены усредненные значения каждой из оценочных мер [3] для различных методов классификации, где ДПКО – общая доля правильно классифицированных объектов.

Таблица 3

### Оценочные значения различных классификаторов

Классификатор	Точность	Полнота	F-мера	ДПКО
CNN+LSTM	0.84	0.87	0.86	85.53
Логистическая регрессия	0.67	0.67	0.66	66.58
Градиентного стохастического спуска	0.66	0.66	0.66	65.57
Случайный лес	0.64	0.64	0.64	64.02
К ближайших соседей	0.58	0.58	0.57	57.81

Отметим, что подход с использованием нейронных сетей с архитектурой LSTM и CNN для исследуемого набора данных, достигает лучших результатов, чем использование традиционных классификаторов.

Данная работа имеет ряд ограничений, которые нельзя не принимать во внимание:

- эксперимент проводился с 4-мя категориями эмоций;
- случайное разделение на обучающую и тестирующую выборки;
- использование TF-IDF как метода выбора признаков;
- ограниченная длина текстов в наборе данных (140 символов).

#### Библиографические ссылки

1. *Форсайт Д. А., Понс Ж.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М., 2004.
2. *Xingyou Wang, Weijie Jiang, Zhiyong Luo.* Combination of Convolutional and Recurrent Neural Network for Sentiment Analysis of Short // Proceedings of COLING 2016. Osaka, 2016. P. 2428–2437.
3. *Шутиков В.К., Мاستицкий С.Э.* Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. // Атрибуция. – Тольятти, 2017. – 351 с.

# ЗАДАЧА НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТРАФИКЕ

**Р. Ю. Коба**

*Белорусский государственный университет, г. Минск  
kobaroman1999@gmail.com  
науч. рук. – В. А. Образцов, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Правильное распределение своего времени – необходимый навык для каждого из нас. К сожалению, людям приходится отводить время для вещей и действий, которые напрямую с их целями не связаны. Таким действием для большинства людей является передвижение на транспорте. В современных реалиях в крупных городах и мегаполисах наблюдаются большие проблемы с трафиком из-за большого количества участников дорожного движения, вследствие чего возникают пробки или аварии.

Поэтому задача навигации в условиях сложной динамической дорожной обстановки приобретает невероятно высокое значение.

В данной работе была поставлена цель разработать собственный навигатор, который будет учитывать дорожную ситуацию и выдавать результаты, максимально приближенные к реальным значениям.

**Ключевые слова:** навигатор; кратчайший путь; A\*; OSM; трафик.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для разработки навигатора, который имеет возможность на высоком уровне обрабатывать дорожную ситуацию, были выделены следующие задачи:

1. Изучение эффективных алгоритмов нахождения кратчайшего пути для дорожного графа;
2. Выбор максимально полного источника геоданных и дорожно-транспортной обстановки;
3. Учёт различных факторов дорожно-транспортной обстановки при реализации алгоритма кратчайшего пути для дорожного графа.

Рассмотрим подробнее каждый этап.

## **ЗАДАЧА КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ НА ДОРОЖНОМ ГРАФЕ**

Для задачи кратчайшего пути, которая в базовом случае может быть решена несколькими известными алгоритмами, например, Дейкстры, существует несколько эвристик, применимых к дорожному графу: A\*, двунаправленный поиск, построение иерархии дорог, Reach, Arc-Flags, ALT.

Эвристики Reach, Arc-Flags, ALT, рассмотренные в статьях [1, 2], и эвристика построения дорог позволяют незначительно ускорить работу

алгоритма за счёт предобработки дорожного графа, сохраняя полезную информацию для основного этапа работы алгоритма. С другой стороны, они требуют предварительной обработки и сохранения результатов, что тратит время и память, а значит плохо подходят для решения задач, требующих учёта возможности динамического изменения ситуации в дорожной сети в процессе движения.

Поэтому при построении собственной навигационной системы указанные эвристики не использовались.

## **A\***

Алгоритм A\* (A star) является модификацией алгоритма Дейкстры. Отличие заключается в том, что A\* использует факт географической природы графа: вводится ограничение на распространение “волны” поиска в направлении от целевой точки путём поощрения движения к цели. [3]

Алгоритм сокращает время получения результата и количество рассматриваемых элементов дорожного графа. Первое преимущество необходимо при работе с большими картами или при частом использовании алгоритма. Второе преимущество особо заметно при использовании API. В этом случае алгоритм обращается к меньшему количеству вершин и дуг, что уменьшает количество обращений через API к сервисам геоданных.

При правильной реализации данный алгоритм значительно лучше алгоритма Дейкстры, и при этом он не имеет существенных недостатков. В разрабатываемой навигационной системе был использован именно данный алгоритм построения кратчайшего пути.

## **ИСТОЧНИКИ ГЕОДАНЫХ И ДОРОЖНОЙ ОБСТАНОВКИ**

Из множества источников геоданных, которые можно было бы использовать при разработке собственного навигатора, был выделен проект OpenStreetMap (OSM). В работе он используется в качестве основного источника информации по следующим причинам:

1. Карты OpenStreetMap - это открытый интернет-проект;
2. OSM - это единственные карты, к внутреннему устройству которых у стороннего пользователя есть полный доступ. Для всех остальных карт можно получить только готовую картинку с нарисованной картой;
3. Основная задача проекта - собрать глобальную базу данных, содержащую различную информацию о каждой точке на поверхности Земли, а не построение коммерческой карты. На основе базы собранных данных любой другой проект и сервис может проводить свою работу и создавать собственные карты.

Однако проект имеет и значительный недостаток: среди данных проекта отсутствует информация о динамическом трафике. Единственная информация касательно загруженности дорог находится в теге `maxspeed:practical`, которая не может являться самостоятельным источником данных о трафике по причине своей статичности.

Получение динамической информации оказалось значительным препятствием в разработке программы, ведь существующие навигационные системы не предоставляют её для использования в частных проектах. Для решения вопроса было решено моделировать динамический трафик, поэтому в дополнение к OSM был рассмотрен портал [data.cityofchicago.org](http://data.cityofchicago.org), предоставляющий информацию об историческом динамическом трафике на дорогах города Чикаго.

### **УЧЁТ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ**

В проекте были рассмотрены два варианта моделирования дорожного трафика:

1. Использование тега OSM `maxspeed:practical`;
2. Моделирование трафика на основе базы данных исторического трафика Чикаго, предоставляемого на сайте [data.cityofchicago.org](http://data.cityofchicago.org).

В первом случае программа полагается на информацию OSM по фактической скорости на дороге.

Во втором случае была выделена средняя скорость движения в Чикаго для каждого типа дороги с интервалом времени в один час. Эта средняя скорость была применена к соответствующим типам дорог всей рассматриваемой карты.

Также был рассмотрен вариант, который совмещает два предыдущих.

Учёт светофоров и пешеходных переходов при расчёте времени, затраченного на путь, оказался не лёгкой задачей, ведь настройки каждого светофора индивидуальны, а описать каждое устройство невозможно. В разработанном приложении используется фиксированное количество времени на торможение и разгон автомобиля, а для определения вероятности ожидания на светофоре и переходе используется вероятностное распределение Бернулли (с вероятностью 25% водителю необходимо будет остановиться), а время ожидания равновероятно от 0 до 20 секунд.

### **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ**

Была разработана навигационная система для города Минска, вычисляющая кратчайший путь и оценочное время, затраченное на него, учитывающая дорожные перекрёстки, светофоры, пешеходные переходы, максимально допустимую скорость на дороге и трафик.

При моделировании трафика только при помощи данных OSM сколько-нибудь значащих результатов получено не было. Информация по трафику получилась статичной и независимой от времени, а также присутствовала не для каждого участка дороги.

При моделировании трафика на основе динамических исторических данных [data.cityofchicago.org](http://data.cityofchicago.org) были получены завышенные оценки затраченного времени для пути, что, возможно, объясняется большей загруженностью дорог в Чикаго, чем на рассматриваемом участке – городе Минске.

Наилучший результат был получен при совмещении двух указанных способов. Трафик моделировался исходя из отношения скорости на дорогах указанного типа в определённый промежуток времени к средней дневной скорости для дорог данного типа, однако среднее значение скорости движения для каждого типа дороги изымалось из тега `maxspeed:practical`. Дальнейшие результаты получены для данного метода моделирования трафика.

Программа отображает приближенные к реальности значения, проложенный путь в большинстве случаев близок к предлагаемым системами Яндекс.Карты и OSM, но оценочные значения затраченного на дорогу времени на карте города Минска всё ещё имеют некоторое отклонение от значений, предлагаемых в профессиональных навигаторах. Согласно экспериментам, в среднем отклонение составляет не более 10% по длине маршрута и не более 16% по оценочному времени.

Погрешность работы разработанного навигатора объясняется тем, что при работе использовался бесплатный ресурс OSM, заполнение данных в котором производится энтузиастами, что негативно говорит о качестве данных. Также система моделирования дорожной ситуации имеет возможности для улучшения.

При соответствующей доработке результаты могут быть использованы при разработке реальных навигационных систем.

#### **Библиографические ссылки**

1. *R. J. Gutman*. Reach-Based Routing: A New Approach to Shortest Path Algorithms Optimized for Road Networks. In Proceedings of the 6th Workshop on Algorithm Engineering, 2004.
2. *Goldberg, A.V., Werneck, R.F.* Computing Point-to-Point Shortest Paths from External Memory. In: Proceedings of the 7th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX 2005), pp. 26–40.
3. *P. E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael*, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetic, Vol. 4, No. 2, 1968, pp. 100-107.

# СЕГМЕНТАЦИЯ И ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПО СНИМКАМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

**А.С. Кузьмик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*alexander.kuzmik99@gmail.com*

*науч. рук. – В. В. Горячкин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В данной статье рассматривается подход для сегментации изображений со снимков компьютерной томографии с дальнейшей трехмерной реконструкцией сегментированных структур. Статья содержит описание методов для сегментации участков скелета, внутренних органов на примере печени, а также сегментацию участка тела с фильтрацией от гипса и металлических структур на снимке. Приведены метрики, подтверждающие эффективность построенных моделей. Рассмотрен подход для получения полигональной модели на основе результатов сегментации, а также для её дальнейшей постобработки с целью выполнения ставящихся к модели технических и качественных требований. Выбрана архитектура, позволяющая эффективно выполнять задачи, соответствующие всем этапам работы. В результате комбинирования классических инструментов для реконструкции моделей по снимкам компьютерной томографии с современными методами сегментации, основанными на глубоких нейронных сетях, спроектирован программный модуль, позволяющий генерировать трехмерные модели органов и тканей. Преимущество полученного решения перед уже существующими в том, что генерация моделей требует от пользователя лишь спецификации требований к ним, что освобождает его от трудоемкой ручной работы с данными.

**Ключевые слова:** компьютерная графика, сегментация, компьютерная томография, трехмерная реконструкция, Marching cubes, нейронные сети, U-net, компьютерное зрение, каналы и фильтры.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Задача улучшения качества медицинской диагностики и планирования операций будет актуальной всегда, и программное обеспечение, позволяющее проводить трехмерную реконструкцию по снимкам компьютерной томографии, существует уже не первый год. Как правило, большинство программ в данной области уже многие годы предоставляют возможность просматривать медицинские снимки, вручную сегментировать на них нужные структуры и проводить последующую трехмерную реконструкцию.

Однако в последние годы для возможности изменения привычных инструментов появлялось всё больше предпосылок. Искусственные нейронные сети позволили экономить время путём автоматизации сегментирования сложных структур – задачи, которая ранее не решалась качественно

без участия человека. Технологии смешанной реальности перенесли полученные модели с экрана монитора прямо в операционную. В конце концов, быстрый и доступный интернет вместе с облачными технологиями дали возможность выполнять все трудоёмкие операции удаленно, снижая требования к устройствам пользователей. В результате появилась возможность вдохнуть в данную область новую жизнь, сделав для врачей процесс получения трехмерных моделей органов гораздо проще, а их использование – эффективнее.

## **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Цель данной работы – это описание методов для автоматической сегментации и трёхмерной реконструкции моделей по снимкам компьютерной томографии, создание программного модуля, реализующего описанный функционал, и внедрение данного модуля в специальное веб-приложение для врачей.

## **ВЫБОР ИНСТРУМЕНТАРИЯ**

- Для хранения снимков компьютерной томографии и их метаданных использовался формат файлов DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine)
- Для построения и постобработки полигональной модели на основе срезов тела использовалась библиотека VTK (Visualization Toolkit)
- В качестве инструмента для обработки изображений выбрана библиотека компьютерного зрения OpenCV (Open source computer vision)
- Для обучения искусственных нейронных сетей использовались библиотека Keras, набор данных SLIVER07, а также собственный, синтетически созданный набор данных для сегментации гипса и металлических структур, окружающих участок тела на снимках

## **АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ БАЗОВОЙ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ**

В качестве метода для сегментации на данном этапе был выбран простейший фильтр бинаризации изображений. Для сегментирования костных тканей на снимках были оставлены только те пиксели, чья яркость (плотность) не меньше табличного значения плотности костей [1].

С помощью алгоритма «Marching cubes» [2] на основе сегментированных снимков строится полигональная модель участка скелета, попавшего на серию снимков. Так создаётся базовая модель, которую можно дорабатывать различными модификациями.



## АРХИТЕКТУРА «КАНАЛЫ И ФИЛЬТРЫ»

Построенная трехмерная модель может не отвечать техническим или качественным требованиям. Например, на ней могут иметься лишние артефакты, оставшиеся после сегментации, или же объём занимаемой ею памяти слишком велик из-за большого числа полигонов. Для обеспечения возможности постобработки построенной модели был применен шаблон «Каналы и фильтры» [3] с кэшированием промежуточных результатов для возможности пересоздать модель с другими модификациями, начиная с её последнего неизменного состояния.

Были созданы следующие фильтры:

- Фильтр чистки от изолированных артефактов
- Редуцирующий фильтр для уменьшения числа полигонов в модели
- Сглаживающий фильтр

## СЕГМЕНТАЦИЯ СНИМКОВ

Ранее был описан процесс сегментации участков скелета с помощью фильтра бинаризации. Данный метод подходит для сегментации костей, т.к. из-за высокой плотности они легко отличимы на снимках от мягких тканей как минимум по распределению значений яркости пикселей.

Для сегментации более сложных структур, которые невозможно качественно выявить исключительно по их плотности, были использованы искусственные нейронные сети [4] архитектуры U-net [5] с использованием кодировщика изображения архитектуры ResNet [6].

В рамках работы были обучены модели для сегментации двух видов структур. Для измерения качества использовалась метрика IoU (Intersection over union).

Первая сеть (модель) предназначена для сегментации печени, использовался открытый набор данных SLIVER07, достигнутый показатель IoU равен 0.91.

Вторая модель обучена для сегментации всех структур, не являющихся гипсом или металлической структурой, находящейся снаружи тела. Эта задача решалась по той причине, что яркость гипса или металла на снимках зачастую совпадают с яркостью костей, из-за чего оба материала могут попасть на трехмерную модель, «загородив» обзор. Набор данных для данной задачи был сгенерирован вручную с помощью методов для работы с изображениями библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Полученный показатель IoU – 0.97.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были доработаны методы сегментации и трёхмерной реконструкции по снимкам компьютерной томографии. Был спроектирован программный модуль, реализующий описанный функционал. Интерфейс данного модуля предоставляет возможность получения необходимых трехмерных моделей исключительно путём спецификации требований того, какая именно модель необходима, освобождая пользователей от ручной работы с данными.

Искусственные нейронные сети показали высокое качество решения задач по сегментации сложных структур на изображениях, а комбинирование такого подхода с традиционными алгоритмами дало возможность быстро получать трёхмерные модели, соответствующие поставленным требованиям, практически без вмешательства человека.

Созданный программный модуль встроен в серверную часть веб-приложения, используемого хирургами Республиканского Научно-Практического Центра травматологии и ортопедии для планирования операций в очках смешанной реальности.

### Библиографические ссылки

1. "Computed Tomography (CT) Scanning" [Electronic resource]. — Mode of Access: <https://teachmeanatomy.info/the-basics/imaging/computed-tomography-ct-scans/>
2. *Lorensen, William E., Harvey E. Cline*, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm" [Electronic resource]. — Mode of Access:
3. [https://www.researchgate.net/publication/202232897\\_Marching\\_Cubes\\_A\\_High\\_Resolution\\_3D\\_Surface\\_Construction\\_Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/202232897_Marching_Cubes_A_High_Resolution_3D_Surface_Construction_Algorithm)
4. "Образцы проектирования: Каналы и фильтры" [Электронный ресурс].
5. Режим доступа — <https://www.intuit.ru/studies/courses/64/64/lecture/1878?page=4>
6. *Mehlig B.* "Artificial Neural Networks" [Electronic resource]. — Mode of Access: <https://arxiv.org/pdf/1901.05639.pdf>
7. *Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox*, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation" [Electronic resource]. — Mode of Access:
8. <https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf>
9. *Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun*, "Deep Residual Learning for Image Recognition" [Electronic resource]. — Mode of Access: <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf>

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ИНТОНАЦИЙ РЕЧИ

**С. А. Лапицкая, Ю. С. Гецевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
sveta.lapitskaya@gmail.com;  
науч. рук. – Ю. С. Гецевич, канд. техн. наук, доц.*

Попытка описать интонации человеческой речи была предпринята еще в 1960-х годах Е. А. Брызгуновой, которая выделила семь интонационных конструкций русского языка [1]. Однако ее описания не являются полными и строгими. Они понятны лингвистам, но не могут быть применены для компьютерной обработки аудиозаписей. Для наглядного представления интонационных конструкций позже была разработана модель портретов акцентных единиц [2]. В настоящей работе рассматривается применение методов машинного обучения для разработки алгоритма распознавания интонаций речи. Для достижения поставленной цели была сформирована база данных, исследованы признаки, характеризующие аудиосигналы, и отобраны те, которые являются наиболее чувствительными к интонациям. Кроме того, для демонстрации полученных результатов широкому кругу пользователей было реализовано веб-приложение.

**Ключевые слова:** интонации речи, алгоритмы распознавания, машинное обучение, модели, веб-сервис.

## ВВЕДЕНИЕ

Интонации играют важную роль при восприятии речи человеком. Они являются средством передачи языковой и социокультурной информации, с их помощью определяется коммуникативная направленность выражения и его логический смысл. Очень часто в зависимости от интонации идентичные высказывания могут иметь различное семантическое значение.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма распознавания интонаций речи с использованием методов машинного обучения.

Областью применения могут быть системы автоматического преобразования речи в текст. С помощью алгоритмов распознавания интонаций появится возможность автоматической расстановки знаков препинания. Это, например, может быть использовано для генерации субтитров и полезно для людей с нарушениями слуха. Другой возможной сферой применения являются системы для изучения иностранных языков.

## ДААННЫЕ К ЗАДАЧЕ

Для решения поставленной задачи была создана и размечена собственная база данных для белорусского языка. Данные были взяты из модулей

IntonTrainer, озвучки мультфильмов и аудиокниг, а также начитаны и записаны в студии с помощью профессионального оборудования. База данных содержит 427 аудиофайлов и включает три типа интонации. Количество аудиофайлов для каждой интонации отображено в Таблице 1.

Таблица 1

База данных

Тип интонации	Количество аудиофайлов
Завершающая	120
Вопросительная	142
Восклицательная	165

## Аугментация

Также дополнительно использовалась аугментация. Аугментация данных – это способ создания дополнительных обучающих данных из уже имеющихся. Предварительно данные были разделены на тестовую и обучающую выборки. Аугментация применялась только к последней. Использовались следующие преобразования:

- Ускорение и замедление
- Изменение высоты сигнала
- Удаление фрагмента звукового файла

Эти преобразования были выбраны по причине того, они не меняют интонацию, но амплитуда и частота сигнала изменяются. На Рисунке 1 приведен пример первого преобразования, слева изображена осциллограмма исходного аудиофайла, а справа – полученного в результате его ускорения в 1.5 раза.

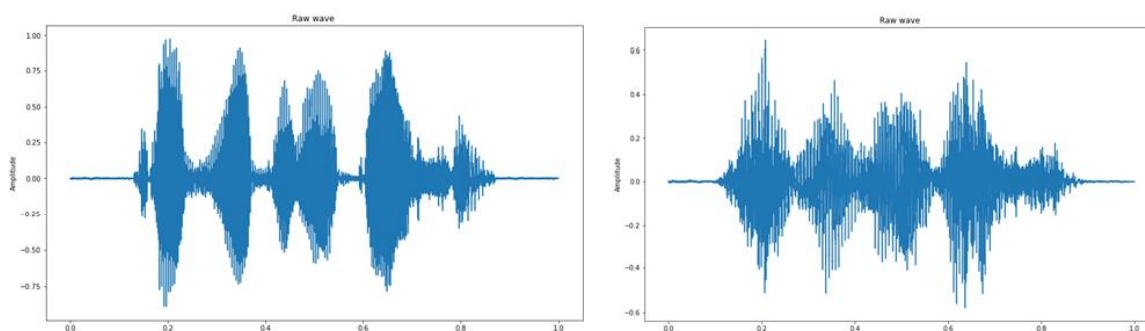


Рис. 1. Осциллограмма исходного аудиофайла (слева) и ускоренного (справа)

## ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ

Данные аудиофайлов не могут быть поняты моделями машинного обучения в их первоначальном виде. Извлечение признаков необходимо непосредственно для преобразования их в понятный формат.

Для работы со звуковыми данными была использована библиотека LibROSA, реализованная на языке программирования Python.

В ходе выполнения работы были исследованы различные комбинации признаков. Наилучшие результаты были получены на следующем наборе:

- хромограмма;
- мелспектрограмма;
- мел-кепстральные коэффициенты.

Хромограмма – это представление звукового сигнала в виде матрицы, где ось  $Ox$  – время,  $Oy$  – тона. Мелспектрограмма отображает зависимость мощности сигнала от времени и частоты в мел шкале. Мел-кепстральные коэффициенты помогают приблизиться к тому, как воспринимает аудиосигнал человек. Они обладают повышенной помехоустойчивостью и позволяют принимать достоверные решения на относительно коротких интервалах анализа речи.

## МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Машинное обучение – довольно новое направление в науке, однако несмотря на это оно хорошо себя зарекомендовало и в последнее время развивается стремительными темпами. Для решения поставленной задачи использовались алгоритмы классического машинного обучения и библиотека Scikit-learn, реализованная на языке программирования Python[3]. Для оптимизации модели была выбрана метрика F1-мера, которая представляет из собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. В терминах машинного обучения поставленная задача относится к мультиклассовой классификации.

Были реализованы различные алгоритмы, для подбора гиперпараметров использовалась технология Grid search. Результаты отражены в Таблице 2.

*Таблица 2*

### Результаты работы различных алгоритмов

Модель	F1-мера
Decision tree	0.57
Random forest	0.66
KNN	0.60
SVM	0.75
Logistic Regression	0.67
Ridge Classifier	0.84

В качестве итоговой модели был выбран Ridge Classifier, значение F1-меры для которого 0.84.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕБ-СЕРВИСА

Веб-приложение было реализовано на языке Python с использованием фреймворка Flask, интерфейс которого изображен на Рисунке 3. В левой части окна расположены четыре вкладки: *Примеры*, *Записать*, *Загрузить*, *Тесты*. На первой вкладке находится база примеров, в которую заранее загружены несколько звуковых файлов из тестовой выборки для каждого типа интонации. На вкладке *Записать* пользователю предоставляется возможность с помощью микрофона записать собственную речь, а на вкладке *Загрузить* – выбрать аудиофайл с локального компьютера. На последней вкладке отображаются результаты тестов, которые выполняются в момент открытия приложения. Результат классификации отображается в правой части экрана в специальном текстовом поле.

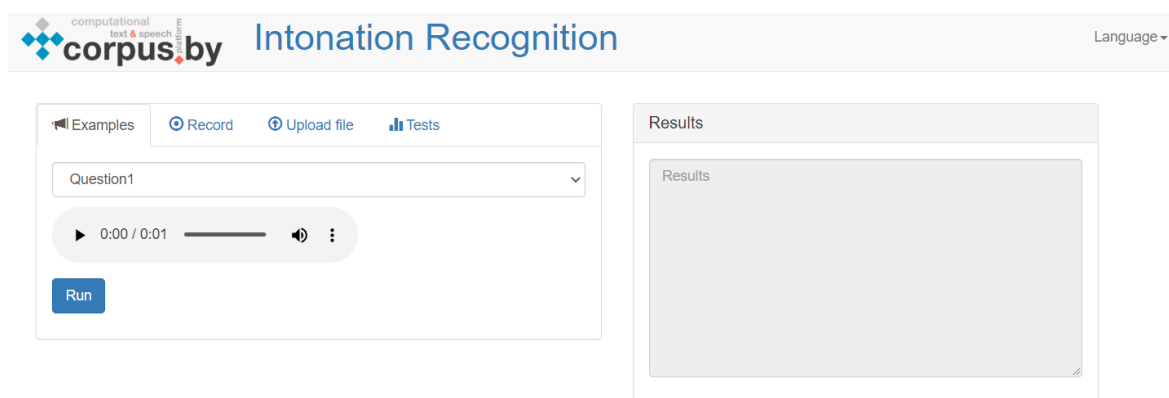


Рис. 2. Интерфейс реализованного веб-сервиса

Реализованный веб-сервис был размещен на платформе corpus.by и сейчас находится в общем доступе по следующей ссылке: <https://www.corpus.by/IntonationRecognizer>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были выделены основные признаки, характеризующие аудио-сигналы и влияющие на интонации, и составлена база данных из более чем 400 аудиофайлов. Была обучена модель машинного обучения, которая на тестовом наборе данных показывает значение F1-меры 0.84. Для демонстрации результатов широкому кругу пользователей реализован веб-сервис. Учитывая расширяемость приложения, оно может быть использовано и для работы с другими языками при условии добавления соответствующих моделей.

### Библиографические ссылки

1. Брызгунова Е. А. // Звуки и интонация русской речи. Наука, 1968 – 281с.

2. Лобанов Б.М., Окрут Т.И. // Универсальные мелодические портреты интонационных конструкций русской речи. Материалы Международной конференции “ДИАЛОГ 2014”, Минск, Беларусь.
3. Aurélien G. // Hands on Machine Learning with Scikit Learn and Tensorflow. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. 718 p.
4. Лобанов Б.М., Цирульник Л. И. // Компьютерный синтез и клонирование речи. Минск: Белорусская наука, 2008. 344 с.

# МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ ПО ПРОВЕРКЕ И РЕМОНТУ ГРУЗОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

М. Н. Лукашевич, М. Я. Ковалев

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*mikhail.n.lukashevich@gmail.com;*

*науч. рук. – М. Я. Ковалев, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Рассматривается следующая задача. Грузовые контейнеры разных типов, прибывающие в порт, необходимо осмотреть и, возможно, отремонтировать для дальнейшего удовлетворения ежедневного спроса пользователей. Контейнеры прибывают на площадку 0, а осматриваются и ремонтируются на этой и  $F$  других площадках. Осмотр и ремонт любого контейнера производится в один и тот же день. Требуется найти план распределения контейнеров по площадкам и их осмотра и ремонта во времени такой, чтобы спрос был выполнен и суммарная стоимость осмотра, ремонта, перевозки и хранения контейнеров была минимальна. Приводится формулировка задачи оптимального планирования работ по проверке и ремонту грузовых контейнеров и ее сведение к задаче математического программирования.

**Ключевые слова:** оптимальное планирование, грузовые контейнеры, линейное программирование, управление запасами, минимум совокупных издержек.

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Входные параметры:  $j = 1, \dots, n$  – типы контейнеров;  $f = 0, 1, \dots, F$  – площадки;  $t = 0, 1, \dots, T$  – дни горизонта планирования;  $q = 0, 1, \dots, Q + 1$  – уровни качества в порядке ухудшения ( $q = 0$  – идеальное состояние,  $q = Q + 1$  – качество для утилизации);  $k_{jt}$  – количество контейнеров типа  $j$ , прибывающих на площадку 0 в начале периода времени  $t$ ;  $u_{jt}$  – запас неиспектированных контейнеров типа  $j$  на площадке  $f$  в начале дня 1;  $g_{jf}$  – запас контейнеров типа  $j$  и уровня качества 0 на площадке  $f$  в начале дня 1;  $d_{jt}$  – спрос на контейнеры типа  $j$  и уровня качества 0, который должен быть удовлетворен к концу дня  $t$ ;  $m$  – верхняя граница на число контейнеров любого типа, которые могут быть перемещены с площадки 0 на все другие площадки в один и тот же день;  $\frac{p_{jq}}{100}$  – вероятность того, что

уровень качества любого неиспектированного контейнера типа  $j$  равен

$q$ ,  $\sum_{q=0}^{Q+1} p_{jq} = 100$ ;  $s_j$  – количество человеко-часов, необходимых для

проверки одного контейнера типа  $j$  на любой площадке;  $V_f$  – верхняя граница человеко-часов, доступных для проверки контейнеров на площадке  $f$  в любой день;  $r_{jq}$  – количество человеко-часов, необходимых для ремонта одного контейнера типа  $j$  и уровня качества  $q \neq Q + 1$  на любой



площадке;  $U_f$  – верхняя граница человеко-часов, доступных для ремонта контейнеров на площадке  $f$  в любой день;  $W_f$  – вместимость площадки  $f$ , т.е. количество контейнеров всех типов, которые могут одновременно храниться на  $f$  при переходе между двумя любыми соседними днями;  $c_j^{(i)}$  – стоимость осмотра одного контейнера типа  $j$  любого уровня качества на любой площадке;  $c_{jq}^{(r)}$  – стоимость ремонта одного контейнера типа  $j$  и уровня качества  $q$  на любой площадке;  $c_j^{(r)} = \frac{\sum_{q=0}^Q c_{jq}^{(r)} p_{jq}}{100}$  – ожидаемая стоимость ремонта одного контейнера типа  $j$  любого уровня качества, кроме уровня качества  $Q + 1$ , на любой площадке;  $c_f^{(tra)}$  – стоимость перевозки одного контейнера любого типа с площадки 0 на площадку  $f \geq 1$ ;  $c_f^{(hol)}$  – стоимость хранения одного контейнера любого типа на площадке  $f$  при переходе между двумя любыми соседними днями.

Задача минимизации суммарной стоимости осмотра, ремонта, перевозки и хранения контейнеров, при условии выполнения спроса, может быть сформулирована следующим образом. Введем переменную  $x_{j,f,t,f',t',\cdot}$ , которая представляет количество контейнеров типа  $j$ , перемещенных с площадки  $f$  на площадку  $f'$  при переходе с дня  $t$  на день  $t' \in \{t, t + 1\}$ . Символ  $\cdot \in \{-, \circ, \bullet, \times, *\}$  характеризует неинспектированные и неотремонтированные контейнеры ( $\cdot = -$ ), контейнеры уровня качества 0 ( $\cdot = \circ$ ), отремонтированные контейнеры ( $\cdot = \bullet$ ), контейнеры, перемещаемые с площадки  $f = 0$  на площадку  $f' \geq 1$  ( $\cdot = \times$ ) и контейнеры для утилизации ( $\cdot = *$ ). Массив переменных  $x_{j,f,t,f',t',\cdot}$  обозначим через  $x$ .

## ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА

$$\min_n \sum_{j=1}^n (Hol_j(x) + IR_j(x) + Tra_j(x)),$$

где

$$Hol_j(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F c_f^{(hol)} (x_{j((f,t),(f,t+1),-)} + x_{j((f,t),(f,t+1),\circ)} + x_{j((f,t),(f,t+1),\bullet)})$$

общая стоимость хранения контейнеров типа  $j$  на всех площадках,

$$IR_j(x) = (c_j^{(i)} + c_j^{(r)}) \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)} + c_j^{(i)} \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F x_{j((f,t),(F+1,t),\blacklozenge)}$$

общая стоимость осмотра и ремонта контейнеров типа  $j$ , и

$$Tra_j(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F c_f^{(tra)} \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F x_{j((0,t),(F+1,t),\times)}$$

общая стоимость перевозки контейнеров типа  $j$ , при следующих ограничениях:

$$x_{j((-1,t),(0,t),-)} = k_{jt}, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T, \quad (1)$$

$$x_{j((f,0),(f,1),\circ)} = g_{jf}, j = 1, \dots, n, f = 0, 1, \dots, F, \quad (2)$$

$$x_{j((f,0),(f,1),-)} = u_{jf}, j = 1, \dots, n, f = 0, 1, \dots, F, \quad (3)$$

$$x_{j((f,t),(F+1,t),\blacklozenge)} = \frac{p_{j,Q+1}}{100} \left( x_{j((f,t),(F+1,t),\blacklozenge)} + x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)} \right), \\ f = 0, 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \quad (4)$$

$$x_{j((0,t),(f,t),\times)} + x_{j((f,t-1),(f,t),-)} = x_{j((f,t),(f,t+1),\bullet)} + x_{j((f,t),(f,t+1),-)} + \\ x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)} + x_{j((f,t),(F+1,t),\blacklozenge)}, f = 0, 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \quad (5)$$

$$x_{j((f,t-1),(f,1),\circ)} + x_{j((f,t-1),(f,1),\bullet)} + x_{j((f,t),(f,t+1),\circ)} + x_{j((f,t),(F+1,t),\circ)} = \\ u_{jf}, f = 0, 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \quad (6)$$

$$\sum_{f=0}^F (x_{j((f,t-1),(f,t),\circ)} + x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)}) = d_{jt}, j = 1, \dots, n, t = \\ 1, \dots, T, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{f=1}^F x_{j((0,t),(F+1,t),\times)} \leq m, f = 0, 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n S_j (x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)} + x_{j((f,t),(F+1,t),\blacklozenge)}) \leq V_f, f = 0, 1, \dots, F, t = \\ 1, \dots, T, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n r_j (x_{j((f,t),(F+1,t),\bullet)}) \leq V_f, f = 0, 1, \dots, F, t = 1, \dots, T, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{j((f,t),(f,t+1),-)} + x_{j((f,t),(f,t+1),\circ)} + x_{j((f,t),(f,t+1),\bullet)} \leq W_f, f \\ = 0, 1, \dots, F,$$

$$t = 1, \dots, T, \quad (11)$$

$$x \geq 0. \quad (12)$$

Исследуемая задача может быть отнесена к классу многопродуктовых динамических задач управления запасами. Исследования таких задач были начаты Вагнером и Витином [8] и продолжены, среди прочих, Као [5], Чубановым и др. [2], Ли и др. [7], Кимом и Ли [6], Кан-гом и др. [4], Ву и др. [9], Кунхой и др. [3] и Алтендорфером [1]. Приведенная алгебраическая постановка задачи является задачей линейного программирования и для ее решения можно воспользоваться стандартным программным обеспечением.

#### **Библиографические ссылки**

1. Altendorfer, K. Effect of limited capacity on optimal planning parameters for a multiitem production system with setup times and advance demand information. *International Journal of Production Research*. 2019; 57(6): 1892-1913.
2. Chubanov, S., Kovalyov, M.Y., Pesch, E. A single-item economic lot-sizing problem with a non-uniform resource: Approximation. *European Journal of Operational Research*. 2008; 189(3): 877-889.
3. Cunha, J.O., Kramer, H.H., Melo, R.A., Effective matheuristics for the multi-item capacitated lot-sizing problem with remanufacturing. *Computers and Operations Research*. 2019; 104: 149-158.
4. Kang, Y., Albey, E., Uzsoy, R., Rounding heuristics for multiple product dynamic lot-sizing in the presence of queueing behavior. *Computers and Operations Research*. 2018; 100: 54-65.
5. Kao, E.P.C., A multi-product dynamic lot-size model with individual and joint set-up costs. *Operations Research*. 1979; 27(2): 279-289.
6. Kim, B.S., Lee, W.S., A multi-product dynamic inbound ordering and shipment scheduling problem at a third-party warehouse. *International Journal of Industrial Engineering*. 2013; 20(1-2): 36-46.
7. Li, W.Z., Tao, Y., Wang, F., An effective approach to multi-item capacitated dynamic lot-sizing problems. *International Journal of Production Research*. 2012; 50(19): 5348-5362.
8. Wagner, H.M., Whitin, T.M., Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*. 1958; 5(1): 89-96.
9. Wu, T., Xiao, F., Zhang, C., He, Y., Liang, Z., The green capacitated multi-item lot sizing problem with parallel machines. *Computers and Operations Research*. 2018; 98: 148-164.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРОТИВООПУХОЛЕВЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТНЫХ ИНГИБИТОРОВ ТЕЛОМЕРАЗЫ

А. В. Меркушова, А. М. Андрианов

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*St.merkush@gmail.com;*

*науч. рук. – А. М. Андрианов, д-р хим. наук, проф.*

Прогрессирующая потеря теломерных концов хромосом является важным механизмом синхронизации, контролирующим удвоение числа клеток. Теломераза представляет собой фермент, который удлиняет одну цепь теломерной ДНК и компенсирует ее укорочение во время репликации. Поэтому активность теломеразы служит маркером пролиферации. Активность теломеразы не обнаруживается в большинстве соматических клеток, за исключением эмбриональных тканей, стволовых клеток и репродуктивных органов. В большинстве опухолевых клеток (80-90%) теломераза активируется и играет роль основного инструмента, поддерживающего длину теломер. Тестирование активности теломеразы чрезвычайно важно при поиске новых ингибиторов теломеразы – потенциальных противоопухолевых препаратов. В настоящей работе с помощью метода виртуальной комбинаторной химии сконструированы два потенциальных ингибитора теломеразы и проведена оценка их противоопухолевой активности на основе оценочной функции программы молекулярного докинга AutoDockVina. Выполнено предсказание фармакокинетических характеристик разработанных соединений. Показано, что сконструированные соединения формируют перспективные базовые структуры для разработки новых эффективных противоопухолевых препаратов.

**Ключевые слова:** рак, голофермент теломеразы человека, ингибиторы теломеразы, молекулярный докинг, противоопухолевые препараты.

## ВВЕДЕНИЕ

В 1961 г. Хайфлик и Мурхиад открыли, что соматические клетки имеют ограниченный период жизни. В 1973 была выдвинута гипотеза (гипотеза конечной репликации) в соответствии с которой наблюдается укорочение теломер с прогрессирующим делением клеток *in vitro* и увеличением возраста *in vivo*. Нормальные соматические клетки пролиферируют ограниченное число раз *in vitro*, причем максимальное число называется пределом Хейфлика [1].

Теломеры выполняют несколько важнейших биологических функций. Они защищают хромосомы от рекомбинации, сквозного слияния и обеспечивают средство для полной репликации хромосом, участвуют в регуляции экспрессии генов. Очевидно, что в клетках, которые вос-

становливают длину теломер, должен существовать механизм, позволяющий им добавлять особые повторяющиеся последовательности нуклеотидов ДНК. В 1985 г. Блекберн и Грейберг открыли фермент, удлиняющий теломеры, – теломеразу. Теломераза – это РНК-зависимая ДНК-полимераза, которая синтезирует теломерные последовательности ДНК и обеспечивает молекулярную основу для неограниченного пролиферативного потенциала. Было обнаружено, что теломеразная активность отсутствует в большинстве соматических клеток человека, но присутствует в более 90 % раковых. Теломераза состоит из двух основных компонентов: один из них функциональный компонент РНК (у человека называемый hTR или hTERC) , который служит шаблоном для синтеза теломерной ДНК; другой – каталитический белок (hTERT) с обратной транскриптазной активностью. Экспрессия человеческого каталитического компонента hTERT оценивается менее чем в 1-5 копий на клетку и тесно связана с активностью теломеразы в клетках. hTERT обычно подавляется в нормальных клетках, но активируется в раковых клетках. Это позволяет предположить, что hTERT является основным фактором активности фермента [2].

Из-за важной роли теломеразы в онкогенезе этот фермент является привлекательной мишенью для противоопухолевой терапии. Например, наиболее известный ингибитор теломеразы BIBR1532[3] представляет собой небольшую молекулу, взаимодействующую с активным сайтом TERT и предотвращающую его активность. Однако более чем за 10-летнюю историю BIBR1532 так и не прошел стадию клинических испытаний. Таким образом, актуальным является поиск новых эффективных ингибиторов теломеразы с большей нейтрализующей активностью и улучшенными фармакологическими свойствами.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Существует много подходов к моделированию потенциальных лекарств, однако большинство методов не подходят для решения поставленной задачи, поскольку в данном случае требуется сгенерировать большое число близких по структуре новых соединений, чтобы иметь возможность отобрать наиболее перспективные молекулы исходя из заданных свойств. С точки зрения этих критериев наиболее подходящим является метод виртуальной комбинаторной химии, реализованный в программном пакете AutoGrow4[4], который позволяет сконструировать широкий набор новых соединений для последующего анализа. AutoGrow4 использует генетический алгоритм (ГА) для создания новых

высокоаффинных лигандов. Он использует исходную популяцию заданных (базовых) молекул для создания новой популяции (т.е. поколения) потенциальных лигандов. Эти популяции делятся на "поколения", каждое из которых подчиняется трем операторам: мутацией, кроссовером и отбором.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 2018 году группа Кэтлин Коллинз впервые представила результаты криоэлектронной микроскопии теломеразы человека и субстрата голофермента, и депонировала эти структуры в Банк данных белков (Protein Data Bank; коды PDB: EMD-7518, EMD-7519, EMD-7521) [5]. При этом, однако, кокристаллизации комплекса белка и лиганда получено не было. Поэтому в этой работе для оценки связывания лиганда с белком был выделен активный сайт человеческой теломеразы (Рис.1) и выровнен с помощью метода гомологичного моделирования (программа SWISS Model) на аналогичный белок из *T.castaneum* (PDB код: 5CQG)[4] в комплексе с ингибитором BIBR1532[3].

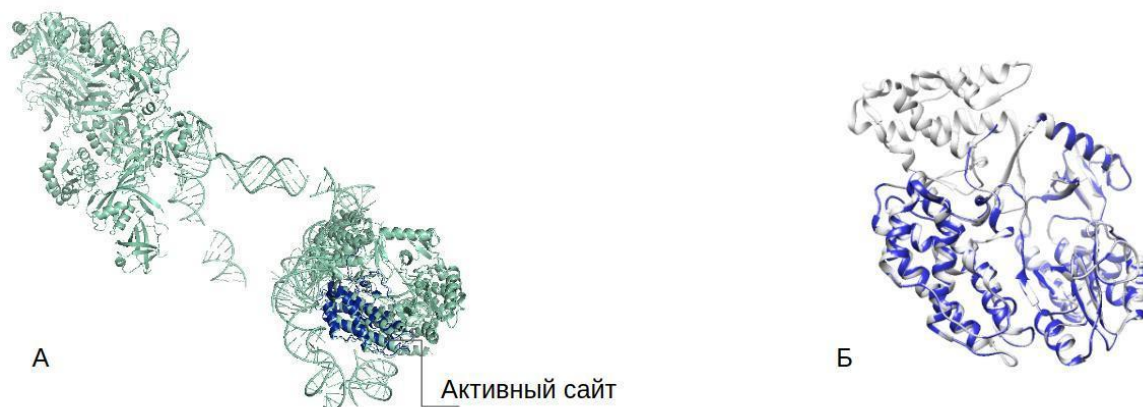


Рис. 1. А - Кокристаллизованная структура человеческой теломеразы. Б - Структура выровнена на теломеразу *T.castaneum*

В результате моделирования потенциальных ингибиторов теломеразы были отобраны два лучших по энергии связывания соединения – мутант 40951 и 818601.

## Сравнительная характеристика соединений

	VIBR1532	40951	818601
Молекулярная масса	331 г/ моль	526 г/ моль	531 г/ моль
Скоринговая функция	-8.9 ккал/моль	-10.9 ккал/моль	-12.8 ккал/моль
Взаимодействие	Ван-дер-Ваальсовы Координационные Водородные	Ван-дер- Ваальсовы Координационные	Водородные Ван-дер-Ваальсовы Координационные

В таблице 1 приведены основные характеристики полученных соединений и ингибитора теломеразы VIBR1532. Из данных таблицы 1 видно, что сконструированные соединения выигрывают по величине оценочной функции у VIBR1532. Высокое значение оценочной функции у мутанта 40951 обуславливается координационными взаимодействиями и более широкой сетью гидрофобных контактов. Количественная и качественная характеристика взаимодействия лигандов с рецептором проводилась с помощью программного пакета LigPlot. (рис. 2).

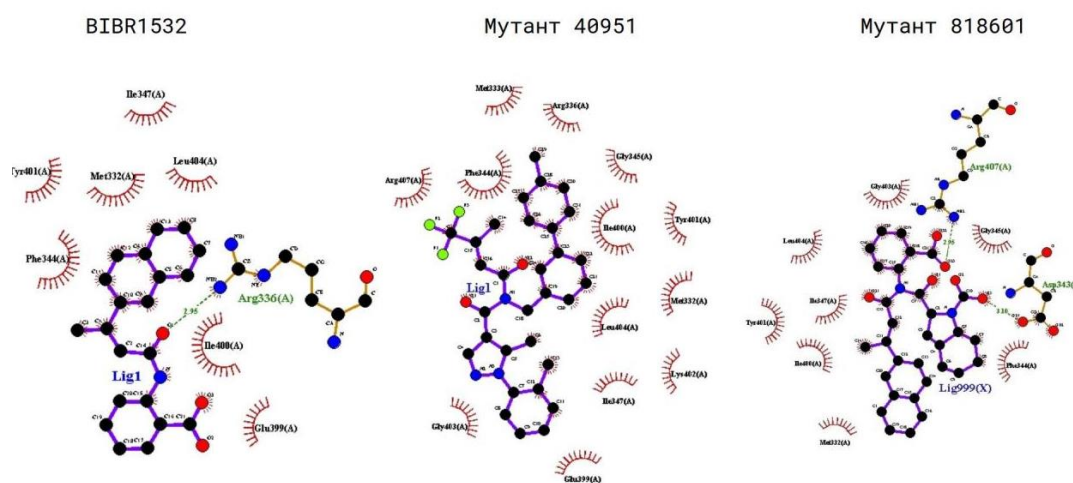


Рис. 2. Оценка соединений в LigPlot

С помощью полусфер с шипами на рисунке 1 отмечены аминокислотные остатки рецептора, а точечными линиями – водородные связи. С помощью программы Swiss ADME были предсказаны фармакологические свойства сконструированных лигандов и ингибитора VIBR1532. Результаты сравнительного анализа показали более предпочтительные фармакологические характеристики лигандов 40951 и 818601 по сравнению с соответствующими параметрами VIBR1532.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ сконструированных методами виртуальной комбинаторной химии соединений в комплексе с теломеразой свидетельствует о наличии эффективных межмолекулярных взаимодействий, приводящих к блокаде каталитического сайта фермента. По данным молекулярного докинга, комплексы этих соединений с теломеразой демонстрируют более низкие значения энергии связывания по сравнению с известным ингибитором BIBR1532. Идентифицированные соединения полностью удовлетворяют “правилу пяти” Липинского и формируют перспективные базовые структуры для разработки эффективных лекарственных препаратов для противоопухолевой терапии.

### Библиографические ссылки

1. *Hayflick, Leonard*. The serial cultivation of human diploid cellstrains / Leonard Hayflick, Paul S Moorhead //Experimental cell research. 1961. Vol. 25, no. 3. Pp. 585–621
2. Structure and variability of human chromosome ends. /T De Lange, L Shiue, RM Myers et al. //Molecular and cellular biology. 1990. Vol. 10, no. 2. Pp. 518–527.
3. Mechanism of human telomerase inhibition by BIBR1532, asynthetic, non-nucleosidic drug candidate / Emanuelle Pascolo, Christian Wenz, Joachim Lingner et al. //Journal of Biological Chemistry. 2002. Vol. 277, no. 18. Pp. 15566–15572.
4. *Spiegel J.O., Durrant J.D.* AutoGrow4: an open-source genetic algorithm for de novo drug design and lead optimization / Durrant J.D. Spiegel, J.O. //Cheminform. 2020
5. Cryo-EM structure of substrate-bound human telomerase holoenzyme / Thi Hoang Duong Nguyen, Jane Tam, Robert A Wu et al. //Nature. 2018. Vol. 557, no. 7704. Pp. 190–195.



# АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В ПРОГРАММНЫХ ЛОГАХ

**А. И. Наумович**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
nandreyn1998@gmail.com;  
науч. рук. – В. В. Краснопрошин, д-р техн. наук, проф.*

В работе рассматривается проблема распознавания аномальных ситуаций в программных логах. Предлагается подход, основанный на решении последовательности подзадач, связанных с выделением шаблонов, анализом цепочек и выделением аномалий. Разработаны алгоритмы решения указанных подзадач и на их основе реализована соответствующая программная система.

**Ключевые слова:** программный лог; аномалия; аномальная ситуация; распознавание образов; корректность выполнения.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время компьютерные технологии стали неотъемлемой частью цифровой экономики развитых стран [1]. Важным элементом производственного процесса становится компьютерная программа. От корректности выполнения программ напрямую зависит прибыль, получаемая предприятием от применения средств автоматизации. К сожалению, не все ошибки могут быть обнаружены и исправлены на стадиях разработки и тестирования. Поэтому актуальной прикладной проблемой становится задача обнаружения ошибок, которые возникают на стадии выполнения программы. В данной работе исследуется один из возможных подходов к решению проблемы выявления ошибок и аномальных ситуаций, основанный на анализе программных логов.

## **ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ**

Прежде чем перейти к рассмотрению проблемы, введем необходимые понятия и определения.

Под термином программный лог будем понимать файл с упорядоченными в хронологическом порядке записями о событиях, происходящих в программе. Событие – факт выполнения совокупности операторов в теле функции программного кода. Запись о событии называется лог-строкой. Таким образом, программный лог рассматривается как средство протоколирования выполнения программы. В свою очередь, каждая лог-строка состоит из последовательности символов. В рамках лог-файла строки отделены друг от друга с помощью символа-разделителя.

В силу естественного многообразия событий все их невозможно отобразить в программном логе. Поэтому на стадии кодирования программы разработчики выделяют подмножество событий, которые в случае ошибки могут оказаться информативными при проведении диагностики. Каждое событие из этого множества отображается в программный лог с помощью шаблона – обобщенной строки, заложенной в исходный код программы.

Параметрами события называется набор локальных или глобальных переменных программного кода, которые должны быть зафиксированы в логе вместе с событием с помощью его шаблона. Таким образом, строка лога представляет собой факт реализации программного события с известными параметрами, полученный с помощью шаблона события.

Аномалиями будем называть редко возникающие события, параметры событий, переходы между функциями в программе и прочие объекты, которые являются подозрительными ввиду существенного отличия от большей части данных.

В заключение введем понятия цепочки строк лога и цепочки событий. Под цепочкой строк лога будем понимать последовательности строк программного лога фиксированной длины. В этом случае цепочки событий получаются из цепочек строк лога посредством замены строки лога на шаблон ее события. Предполагается, что для обнаружения аномалий достаточно провести анализ цепочек событий. Длина цепочки задается экспертом и должна быть достаточной для обнаружения взаимосвязей между событиями.

На основании введенных понятий процесс распознавания аномальных ситуаций можно разбить на последовательность отдельных подзадач:

1. Выделение шаблонов событий;
2. Анализ цепочек;
3. Выделение аномальных событий.

Для распознавания аномальных ситуаций разработаны и программно реализованы алгоритмы решения перечисленных выше подзадач.

## **АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ШАБЛОНОВ**

В силу небольшого объема статьи ограничимся рассмотрением первой и наиболее трудоемкой из перечисленных задач – выделения шаблонов лог–строк. От эффективности ее решения зависит качество решения последующих задач.

Опишем алгоритм решения данной задачи. Алгоритм основан на идее выделения групп похожих по структуре строк программного лога. Предполагается, что такие строки имеют один и тот же шаблон события.

Можно выделить два режима работы алгоритма: обучение и его использование. При этом режим обучения включает в себя следующие основные этапы:

1. Задание обучающей выборки  $L_0$ ;
2. Обучение алгоритма и построение векторных описаний строк лога;
3. Выбор критерия качества кластеризации;
4. Выбор типа и определение параметров алгоритма кластеризации;
5. Кластеризация выборки  $L_0$ ;
6. Сохранение информации о кластерах.

В свою очередь режим использования алгоритма включает этапы:

1. Преобразование входного лога  $L$ :  $VL = V(L)$ ;
2. Разбиение  $VL$  на кластеры;
3. Присвоение шаблона события строке лога  $L$ .

Наиболее сложным является этап построения векторных описаний строк лога. Рассмотрим его более подробно.

На первом этапе алгоритма лог переводится в более удобный для дальнейшей обработки формат. С помощью скользящего окна исходная строка переводится в последовательность символьных  $N$ -грамм. К каждой  $N$ -грамме применяется хеш-функция, значение которой берется по модулю  $B$ . Полученную последовательность чисел назовем представлением первого уровня. Ширина окна, его смещение и модуль  $B$  являются параметрами алгоритма.

На втором этапе строится векторное описание фиксированной размерности. Исходными данными для этого являются представления первого уровня.

Пусть  $h_1, h_2, \dots, h_{k_i}$  – представление  $i$ -й строки первого уровня. Формируется вектор  $C_i = (c_1, \dots, c_B)$ ,  $c_m = \sum_{j=1}^{k_i} 1(h_j = m)$ , и вычисляется нормировочный множитель  $N = \max_m c_m$ . Далее вычисляется вектор  $D_i = (d_1, \dots, d_B)$ ,  $d_k = \frac{c_k}{N}$ .

Полученное представление  $D$  имеет фиксированную размерность  $B$ . Поскольку  $B$  может быть велико, перед проведением кластеризации необходимо понизить размерность. Для этого используется нейронная сеть архитектуры «автокодировщик» [2]. Поскольку число строк исходного программного лога достаточно большое, все они не могут быть использованы для обучения. Для отбора строк предлагается использовать следующий подход.

Из векторных представлений  $\{D_i\}$  извлекается подвыборка  $(D_{i_1}, \dots, D_{i_M})$ . Задается число  $C$  кластеров. На выборке  $(D_{i_1}, \dots, D_{i_M})$  обучается алгоритм кластеризации MiniBatchKMeans [3] с  $C$  кластерами. Центры полученных кластеров используются для обучения нейронной сети.

Векторные описания второго уровня получаются с помощью сжатия части автокодировщика к представлениям  $\{D_i\}$ .

Таким образом, в результате применения алгоритма строятся векторные описания строк. К векторным описаниям второго уровня можно применить классические алгоритмы кластеризации, например, MiniBatchKMeans [3] Проведенные на синтетическом логе и логах LogPAI [4]. Эксперименты свидетельствуют об адекватности предложенного подхода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено общее решение задачи распознавания аномалий в программных логах. Разработаны и программно реализованы алгоритмы для решения некоторых из поставленных подзадач. Проведены эксперименты, подтверждающие пригодность алгоритмов для их практического использования для обработки данных больших объемов.

### Библиографические ссылки

1. Принятие решений в информационном обществе: учебное пособие / Х. Э. Р. М. Виссия, В. В. Краснопрошин, А. Н. Вальвачев. — Санкт-Петербург: Лань, 2019. — 228 с.
2. Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие / В. А. Головкин, В. В. Краснопрошин. — Минск : БГУ, 2017. — 263 с.
3. Web-Scale K-Means Clustering, D. Sculley. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.eecs.tufts.edu/dsculley/papers/fastkmeans.pdf>. — Дата доступа: 08.04.2020.
4. Tools and Benchmarks for Automated Log Parsing. ieming Zhu, Shilin He, Jinyang Liu, Pinjia He, Qi Xie, Zibin Zheng, Michael R. Lyu. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1811.03509.pdf>. — Дата доступа 01.04.2020.

# АНАЛИЗ КРЕДИТОСПОСОБНОСТИ НЕФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ ПАНЕЛЬНЫХ ДАННЫХ С КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРОЙ

**В. О. Осипенко**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
osipenko.vlad2014@yandex.ru  
науч. рук. – В. И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье представляются результаты анализа кредитоспособности нефинансовых организаций Республики Беларусь на основе панельных данных с кластерной структурой с использованием алгоритмов машинного обучения. Результаты исследования могут быть использованы для анализа кредитоспособности на макроуровне (уровне реального сектора экономики) и микроуровне (оценка кредитоспособности нефинансовых организаций) в режиме регулярного обновления данных.

**Ключевые слова:** кредитоспособность нефинансовых организаций, панельные данные, кластерный анализ, дискриминантный анализ, оценка риска дефолта.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основной экономической деятельностью коммерческого банка является кредитование заемщиков, что вносит значительный вклад в прибыль банка. В то же время предоставление кредитов также способствует приросту общественного капитала, что приводит к увеличению доходов других участников кредитного рынка [1]. Поэтому одной из главных задач кредитования является анализ кредитоспособности заемщиков.

Кредитоспособность – это способность заемщика в срок исполнить обязательства по кредитному договору, своевременно погасив основной долг и начисленные проценты. Для анализа кредитоспособности заемщика коммерческие банки используют внутренние методики и модели, а также экспертные оценки.

Однако, задача оценки кредитоспособности нефинансовых организаций чрезвычайно важна не только для коммерческих банков, но и для государственных регуляторов. В частности, центральные банки заинтересованы в анализе состояния экономики в целом, создании различного рода мероприятий для обеспечения финансовой стабильности и поддержки сбалансированного роста экономики.

Поэтому актуальны следующие задачи анализа кредитоспособности на микроуровне – классификация организаций по степени кредитоспособности с присвоением статистического кредитного рейтинга) и макроуровне: анализ динамики среднего уровня кредитоспособности для различных видов экономической деятельности и экономики в целом; анализ миграции кредитных рейтингов [2].

## ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

При анализе кредитоспособности нефинансовых организаций Республики Беларусь на основе панельных данных финансовой отчетности с применением статистических моделей и методов имеют место следующие проблемы: отсутствие классифицированной обучающей выборки предприятий; отсутствие информации о количестве классов кредитоспособности и отсутствие статистики по дефолтам предприятий.

В данном исследовании решаются следующие задачи:

1. Определение количества классов кредитоспособности.
2. Разбиение исходной выборки на классы кредитоспособности (оценивание кредитных рейтингов).
3. Оценивание матрицы миграции кредитных рейтингов.
4. Оценивание кредитных рейтингов для организаций, не входящих в исходную выборку, и организаций из начальной выборки в новые периоды времени.

Для решения данных задач используются алгоритмы кластерного и дискриминантного анализа. Используемая выборка представляет собой информацию о 532 организациях Республики Беларусь ( $n = 532$ ) за период 2013-2018 гг. ( $T = 24$ ), принадлежащих к 5 видам экономической деятельности: промышленность, строительство, торговля, сельское хозяйство и сфера услуг. В качестве переменных, описывающих финансовое состояние организаций, используется 12 финансовых коэффициентов ( $N = 12$ ), обозначаемых  $k_1, k_4, k_5, k_1, k_4, k_5, k_6, k_7, k_9, k_{13}, k_{14}, k_{15}, k_{18}, k_{19}$ , рассчитанных на основе квартальных отчетов [2].

В результате нормирования переменных все коэффициенты принимают значения от 0 до 1, причем большие значения для каждого коэффициента соответствуют более высокой кредитоспособности организации по соответствующему признаку. Общий подход к анализу кредитоспособности на микро- и макроуровне на основе методов статистического и машинного обучения предложен в работах [1–4]. Отличием данного исследования является использование нового временного периода и совместный анализ всех видов экономических деятельностей.

## КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ НЕФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В силу перечисленных выше проблем в описании панельных данных, на этапе классификации исходной выборки наблюдений с помощью алгоритма кластерного анализа  $L$ -средних используется представление панельных данных в виде выборки пространственных наблюдений. Для определения количества кластеров используется «метод локтя», метрика

*Davies-Bouldin Index* и индекс оценки силуэта [3], а также визуализация центров кластеров в многомерном пространстве признаков (рис. 1).

Исходя из результатов кластерного анализа в предыдущих исследованиях [3-5] было сделано предположение, о наличии четырех классов кредитоспособности. На рис. 1 (левая панель) представлены средние значения (ось ординат) 12 финансовых коэффициентов (ось абсцисс) для классов 1-4. Можно заметить, что для классов 3 и 4 с более высокой степенью кредитоспособности средние значения многих коэффициентов достаточно близки. Кроме того, усредненные по всем коэффициентам значения центров кластеров (правая панель) также указывают на то, что они незначительно различаются, что может свидетельствовать о близости соответствующих классов кредитоспособности. На этом основании классы 3 и 4 были объединены, и далее полагалось, что число классов кредитоспособности равно 3.

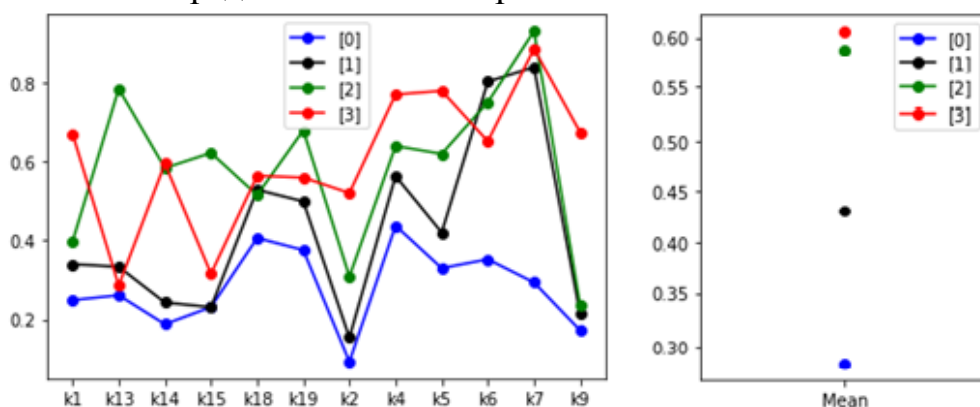


Рис. 1. Анализ разделимость классов кредитоспособности в пространстве 12 признаков

В таблице 1 представлена статистическая оценка матрицы миграции статистических кредитных рейтингов (номеров классов кредитоспособности) для трех классов, рассчитанная по результатам классификации всех организаций. Вид матрицы характерен для случайной последовательности номеров классов, образующей цепь Маркова.

Таблица 1

**Матрица миграции кредитных рейтингов**

0.87782486	0.10275424	0.0194209
0.07002854	0.88144624	0.04852521
0.02373581	0.08599931	0.89026488

## ДИСКРИМИНАНТНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИЙ

## АНАЛИЗ

## ФИНАНСОВЫХ

Для классификации новых наблюдений используются оцененные по классифицированной обучающей выборке, полученной на предыдущем шаге, ал-

горитмы дискриминантного анализа: алгоритм на основе модели логистической регрессии и алгоритм случайного леса. Для оценки эффективности работы алгоритмов используются метрики *precision* (точность) и *recall* (полнота). Лучшие результаты по указанным метрикам показал алгоритм логистической регрессии.

На рис. 2 представлены оценки важности классификационных признаков на основе алгоритма случайного леса. Как следует из графика, как и ожидается, наиболее существенными являются показатели, характеризующие качество кредиторской задолженности (коэффициенты  $k_7$ ,  $k_{14}$ ), т.е. предприятия с негативной кредитной историей имеют более высокий риск дефолта (банкротства), а предприятия, которые в срок выполняли свои обязательства перед заемщиками имеют небольшой риск дефолта.

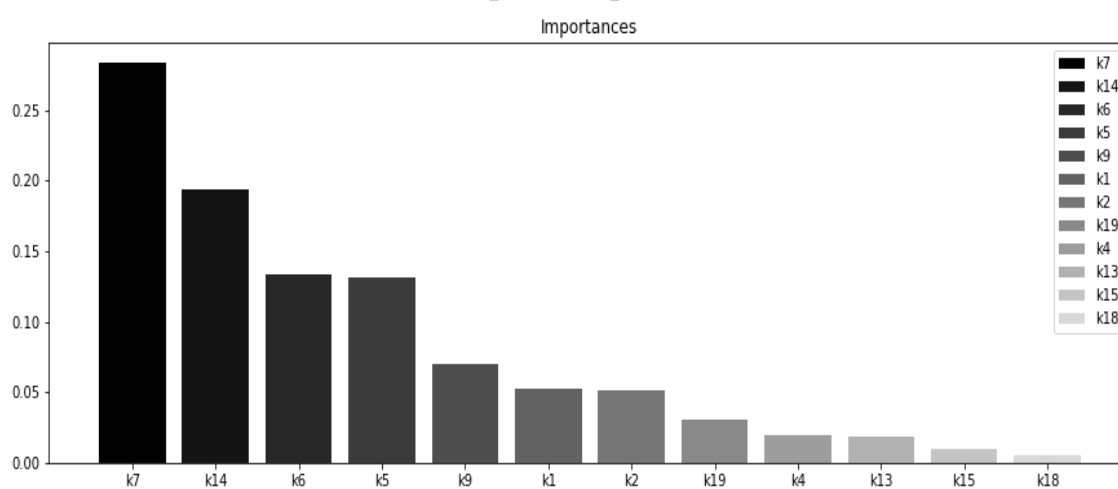


Рис. 2. Анализ важности классификационных признаков

### Библиографические ссылки

1. *Malugin, V.I.* Statistical analysis and econometric modelling of the creditworthiness of non-financial companies / V.I. Malugin, N.V. Hryn, A.Yu. Novopoltsev // *Int. J. Computational Economics and Econometrics*. – 2014. – Vol. 4(1/2). – P. 130-147.
2. *Малюгин, В.И.* Система статистических кредитных рейтингов предприятий: методика построения, верификации и применения / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, П.С. Милевский, А.И. Зубович // *Банкаўскі веснік*. – Тэматычны выпуск «Исследования банка». – 2013. – № 5. – 73 с.
3. *Малюгин В.И.* Статистический анализ кредитоспособности реального сектора белорусской экономики на основе микроданных / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев, Н.В. Гринь, П.С. Милевский // *Банкаўскі веснік*. – Тэматычны выпуск «Исследования банка». – Апрель, 2018. – 98 с.
4. *Малюгин, В.И.* Анализ финансовой стабильности реального сектора экономики на основе микроданных: макроэкономический аспект / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев // *Банковский вестник*. – №10. – 2019 – С. 20-27.



# РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ПОД ПЛАТФОРМУ ANDROID СИНХРОННОГО ПЕРЕВОДА РЕЧИ В АНИМАЦИЮ ЯЗЫКА ЖЕСТОВ

**М. С. Пестрак, В. А. Ульяницкий**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
fpm.pestrak@bsu.by, fpm.ulyanick@bsu.by;  
науч. рук. – А. С. Гусейнова, ст. преп.*

Речь - важнейший инструмент коммуникации между людьми. Но далеко не всем людям доступно это средство общения. В связи с этим, было решено реализовать приложение, осуществляющее перевод голосовых команд в язык жестов. Цель мобильного приложения для синхронного перевода – усовершенствовать средства коммуникации для людей с особенностями слуха и речи. Важной частью работы является модуль распознавания речи, так как он должен быть достаточно быстрым и точным. Было проведено изучение существующих библиотек, позволяющих распознавать голосовые команды, а также сравнение алгоритмов, которые в них используются.

В результате проведенной работы был создан тестовый прототип приложения, реализован модуль распознавания речи, усовершенствована акустическая модель.

**Ключевые слова:** распознавание речи; жестовый перевод; социальная среда; android; CMU Sphinx.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Модуль распознавания речи используется для перевода устной речи пользователя в текст, который далее передаётся в клиентское приложение. Подавляющее большинство подобных систем работают онлайн: речь передаётся на удалённый сервер, где и происходит распознавание. Такой вариант не подходит для данного приложения, поэтому был сделан обзор среди систем, имеющих возможность работы офлайн. Также, для большего удобства интеграции в приложение, выбор производился среди систем, распространяемых с open-source лицензиями.

Таким образом, были рассмотрены следующие системы: CMU Sphinx, НТК, iAtros, Julius, Kaldi и RWTH ASR. Выбор системы зависел от таких критериев, как точность и скорость распознавания, удобство использования в программном коде и внутренняя структура. По точности системы оценивались исходя из наиболее популярных метрик: коэффициент распознавания слов (WRR), коэффициент ошибок в словах (WER). Скорость работы системы оценивалась с помощью коэффициента Speed Factor (SF) — показателя отношения времени распознавания к длительности распознаваемого сигнала, иногда называемого также Real Time Factor [1].

## Сравнение систем распознавания речи

Система	WER, %	WRR, %	SF
HTK	19,8	80,2	1,4
CMU Sphinx (pocketsphinx/sphinx4)	21.4/22.7	78.6/77.3	0,5/1
Kaldi	6,5	93,5	0,6
Julius	23,1	76,9	1,3
iAtros	16,1	83,9	2,1
RWTH ASR	15,5	84,5	3,8

Исходя из вышеизложенного, система CMU Sphinx была выбрана для использования в проекте. CMU Sphinx включает в себя два декодера - `pocketsphinx`, реализованный на C, и `sphinx4`, реализованный на Java. Это позволяет использовать эту систему на многих платформах, включая те, на которых установлена операционная система Android, что значительно облегчает ее интеграцию в проекты, написанные на Java. Модульность реализации системы CMU Sphinx значительно упрощает работу с ней, позволяя легко вносить в неё изменения и исправлять ошибки.

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В процессе разработки приложения выявилась необходимость увеличения шумоустойчивости модуля распознавания речи. Рассмотрим более подробно, как реализовано распознавание речи в системе CMU Sphinx [2]. CMU Sphinx использует для извлечения частотных признаков мел-частотные кепстральные коэффициенты (*mel-frequency cepstral coefficients*), точнее их модификацию – нормированные по мощности частотные кепстральные коэффициенты (*power-normalized cepstral coefficients*), которые достаточно шумоустойчивы. Синтез речи можно разделить на две стадии: сначала акустическая волна генерируется в дыхательной системе (лёгкие, бронхи, трахея), а затем преобразуется в речевом тракте. Таким образом, процесс можно представить как последовательную генерацию основного тона и его фильтрацию. При этом основной тон является дикторозависимым, а коэффициенты фильтра зависят от параметров голосового тракта, при этом именно эти параметры определяют произносимые фонемы и, соответственно, важны для распознавания. Итоговый сигнал можно представить в виде формулы (1).

$$F(\omega) = S(\omega)H(\omega) \quad (1)$$

Для выделения характеристик фильтра, не пересекающихся с характеристиками основного фона, выполняются преобразования.

Итоговая функция – кепстр – функция обратного преобразования Фурье от логарифма спектра мощности сигнала представлена формулой (2). Для вычисления коэффициентов сигнал разбивается на отрывки-фреймы длиной 23 мс.

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln|S^2(\omega)| e^{i\omega q} d\omega \quad (2)$$

На следующем этапе – акустическом моделировании – используются скрытые марковские модели. При этом вычисленные на предыдущем шаге коэффициенты сопоставляются с фонемами языка. Скрытые марковские модели описывают двухэтапный стохастический процесс. Первый этап – последовательность фонем рассматривают как марковскую цепь. На следующем этапе для каждого фрейма рассматривается наблюдаемый результат, которым в нашем случае является последовательность коэффициентов, вычисленных для фреймов. Для вычисления наиболее вероятного значения скрытой последовательности в CMU Sphinx используется алгоритм Витерби – алгоритм динамического программирования для поиска наиболее вероятной скрытой цепи Маркова в скрытой марковской модели; этот список состояний называется путём Витерби.

На этапе языкового моделирования необходимо на основе фонем определить произнесённые слова. Задачей языковой модели является определение вероятности произнесения слов и различных словосочетаний [4].

В нашей работе было принято решение использовать грамматику речи Java ввиду того, что ценность для распознавания представляют только фразы, для которых существует представление в виде анимации, остальные всё равно будут проигнорированы, а быстроедействие, наоборот, весьма значимо.

## РАЗРАБОТАННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

В качестве платформы, которая использовалась для разработки приложения, выбор был сделан в пользу Android, так как он является одним из самых распространенных и доступных. Android является более простым для начинающих разработчиков, и позволяет использовать Java в качестве языка программирования. В связи с этим выбор технологий стал следующим: клиентское приложение реализовано на Android с использованием SQLite для создания базы данных для хранения целевого словаря, для распознавания речи была выбрана библиотека CMU Sphinx, как самая доступная для новичков, также она позволяет использовать Java в качестве языка программирования.

База данных приложения состоит из набора команд, который был составлен инструктором автошколы и анимированных изображений.

Приложение будет работать offline, так как это позволит увеличить скорость получения результата. Для работы пользователю необходимо будет загрузить целевые словари, которые будут храниться локально на его устройстве, в качестве плагинов.

Для хранения словарей необходима база данных – набор таблиц, связанных определёнными отношениями. В качестве базы данных для проекта было решено использовать реляционную базу данных SQLite [3].

Для хранения словаря, доступного пользователям, понадобится следующая таблица, которая имеет поля: ID слова или выражения – сгенерированный искусственный номер лексической единицы, непосредственно сама лексическая единица и путь к анимации, которая хранится в локальных ресурсах приложения.

В физическом смысле приложение после сборки представляет собой файл с расширением \*.apk для установки основной части приложения на устройство пользователя.

Приложение позволяет пользователю осуществлять перевод голосовых сообщений в жестовую интерпретацию, дополнительно выводится текстовый перевод. Пользователь может просматривать весь целевой словарь.

Условно можно разделить части интерфейса на следующие части:

- интерфейс главного экрана;
- интерфейс словаря.

Интерфейс главного экрана - интерфейс, предоставленный пользователю для основной работы по осуществлению перевода. Служит для настройки приложения, осуществления голосового ввода, по нажатию кнопки с изображением микрофона и просмотра жестового перевода. Такой интерфейс включает в себя меню с тремя кнопками для навигации между фрагментами окна: перевод, настройки и словарь.

#### Библиографические ссылки

1. *Беленко, М. В.*, Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым исходным кодом / *М. В. Беленко, П. В. Балакишин* // Международный научно-исследовательский журнал [Электронный ресурс]. – 2017. - Режим доступа: <https://research-journal.org/technical/sravnitelnyj-analiz-sistem-raspoznavaniya-rechi-s-otkryтым-kodom/> - Дата доступа: 02.10.2019
2. CMU Sphinx [Электронный ресурс] / Carnegie Mellon University. – 2019. – Режим доступа: <https://cmusphinx.github.io/>. – Дата доступа: 25.01.2020.
3. Android – Программирование для профессионалов / *Б. Харди* [и др.]; под общ. ред. *Б. Харди*. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2016. – 640 с.
4. *Гриф, М. Г.*, Система перевода текста с учетом синтаксической составляющей русского жестового языка / *М. Г. Гриф, Ю. С. Мануева* // CYBERLENINKA [Электронный ресурс]. – 2018. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-perevoda-teksta-s-uchetom-sintaksicheskoy-sostavlyayushey-russkogo-zhestovogo-yazyka> - Дата доступа: 28.09.2019

# ОБУЧЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

**В. В. Реентович**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*vladrrv@gmail.com;*

*науч. рук. – В. В. Краснопрошин, д-р техн. наук, проф.*

В работе рассмотрена проблема обучения глубоких нейронных сетей с подкреплением. Предложен подход, в котором для обучения агента используется не только среда, но и ее нейросетевая модель, обучаемая одновременно с агентом. Проведено экспериментальное сравнение предложенного подхода с известным методом Actor-Critic. Результаты экспериментов показали, что предложенный подход требует почти в два раза меньше обучающих данных, чем метод Actor-Critic.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, нейронные сети, глубокое обучение, обучение с подкреплением.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсивного развития информационных технологий актуальной является задача интеллектуального анализа данных, а также разработка интеллектуальных систем реального времени. Искусственные нейронные сети (ИНС) являются одним из основных инструментов для решения этих задач. При работе с ИНС наиболее трудоемкий процесс – это их обучение. Различают три вида обучения в зависимости от входной информации – с учителем, без учителя и с подкреплением. В работе рассматриваются способы обучения с подкреплением, которые применяются, когда информация подкрепляется сигналами от внешней среды. Преимущество такого обучения состоит в способности обучаемого агента адаптироваться к изменениям в среде, что позволяет применять его в интеллектуальных системах реального времени.

Существуют различные методы обучения глубоких нейросетей с подкреплением. Однако все эти методы имеют одну общую проблему, которая связана с большими объемами обучающей выборки. Для решения этой проблемы предлагается способ обучения с подкреплением на основе модели среды, которая обучается параллельно с агентом.

## ПОДХОД К ОБУЧЕНИЮ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СРЕДЫ

**Описание алгоритма.** Предлагаемый алгоритм обучения с подкреплением, основанный на модели среды, содержит две основные подзадачи:

обучение стратегии агента параллельно с обучением модели среды и планирование стратегии с помощью модели. Как стратегия, так и модель представлены соответствующими нейронными сетями.

Взаимодействие агента с детерминированной средой условно можно описать как некоторую функцию вида (1), где  $s$  – текущее состояние среды,  $a$  – выбранное агентом действие,  $s'$  – следующее состояние и  $r$  – награда за этот переход. При эпизодичном характере взаимодействия со средой в  $s'$  входит также флаг терминальности для завершения эпизода.

Задача модели среды  $\hat{f}$ , представленной нейросетью с обучаемыми параметрами  $\theta$ , состоит в предсказании награды  $\hat{r}$  и следующего состояния  $\hat{s}'$  по текущему состоянию  $s$  и выбранному действию  $a$  (2).

$$f(s, a) = (r, s') \quad (1)$$

$$\hat{f}(s, a|\theta) = (\hat{r}, \hat{s}') \quad (2)$$

В качестве цели оптимизации при обучении модели естественным образом можно взять степень различия пар  $(r, s')$  и  $(\hat{r}, \hat{s}')$ , например  $L_1(\hat{s}', s') + L_2(\hat{r}, r)$ , где  $L_i$  – некоторая функция потерь.

Для того, чтобы обучить такую модель, необходимо сначала получить выборку переходов  $(s, a, r, s')$ . Для этого был применен подход «experience replay memory» из метода DQN [1]: агент запоминает переходы при взаимодействии со средой, и нейросетевая модель итеративно обучается алгоритмом Adam на случайных выборках из памяти.

В предлагаемом подходе для обучения стратегии агента  $\pi(a|s, \omega)$  за основу был взят метод A2C (Advantage Actor-Critic) [2]. Особенность состоит в том, что обучение актора и критика происходит не только на «реальных» эпизодах (в среде), но и на «воображаемых» эпизодах (в модели среды). Одновременное обучение стратегии и модели, а также планирование стратегии с помощью модели среды позволит уменьшить объем необходимых для обучения данных.

Таким образом, можно сформулировать общую схему метода обучения с подкреплением, основанного на модели среды:

*шаг 1.* Инициализировать параметры  $\theta$  модели среды  $\hat{f}$  и параметры  $\omega$  стратегии агента  $\pi$ ;

*шаг 2.* Исполнить стратегию, получить опыт взаимодействия с реальной средой (множество переходов вида  $(s, a, r, s')$ );

*шаг 3.* Использовать накопленный в памяти опыт для обучения как модели среды, так и стратегии агента (актора и критика);

*шаг 4.* Использовать модель среды для планирования стратегии;

*шаг 5.* Повторять шаги 2-4 необходимое число раз.

**Модель среды.** На вход нейросети, отвечающей за модель среды, поступает конкатенированная пара векторов  $(s, a)$ , а на выходе нейросеть выдает конкатенированную пару  $(\hat{r}, \hat{s}')$ .

Нейросеть модели среды включает в себя два скрытых слоя по 128 нейронов в каждом. В качестве функции активации для этих слоев была выбрана ReLU. Выходные векторы  $\hat{s}'$  и  $\hat{r}$  являются проекцией последнего скрытого слоя без функции активации. Кроме того, на выходном слое присутствует еще один нейрон с сигмоидной функцией активации. Он нужен при работе с эпизодическими задачами, чтобы предсказывать терминальность состояния. Он выдает значения в диапазоне от 0 до 1, которые интерпретируются как вероятность того, что состояние терминальное.

Отметим, что переходов в терминальное состояние намного меньше, чем переходов в нетерминальное. Для решения этой проблемы был применен oversampling. Пакеты для обучения модели составлялись из двух равных частей – выборки переходов в нетерминальные состояния и такой же по размеру выборки переходов в терминальные. В результате каждый пакет будет сбалансирован по классу терминальности.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**Методика проведения.** В качестве прикладной задачи для проведения сравнительных экспериментов была выбрана известная задача «CartPole-v0», которая заключается в обучении агента «выживанию» в одноименной среде [3]. Каждый эпизод длится не более 200 шагов, за каждый шаг награда +1. Задача считается «решенной», когда получено среднее вознаграждение не меньше 195,0 за 50 эпизодов подряд.

Программная реализация проведена с использованием языка программирования Python и фреймворков PyTorch и OpenAI Gym.

**Моделирование среды.** Модель на выходе имеет три компоненты: вектор состояния, награда и терминальность. Для первых двух компонент задана функция потерь в виде среднеквадратичной ошибки, для последней, в силу бинарности этой компоненты, – в виде кросс-энтропии.

Ниже на рисунке представлены графики изменения соответствующих функций потерь в течение обучения модели за более чем 800 шагов. На всех графиках наблюдается уменьшение значения функции потерь с выходом на плато, что говорит о корректности процесса обучения.

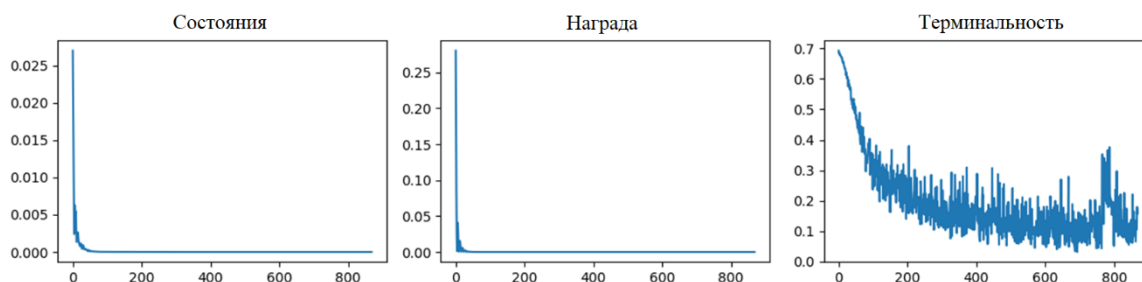


Рис. Динамика функции потерь при обучении модели среды

**Обучение агента.** Агент сначала обучался алгоритмом A2C, не используя модель, т.е. только на «реальных» эпизодах. Во втором эксперименте обучение проводилось предложенным способом по следующей схеме. Первые  $k$  эпизодов обучалась только стратегия агента (с целью накопления пакета размера  $k$  для обучения модели), далее обучались и стратегия, и модель, причем через каждые  $d$  эпизодов происходило планирование стратегии на «воображаемых» эпизодах (в модели среды), длившееся  $n$  эпизодов.

Приведем в таблице ниже сравнение результатов обучения методом Actor-Critic и разработанным подходом, основанным на модели среды, при разных наборах параметров  $k$ ,  $d$ ,  $n$ .

Таблица

Сравнение результатов обучения двумя методами

Метод обучения		Число эпизодов обучения	
		«реальных»	«воображаемых»
Метод A2C		261	–
Наш метод	$k=32, d=20, n=50$	110	200
	$k=64, d=20, n=50$	131	150
	$k=32, d=40, n=100$	122	200
	$k=64, d=40, n=100$	136	300

Исходя из полученных результатов экспериментов, можно сделать вывод, что предложенный способ требует для обучения почти в два раза меньше данных, чем метод Actor-Critic без модели среды.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, был предложен оригинальный подход к обучению с подкреплением. Его особенностью является нейросетевая модель среды, которая обучается и затем используется для планирования стратегии поведения агента. При этом процесс обучения модели происходит параллельно с обучением стратегии. С помощью экспериментов было проде-



монстрировано, что предложенный подход к обучению имеет почти двухкратное преимущество по объему обучающих данных по сравнению с известным методом Actor-Critic.

#### Библиографические ссылки

1. *Mnih V.* Playing Atari with Deep Reinforcement Learning / V. Mnih et al. [Электронный ресурс] // ArXiv preprint. – 2013. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1312.5602>. – Дата доступа: 08.11.2019.
2. *Mnih, V.* Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning / V. Mnih et al. [Электронный ресурс] // ArXiv preprint. – 2016. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1602.01783v2>. – Дата доступа: 16.11.2019.
3. OpenAI Gym. Среда «CartPole-v0» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gym.openai.com/envs/CartPole-v0>. – Дата доступа: 08.11.2019.

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕКОМЕНДАЦИЙ

**В. О. Рунец**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*runets99@gmail.com;*

*науч. рук. – В. Ю. Сакович, ст. преп.*

В современном быстро развивающемся мире, где существует большое разнообразие различных видов продуктов, товаров, услуг, ценность рекомендательных систем растет. Цель рекомендательных систем – проинформировать пользователя об объекте, который может его заинтересовать. Разработка рекомендательных сервисов не ограничивается использованием небольшого количества алгоритмов. Сейчас для разработки зачастую используются нейросети, а алгоритмы совершенствуются очень быстро. Однако до сих пор не существует универсального метода для предсказания симпатий человека.

В результате проведенной работы построен алгоритм, который работает с данными и дает удовлетворительный результат. Точность работы построенного алгоритма была проанализирована с помощью оценивающих метрик.

**Ключевые слова:** рекомендательные системы; поиск; объект; метрики; факторизация матриц.

## ПОДХОДЫ В РАЗРАБОТКЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рекомендательные системы – системы, которые подсказывают пользователю, какие сущности (фильмы, музыка, книги, новости, веб-сайты, товары) будут ему интересны, и насколько они ему понравятся. Работа рекомендательной системы заключается в выборе объектов на основе его персональных предпочтений и вкусов. Каждый пользователь получает свою персональную рекомендацию, основываясь на различных видах информации о пользователе.

Две основные стратегии создания рекомендательных систем - контентные методы и методы коллаборативной фильтрации. Часто используется объединение этих двух стратегий.

В контентно-ориентированных методах для каждого пользователя и объекта необходим профиль с информацией о них. Профиль пользователя должен содержать характеристики товаров, которые ему нравятся. Профиль объектов заполняется при добавлении объекта в базу. Характеристики могут быть различными, в зависимости от категории объекта. Контентно-ориентированные методы предполагают поиск сходства между товарами по объективным характеристикам [2].

Коллаборативная фильтрация использует информацию об активности пользователей в сети:

- посещение определенных веб-сайтов;
- отзывы об объектах;
- оценка объектов.

В этом случае учитываются субъективные свойства объектов, которые сложно получить, не имея статистики определенной активности от пользователя. Плюс данной фильтрации в том, что не имеет значения, с какими типами объектов ведётся работа, но при этом могут учитываться неявные характеристики, которые сложно было бы учесть при использовании контентно-ориентированных методов [3].

## ОЦЕНИВАЮЩИЕ МЕТРИКИ

Рассмотрим метрики, оценивающие точность предсказываемого рейтинга. В качестве статистических метрик обычно используются средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (RMSE) и корреляция. Самой популярной является метрика MAE. MAE рассчитывается по формуле (1), а RMSE рассчитываются по формуле (2).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |predicted - actual| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (predicted - actual)^2} \quad (2)$$

Чем меньше значения метрик, тем точнее метод, используемый для прогноза рекомендаций [1].

## ИНТЕРФЕЙС РАЗРАБОТАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Пользовательская часть разработана на языке Java с использованием библиотеки Swing. Интерфейс представлен оконным приложением, которое наглядно показывает отличие реальной оценки пользователя от предсказываемой алгоритмом.

Рассмотрим пошагово работу приложения:

Шаг 1 (представлен на рисунке 1). Необходимо ввести id пользователя, для которого нужно подобрать список рекомендаций.

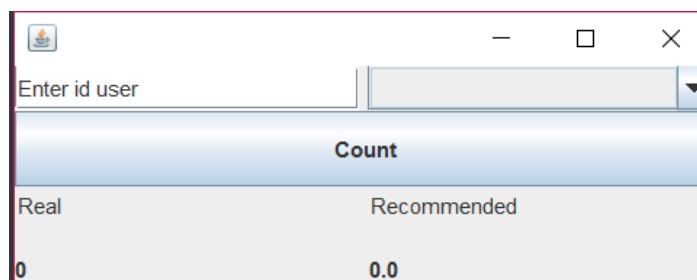


Рис. 1. Первый шаг работы приложения

Шаг 2 (представлен на рисунке 2). После ввода id в выпадающем списке отображаются фильмы, которые данный пользователь уже посмотрел и оценил. Необходимо выбрать фильм, для которого будет высчитываться предсказываемая оценка.



Рис. 2. Второй шаг работы приложения

Шаг 3 (представлен на рисунке 2.3). При нажатии на кнопку Count алгоритму подается на вход выбранный пользователь. В полученном списке рекомендаций находится выбранный фильм и его предсказываемая оценка. И как результат работы приложения, на экране отображается реальная оценка пользователя и предсказываемая.

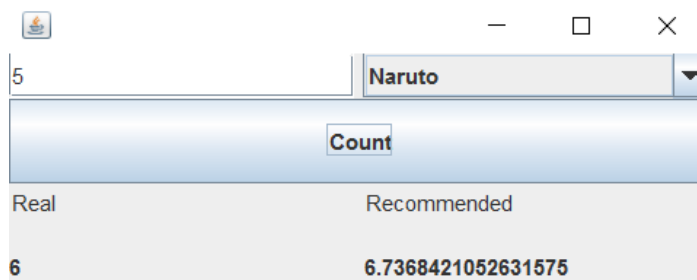


Рис. 3. Третий шаг работы приложения

## РАБОТА РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

В данном приложении оценка выставляется пользователем от 1 до 10. Для нахождения каких-либо рекомендаций используется коллаборативная фильтрация.

В разработанном приложении данные о пользователях, фильмах и просмотрах хранятся в базе данных MySQL, данные извлекаются с помощью стандарта JDBC.

Алгоритм предоставления расчета рекомендуемых оценок разработан на языке Java. На вход ему подается пользователь с информацией о его просмотрах, на выходе мы получаем список фильмов с предсказываемым рейтингом.

Имея информацию о просмотренных пользователями фильмах, составляется матрица, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Матрица оценок

	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6
User 1	5	4	5			
User 2	4		5			
User 3		3	5		4	
User 4				3	4	
User 5			4	2	4	
User 6	3					5

В данной матрице в столбце указаны пользователи, а в строке – фильмы. На пересечении  $i$ -ого пользователя с  $j$ -ым фильмом указана соответствующая оценка. Далее формируются группы, называемые кластерами, где и объединяются похожие пользователи. Такая группировка производится путем вычисления средней разности между оценками пользователей. У кого такая разность входит в диапазон от 0 до 2,5, считаются похожими пользователями.

Оценку пользователя объекту будем предсказывать как среднюю оценку кластера этому объекту по формуле (3), и пользователю рекомендуются фильмы с самыми высокими предположительными оценками.

$$\hat{r}_{ui} = \frac{1}{|F(u)|} \sum_{v \in F(u)} r_{vi} \quad (3)$$

где  $r_{ui}$  – оценка пользователя  $u$  фильму  $i$ , а  $F(u)$  – функция распределения по кластерам.

Для выборки с количеством пользователей равным 1000 и количеством фильмов равным 11876 был получен RMSE 1.22. Для сравнения: собственный алгоритм Netflix в 2006 году предсказывал оценки пользователей с качеством 0.9514 по метрике RMSE. Сейчас эта рекомендательная система является самой технологичной в мире и является комбинацией из 27 рекомендательных алгоритмов.

#### **Библиографические ссылки**

1. Карауш, А. С. Рекомендательные системы в публичных библиотеках / А. С. Карауш // Библиосфера. – 2009. – № 1. – 41 с.
2. Квятковская, И. Ю. Информационно-рекомендательная система, адаптированная к облачному рекламному сервису / И. Ю. Квятковская, П. Н. Савченко // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычисл. техника и информатика. – 2015. – № 2. – 88 с.
3. Клеменков, П. А. Построение новостного рекомендательного сервиса реального времени с использованием NoSQL СУБД / П. А. Клеменков // Информатика и ее применения. – 2013. – Т. 7, № 3. – 14 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ОБРАЗОВАНИИ

Г. Г. Трубач

*Белорусский государственный университет, Минск; gen-  
nady.trubach@gmail.com;*

*науч. рук. – А. Н. Курбацкий, д-р. техн. наук, проф.*

Анализ данных используется в настоящее время для решения многих задач из разных областей. С его помощью можно исследовать, фильтровать, преобразовывать и моделировать данные для извлечения полезной информации и принятия решений. Одной из сфер анализа данных является интеллектуальный анализ образовательных данных (Educational Data Mining, EDM) направленный на исследование образовательных данных в целях улучшения качества образования. В данной работе приводится исследование и пример использования анализа образовательных данных.

**Ключевые слова:** анализ образовательных данных, анализ успеваемости, инструменты анализа данных, источники образовательных данных, качество образования.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

### Основные сведения

Интеллектуальный анализ образовательных данных (Educational Data Mining, EDM) (ИАОД) – это направление исследований, связанное с применением методов интеллектуального анализа данных (Data mining), машинного обучения и статистики к информации, производимой образовательными учреждениями (рис. 1). Такой анализ пытается извлечь закономерности из данных, генерируемых в процессе обучения, таких как, например, посещаемость, успеваемость или данных из систем дистанционного обучения [1, с. 2].

Главной целью ИАОД является повышение качества образования и подготовки специалистов. Выделяют четыре категории пользователей, вовлеченных в него [1, с. 4]:

1. Обучающиеся, заинтересованные в осознанном формировании индивидуальной образовательной траектории; правильном выборе факультативных дисциплин и дисциплин по выбору; профессиональной ориентации и точном выборе сферы будущей профессиональной деятельности.

2. Преподаватели, заинтересованные в разделении студентов на группы и подбор для каждой группы оптимальной технологии и наиболее эффективных методов обучения; оптимизации структуры и содержания лекционного курса; прогнозировании успешности учебной деятельности.

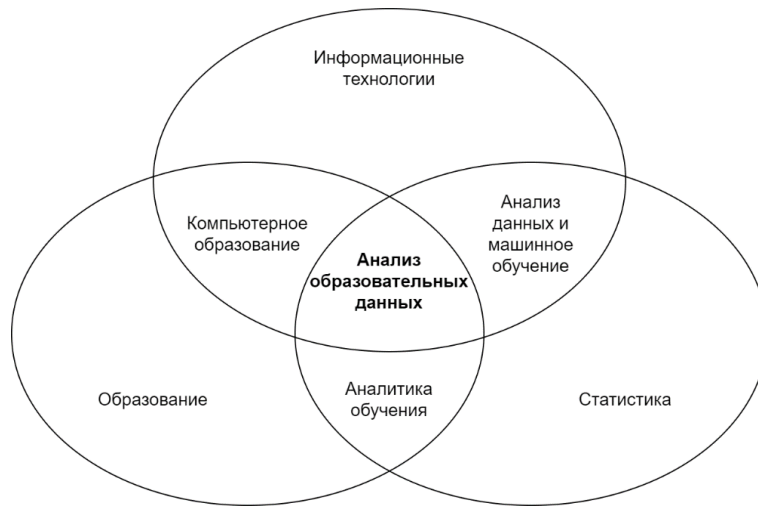


Рис. 1. Интеллектуальный анализ образовательных данных

3. Исследователи, заинтересованные в разработке методов объективной оценки эффективности и результативности учебного процесса, разработке новых технологий и методов обучения, совершенствовании существующих и разработке новых методов и алгоритмов анализа образовательных данных.

4. Администраторы, заинтересованные в принятии научно обоснованных управленческих решений.

### Этапы анализа

Множество методов интеллектуального анализа данных были включены в различные образовательные контексты. В каждом случае основной целью является преобразование данных в значимую информацию о процессе обучения и поиск закономерностей для лучшего принятия решений относительно образовательного процесса. Таким образом ИАОД включает следующие этапы [1, с. 8]:

1. Предварительная обработка данных.
2. Выявление закономерностей в данных тем или иным методом анализа данных.
3. Проверка обнаруженных закономерностей.
4. Применение найденных закономерностей для прогнозирования будущих событий в обучающей среде.
5. Использование построенных прогнозов при поддержке принятия решений и выработки образовательной политики.

### ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

Для исследования данных можно использовать данные внутренних электронных систем и систем дистанционного обучения.



В частности, можно использовать такие данные внутренних систем, как посещаемость, успеваемость, данные о распределении, данные библиотеки и другие доступные данные, позволяющие исследовать успеваемость студента и его отношение к образовательному процессу.

Также можно использовать данные систем дистанционного обучения. Например, в БГУ на данный момент активно используется система Moodle, поддерживающая ведение журналов посещаемости и успеваемости, а также хранящая другие образовательные данные.

## ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Рассмотрим пример на основе данных академической успеваемости, опубликованных на сайте Kaggle [2]. Они включают в себя такие атрибуты, как: пол; национальность; место рождения; степень образования; уровень успеваемости: L – низкий уровень (0 – 69), M – средний уровень (70 – 89), H – высокий уровень (90 – 100); тема курса; семестр: первый или второй; количество посещенных курсов; количество пропущенных дней и другие. Для исследования будем использовать язык Python.

Проанализировав эти данные, можно увидеть, что студенты во втором семестре учатся лучше, чем в первом: низких оценок (L) больше в первом семестре, высоких (H) больше во втором (рис. 2).

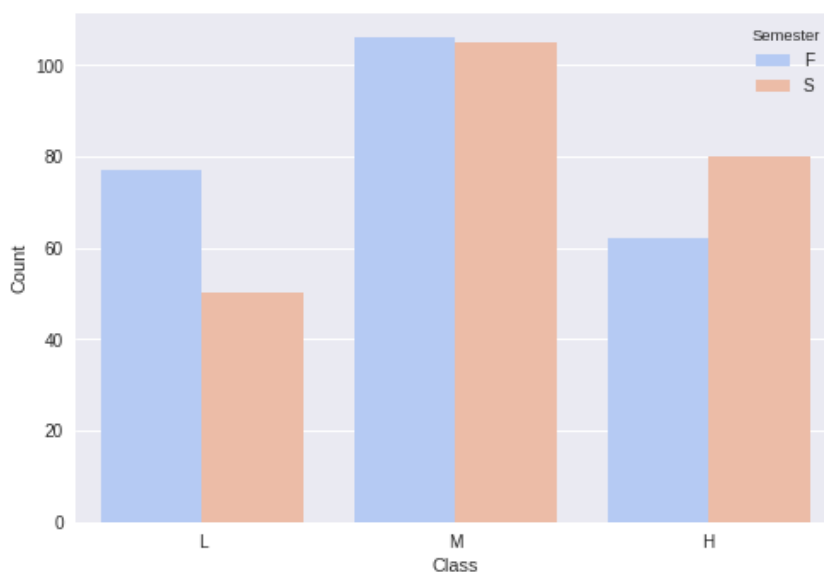


Рис. 2. Успеваемость студентов по семестрам

Данный результат говорит о том, что, возможно, нужно перераспределить нагрузку между семестрами, и в первом семестре давать более доступный материал, чем во втором.

Также можно заметить, что успеваемость студентов коррелирует с посещаемостью ими различных образовательных ресурсов (рис. 3).

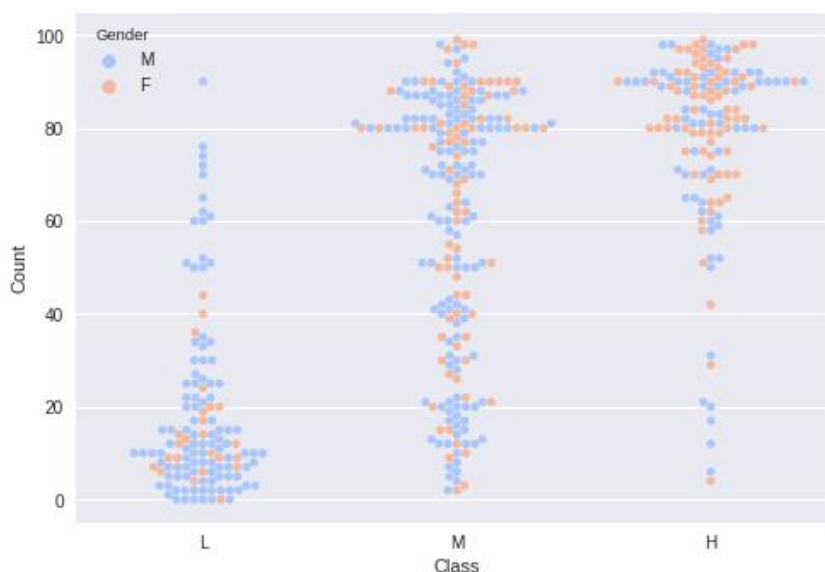


Рис. 3. Посещаемость образовательных ресурсов

Используя градиентный бустинг можно выделить ключевые параметры (рис 4), которые можно использовать для дальнейшего анализа и прогнозирования.

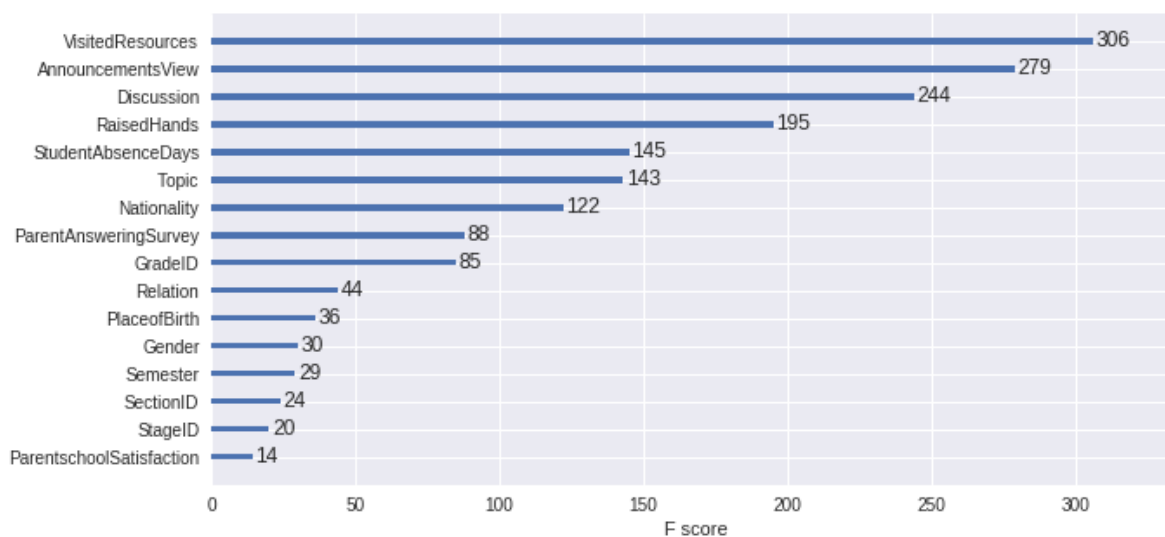


Рис. 4. Ключевые параметры

### Библиографические ссылки

1. Белоножко П. П., Карпенко А. П., Храмов Д. А. Анализ образовательных данных: направления и перспективы применения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Т. 9, №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/15TVN417.pdf> (дата обращения: 29.05.2020).
2. Aljarah I. Students' Academic Performance Dataset // Kaggle. 2016. URL: <https://www.kaggle.com/aljarah/xAPI-Edu-Data> (дата обращения: 29.05.2020).

# РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТОРГОВЫХ ФИНАНСОВЫХ СТРАТЕГИЙ

**И. В. Федченков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*ilya.fedchankau@gmail.com*

*науч. рук. – В. И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье представлен алгоритм построения сводного опережающего индикатора, включающего несколько индикаторов технического анализа на рынке криптовалют и установлены условия его эффективного применения. Построение индикатора происходит на трендовых индикаторах с опережающими свойствами и осцилляторах, являющихся также опережающими.

**Ключевые слова:** технический анализ, сводный индикатор, предиктивный индикатор, рынок криптовалют.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Технический анализ финансовых рынков зародился в 1884 году, родоначальником которого стал Чарльз Доу – один из создателей самого известного фондового индекса – индекса Доу-Джонса. Подходы технического анализа соответствуют теории эффективного рынка, которая утверждает, что вся существующая информация немедленно отражается на рыночной стоимости активов [1-3]. Целью анализа финансового рынка является получение преимущества над другими участниками, которое в дальнейшем будет связано с возможностью получения прибыли. Однако, в случае эффективного рынка, преимущество не может быть получено при использовании известных методов и индикаторов технического анализа, поскольку данные методы и индикаторы используются всеми участниками рынка. В данных ситуациях применяются подходы, позволяющие получить уникальный набор методов и индикаторов, за счет которых и планируется достижение преимущества, так как другие участники рынка не смогут их повторить или им будет чрезвычайно сложно это сделать. Одним из таких методов является формирование опережающего индикатора на основе доступной информации о рынке.

В качестве опережающего индикатора рынка криптовалют предлагается использовать сводный индекс на основе 6 специально отобранных технических индикаторов рынка, имеющих лучшие предиктивные способности для прогнозирования состояния рынка на множестве двух возможных классов состояний: подъем и спад. В качестве исходных данных

для тестирования всех индикаторов и сводного индикатора использовались биржевые курсы на криптовалюту Биткоин с различными периодами: 15 минут (M15), 1 час (H1), 1 день (D1).

## **ПРЕДИКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ И ОСНОВАННЫЕ НА НИХ ТОРГОВЫЕ СТРАТЕГИИ**

Для анализа финансовых рынков применяется 2 класса методов. Первый класс – методы анализа без учета факторов неопределенности. Сюда входят такие методы, как метод дисконтирования платежей (Discounted Cash Flow). Второй класс методов анализа – методы анализа с учетом факторов неопределенности: количественный анализ, фундаментальный анализ и технический анализ, подробно рассмотренные в [1, 3].

При владении большинством криптовалют, поток платежей отсутствует: нет дивидендов как у акций, нет купонных платежей, как у облигаций. В этом смысле криптовалюты подобны многопериодным бескупонным (или дисконтным) облигациям. Однако, у такой облигации есть известный номинал. В случае криптовалют, цена погашения, и соответственно, ожидаемые доходности в текущий момент времени не известны. Следовательно, методы анализа без учета факторов неопределенности недоступны для криптовалют.

При невозможности анализировать методами без учета факторов неопределенности, рынок просто анализировать с технической точки зрения:

- Сделки происходят круглосуточно и без выходных, в отличие от остальных финансовых рынков;
- Для доступа к торгам не нужен брокер;
- Площадки обладают мощными программными интерфейсами приложений API (Application programming interface), способными возвращать до 10 000 значений динамики цен и других данных.

Из недоступности фундаментального анализа и простоты проведения анализа с технической точки зрения открываются широкие возможности для использования технического анализа на рынке криптовалют.

Для анализа финансовых рынков применяются предиктивные модели, предсказывающие будущее состояние рынка. Одним из примеров такой предиктивной модели является кредитный скоринг в банковской сфере. Для финансовых рынков предиктивная модель содержит прогноз будущей динамики цен. Результатом такой модели может быть численное значение от -1 до 1, указывающее на вероятность роста курса при значении от 0 до 1 или указывающее на вероятность падения при значении от -1 до 0, где вероятности -1 и 1 означают то, что событие произойдет точно.

## АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВОДНЫХ ПРЕДИКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Сводный предиктивный индикатор содержит несколько технических индикаторов. Технический индикатор – функция, построенная на статистических показателях торгов (динамика цены, объемы, открытый интерес и др.) с целью предсказания будущей динамики цен [4]. Индикаторы делятся на трендовые и осцилляторы, рассмотренные подробно в [4, 5].

Идея сводного предиктивного индикатора заключается в агрегировании нескольких технических индикаторов. Данный подход обладает несколькими важными преимуществами. Во-первых, снижается доля «ложных» сигналов: для перехода сводного индекса в сигнальное положение, необходимо, чтобы в него перешло большинство индикаторов. Во-вторых, может быть выбран уникальный набор индикаторов с уникальными настройками, формируя сводный индикатор, недоступный другим участникам рынка, но при этом показывающий существенную доходность.

Для построения сводного индикатора значения индикаторов-составляющих переводятся в сигнальные значения на дискретном множестве  $[-1, 0, 1]$ , где значению  $-1$  соответствует сигнал «продавать», значению  $0$  – нейтральное положение, а значению  $1$  соответствует сигнал «покупать». Значение сводного индикатора формируется по формуле:

$$\bar{x} = \sum x_i \omega_i ,$$

где:  $\bar{x}$  – значение сводного индикатора,  $x_i$  – значение  $i$ -го индикатора,  $\omega_i$  – вес индикатора в сводном индексе.

Веса индикаторов  $\omega_i$  могут формироваться несколькими способами. Самый простой из них – задание одинаковых весов. Однако, более эффективный способ – использование методов машинного обучения.

Проблема формирования большого количества неуспешных сигналов и получения отрицательной доходности индикатором или индексом решается сменой сигнальных состояний: с  $-1$  на  $1$  и с  $1$  на  $-1$ , формируя противоположные сигналы с положительными доходностями. Таким образом, задача сводного индекса – получение ненулевых результатов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОДНЫХ ПРЕДИКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Для построения сводного индикатора было отобрано 6 популярных технических индикаторов: MACD, Relative Strength Index, Williams %R, Money Flow Index, Aroon Indicator, Commodity Channel Index. Подробно данные индикаторы описываются в [4, 5]. Веса индикаторов для включения в сводный были выбраны равнозначными, однако, их можно легко

модифицировать с назначением весов пропорциональным доходностям индикаторов или с использованием методов машинного обучения.

Исследование проводилось на основе цен на Биткоин (BTC / USD) с тремя разными периодами: 15 минут (M15), 1 час (H1), 1 день (D1). Количество периодов для анализа составило 365 для D1 и 10 000 для H1 и M15. На всех периодах были построены 6 индикаторов и посчитана суммарная доходность. Доходности индикаторов по отдельности представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Суммарные и средние доходности индикаторов на периодах D1, H1, M15

Индикатор	D1		H1		M15	
	Доходность	Средняя доходность	Доходность	Средняя доходность	Доходность	Средняя доходность
MACD	56%	2.76%	6.9%	0.010%	3.7%	0.006%
RSI	-130%	-1.81%	-1.5%	-0.001%	-4.4%	-0.006%
Williams %R	-59%	-0.47%	-14.6%	-0.003%	19.2%	0.009%
MFI	-145%	-3.72%	-7.9%	-0.002%	-33.0%	-0.023%
Aroon	35%	1.67%	9.1%	0.016%	-2.1%	-0.003%
CCI	-104%	-0.76%	-11.7%	-0.003%	1.6%	0.001%

На тех же данных был построен сводный индикатор. Параметр чувствительности указывает на то, сколько индикаторов должны одновременно перейти в сигнальное положение («покупать» или «продавать»), чтобы в него перешел сводный. Если у индикатора была отрицательная доходность, то в сводный он включался со знаком «минус», переводя убыточный индикатор в прибыльный. Результаты представлены в таблице 2. Красным выделены показатели, уступающие индикаторам по отдельности, желтым – находящиеся на уровне, зеленым – превосходящие.

Таблица 2

### Суммарные и средние доходности сводного индикатора с разной

Чувствительность	D1		H1		M15	
	Доходность	Средняя доходность	Доходность	Средняя доходность	Доходность	Средняя доходность
1	56%	0.29%	14.5%	0.002%	21.2%	0.006%
2	105%	0.83%	13.8%	0.003%	27.8%	0.028%
3	20%	0.18%	8.7%	0.003%	39.3%	0.170%
4	99%	3.81%	4.7%	0.005%	17.1%	1.137%
5	-	-	-9.6%	-0.137%	5.1%	2.569%

По данным таблиц 1 и 2 можно сделать вывод: сводный индикатор не дает преимуществ на больших периодах, обгоняет некоторые индикаторы на средних и превосходит на малых периодах, особенно по средней доходности.

Существует еще возможность оптимизации сводного индикатора. У каждого индикатора, которые включаются в сводный, есть набор параметров. Эти параметры можно подобрать таким образом, чтобы доходность была максимальной.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Шарп У. Ф., Александер Г. Дж., Бейли Дж. В.* Инвестиции: пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2001. – XII, 1028 с.
2. *Дорожкин, С.* Криптовалюты: теория и практика – Банкаўскі веснік, август 2018г.
3. *Малюгин, В.И.* Рынок ценных бумаг: количественные методы анализа. / В.И. Малюгин – Москва: Дело, 2003. – 320 с.
4. *Murphy, John J.* Technical analysis of the financial markets: a comprehensive guide to trading methods and applications – New York Institute of Finance, 1999 – 572 p.
5. *Pring, Martin J.* Technical analysis explained – McGraw-Hill, 2002 – 642 p.

# АНАЛИЗ РИСКА АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**А. В. Хлебович**

*Белорусский государственный университет, г.Минск;*

*al.khlebovich@gmail.com*

*науч. рук. – В. И. Малюгин, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Целью работы является применение и сравнительный анализ эффективности алгоритмов статистического и машинного обучения в задачах оценки риска артериальной гипертензии. В работе на основе обследования одной и той же выборки пациентов с интервалом 5 лет построена бустинговая модель бинарной классификации, которая применена для оценки эффективности методики лечения в режиме продолженного наблюдения за пациентами. Исследовано влияние динамики основных факторов риска пациента на его медицинский диагноз и результаты статистической классификации.

**Ключевые слова:** риск артериальной гипертензии, факторы риска, продолженное наблюдение, алгоритмы машинного обучения.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее и большее распространение получает превентивная медицина. Превентивная медицина – это направление в современной медицинской науке и практике, главной целью которой является сохранение здоровья человека за счет предупреждения развития различных заболеваний и патологий [1].

При оценке риска артериальной гипертензии (АГ) актуальными являются две задачи [2]: оценка риска первичной артериальной гипертензии (ПАГ) и оценка риска развития АГ в режиме продолженного наблюдения в течение определенного периода времени. Для решения этих задач в работе используются алгоритмы бинарной классификации выборки пациентов на классы, которые в соответствии с медицинским диагнозом относятся к «здоровым» и «больным». При наличии классифицированной обучающей выборки данная задача может решаться с помощью различных алгоритмов статистического и машинного обучения. В данной работе для классификации пациентов в заданном пространстве признаков (факторов риска) использованы следующие алгоритмы: логистическая регрессия (Logistic Regression), дерево решений (Decision Tree), метод опорных векторов (SVM), бустинговые алгоритмы (XGBoost, LightGBM, CatBoost) [3-5].



## ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

Данные для исследований предоставлены РНПЦ «Кардиология» Республики Беларусь и включают выборки результатов первичного и повторного обследования пациентов в режиме продолженного наблюдения через 5 лет. Начальная выборка наблюдений состоит из результатов обследования 589 пациентов. Выборка в соответствии с медицинским диагнозом разбита на два класса: класс здоровых (197 чел.) и класс больных пациентов, в который вошли пациенты с 1, 2 и 3 степенью заболевания ПАГ (392 человек). Повторная выборка наблюдений состоит из результатов обследования для 285 пациентов. При повторном обследовании класс здоровых включает 95 человек, и класс больных – 190 человек.

В качестве классификационных признаков используются такие факторы риска, как: пол (gender), возраст (age), индекс массы тела (bmi), абдоминальное ожирение или обхват талии в сантиметрах (ao), уровень физической активности (activity), курение (smoking), наличие семейного анамнеза ранних сердечно-сосудистых заболеваний со стороны родственников мужского пола (male\_hereditiy).

## ОЦЕНИВАНИЕ РИСКА ПАГ И ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ РИСКА НА ЭТАПЕ ПЕРВИЧНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

С использованием начальной выборки пациентов проведены эксперименты, целью которых являлось построение различных статистических моделей зависимости бинарной переменной, характеризующей степень риска, от факторов риска. Для оценки эффективности алгоритмов используемая выборка разбивается на обучающую выборку (train sample) объема 412 наблюдений и экзаменационную выборку (test sample), включающую 177 наблюдений.

Целью данного исследования является сравнение различных классификационных моделей и поиск той, которая обладает лучшей эффективностью по следующим характеристикам качества (метрикам): Precision (точность), Recall (полнота), ROC-AUC- мера для обучающей (train) и тестовой (test) выборки, F1-мера [3, 4].

Результаты экспериментов, представленные в сводной таблице 1, говорят о том, что алгоритм SVM с полиномиальным ядром проигрывает по всем параметрам. Для дальнейшего исследования выбираются алгоритм логистической регрессии, метод опорных векторов с радиальной базисной функцией (RBF) и бустинговые алгоритмы.

Таблица 1

## Результаты построенных моделей

	Порог отсечения	ROC-AUC (train)	ROC-AUC (test)	F1-мера	Recall	Precision
Logistic Regression	0.75	0.80	0.73	0.80	0.83	0.77
Decision Tree	0.70	0.83	0.70	0.80	0.81	0.79
SVM (полиномиальное ядро)	0.65	0.72	0.62	0.76	0.86	0.69
SVM (RBF-ядро)	0.62	0.82	0.74	0.81	0.85	0.78
XGBoost	0.46	0.82	0.71	0.81	0.86	0.78
LightGBM	0.55	0.83	0.70	0.80	0.83	0.78
CatBoost	0.50	0.83	0.72	0.80	0.84	0.77

Для оценки важности признаков, соответствующих основным факторам риска АГ, используется алгоритм CatBoost. Согласно рисунку 1, полученному с помощью данного алгоритма, самыми значимыми факторами риска являются индекс массы тела и абдоминальное ожирение, наименьшая значимость у параметра пол, но он также имеет значение.

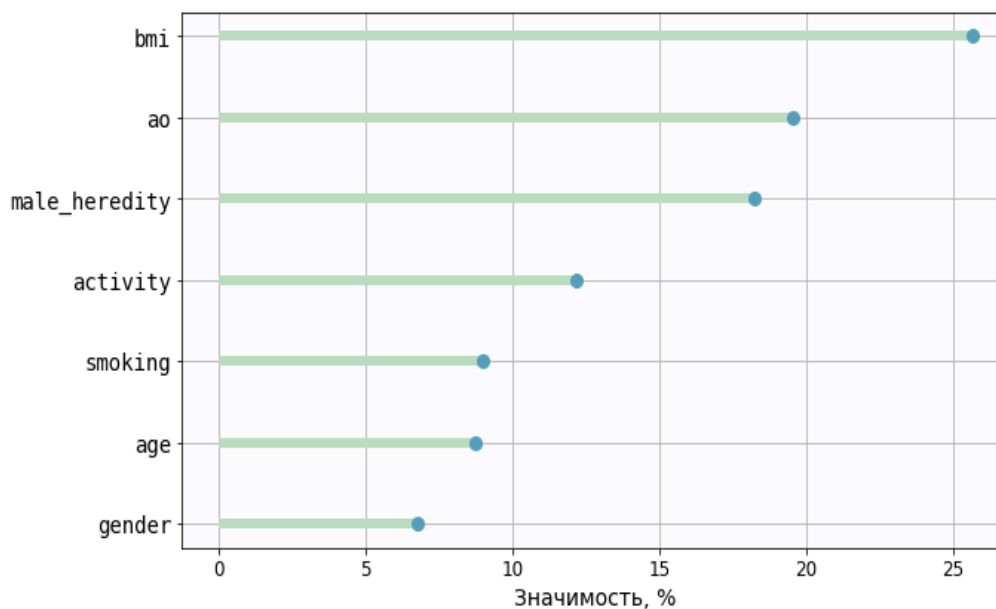


Рис. 1. Вклад признаков в предсказание риска заболевания

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ПРОДОЛЖЕННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПАЦИЕНТАМИ

Те же алгоритмы применялись для оценки состояния пациентов на повторном приёме спустя 5 лет. Тестирование проводилось на выборке из 285 пациентов. Все алгоритмы имели высокие показатели точности при классификации больных пациентов, поскольку никто из них не улучшил свое состояние. С классификацией здоровых по медицинскому диагнозу пациентов лучше всего справился бустинговый алгоритм LightGBM, его характеристики точности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Точность алгоритма LightGBM в режиме продолженного наблюдения

Порог	ROC-AUC	F1-мера	Recall	Precision
0.55	0.75	0.8	0.83	0.77

Расхождение оценок состояния пациентов при повторном обследовании, полученных на основании полного медицинского обследования и статистической классификации на основе факторов риска, объясняется тем, что практически по всем факторам риска, используемым в классификационных алгоритмах, наблюдалось ожидаемое ухудшение состояния пациентов, связанное с возрастными изменениями и не соблюдением рекомендаций по лечению. Лучше всего, как и на первоначальном обследовании, показал себя алгоритм LightGBM, который рекомендован к дальнейшему применению.

### Библиографические ссылки

1. Что такое превентивная медицина? // НБП[Electronic resource]- 2020. – Mode of access: <https://hbp-group.ru/cto-takoe-preventivnaya-medicina/> – Date of access: 11.05.2020.
2. Pavlova O.S., Malugin, V.I. Computer Analysis of Essential Hypertension Risk on the Base of Genetic and Environmental Factors / O.S. Pavlova [et al.] // Proc. of the 11th Intern. Conf. «Computer Data Analysis and Modeling», Minsk. – 2016. – P. 289-293.
3. LightGBM Documentation // LightGBM [Electronic resource]- 2020. – Mode of access: <https://lightgbm.readthedocs.io/en/latest/> – Date of access: 10.05.2020.
4. Scikit-learn. Machine learning in Python // Scikit-learn [Electronic resource]- 2020. – Mode of access: <https://scikit-learn.org/stable/> – Date of access: 10.05.2020.
5. Aurélien Géron Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, 2nd Edition/Aurélien Géron – O'Reilly Media, Inc., 2020. – 690 с.
6. XGBoost Documentation // XGBoost [Electronic resource]- 2020. – Mode of access: <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/> – Date of access: 10.05.2020.

# МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ И ЕЕ АНАЛИЗ

**Р.Е. Шарыкин**

*Белорусский государственный университет, Минск;  
sharykin@bsu.edu;  
науч. рук. – А. Н. Курбацкий, д-р. техн. наук, проф.*

Предложена математическая модель для Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем. Объектно-Ориентированные Стохастические Гибридные Системы являются композиционными объектами, общающимися с другими объектами посредством обмена сообщений через асинхронную среду, такую как сеть. Такие задачи часто встречаются на практике в различных сферах и вопросы формального моделирования и верифицирования их свойств представляются очень важными. Проведено доказательство, что данная модель обладает марковским свойством. Также были разработан язык спецификации Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем и метод их статистического анализа.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; гибридные системы; стохастические системы; марковское свойство; спецификация моделей; верификация моделей

## **ВВЕДЕНИЕ**

Стохастические гибридные системы [1] обобщают обычные гибридные системы [2], [3], [4], [5], допуская непрерывную эволюцию, управляемую стохастическими дифференциальными уравнениями (СДУ) и/или допуская мгновенные вероятностные изменения состояния системы. Это хорошо согласуется с внутренней неопределенностью сред, в которых должны функционировать многие гибридные системы, а также очень удобно в случаях, когда некоторые алгоритмы системы являются вероятностными. Существует широкий спектр сфер, включающий коммуникационные сети [6], авиационный трафик [7], [8], страхование [9], отказоустойчивое управление [10], подходящих для применения подобных систем. Биоинформатика, в которой используются символические, гибридные и вероятностные модели клеток [11], [12], [13] также является полем приложения для стохастических гибридных систем.

В то время, как уже существует надежное обоснование математических свойств стохастических гибридных моделей, таких как марковское свойство процесса, вопрос, как *специфицировать* такие системы *композиционным* путем, так, чтобы более крупные системы могли бы пониматься в терминах меньших подсистем, остается во многом открытым.

Также, вопрос о том, как *формально анализировать* такие системы способами, которые существенно расширяют аналитические возможности современных симуляционных методов, остается открытым. Так как некоторые области приложения (к примеру контроль авиационного трафика) требуют очень высокой степени надежности, спецификация и верификация являются важными проблемами, которые необходимо рассматривать.

## ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными целями исследования является построение математической модели РООСГС, доказательство марковского свойства процесса, определяемого данной моделью, разработка языка спецификации данных систем и метода статистического анализа, позволяющего получать оценки количественных аспектов системы, задаваемых с помощью языка с проработанными синтаксисом и семантикой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы представляем математическую модель [14], позволяющую формально специфицировать стохастические гибридные системы, которые являются *распределенными* и состоящими из различного вида *стохастических гибридных объектов*, взаимодействующими друг с другом посредством *асинхронной передачи сообщений*. Стиль распределенного объектно-ориентированного описания представляется естественным для спецификации многих подобных систем: к примеру, сетевые встроенные системы или системы, состоящие из воздушных судов и других, возможно автоматических, транспортных средств. Однако, мы не имеем информации о формальных моделях, на текущий момент поддерживающих такой стиль спецификации для стохастических гибридных систем. Наш вклад в этом отношении представляет собой математическую модель Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем (РООСГС), которая обладает марковским свойством и может быть отображена [14] в модель Generalized Stochastic Hybrid Systems (GSHS), представленную в [15], тем самым наследуя свойство марковости процесса порождаемого нашей моделью.

Мы разработали метод статистического анализа модели РООСГС [16]. Данный акцент объясняется тем, что при проектировании системы на практике, необходимо получать быстрые ответы о свойствах системы, которые позволили бы «доработать» ее детали на начальных этапах формулирования и разработки системы. Основу данного метода представляет

собой метод Монте-Карло, который, ввиду марковского свойства модели, мы можем реализовать без излишних затрат.

Для спецификации представленной нами модели РООСГС мы предлагаем использовать SHYMaude [16], язык спецификации систем РООСГС. Спецификация SHYMaude может быть легко транслирована в спецификацию переписывающей логики системы Maude [17], которая, в свою очередь, может быть прямо симулирована в Maude [17]. Далее, спецификация Maude может быть подвергнута анализу статистической проверки моделей с использованием системы MultiVeStA [18]. Для задания свойств мы предлагаем использовать язык темпоральных количественных выражений QuaTEh [19], который основывается на обобщении темпоральной логики и имеет проработанные синтаксис и семантику [19]. Таким образом, вероятностные темпорально-логические свойства стохастической гибридной системы могут быть проанализированы с желаемой точностью статистической значимости, основываясь на симуляциях Монте-Карло. В качестве примеров мы продемонстрировали этот тип анализа проверки моделей для двух частных случаев, а именно системы термостатов с центральным сервером, агрегирующим информацию и аукциона второй цены представленных в [16].

#### Библиографические ссылки

1. *Pola G., Bujorianu M.L.* Stochastic hybrid models: An overview // In Proceedings IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems. 2003. P. 45–50.
2. *Maler O., Manna Z., Pnueli A.* From timed to hybrid systems // Real-Time: Theory in Practice, REX Workshop. 1991. P. 447–484.
3. *Alur R., Courcoubetis C., Halbwachs N.* The Algorithmic Analysis of Hybrid Systems // Theoretical Computer Science. 1995. Vol. 138, № 1. P. 3–34.
4. *Lynch N.A., Segala R., Vaandrager F.W.* Hybrid I/O automata // Information and Computation. 2003. Vol. 185, № 1. P. 105–157.
5. *Alur R., Dang T., Esposito J.M.* Hierarchical modeling and analysis of embedded systems // Proceedings of the IEEE. 2003. Vol. 91, № 1. P. 11–28.
6. *Hespanha J.P.* Stochastic Hybrid Systems: Application to Communication Networks // Hybrid Systems: Computation and Control, 7th International Workshop. 2004. P. 387–401.
7. *Hwang I., Hwang J., Tomlin C.J.* Flight-model-based aircraft conflict detection using a residual-mean interacting multiple model algorithm // In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2003.
8. *Hwang I., Hwang J., Tomlin C.J.* HYBRIDGE. Final project report. 2005. URL: <https://hybridge.nlr.nl/documents.html> (дата обращения: 09.06.2020).
9. *Davis M.H.A., Vellekoop M.H.* Permanent Health Insurance: A Case Study in Piecewise-Deterministic Markov Modelling // Mitteilungen der Schweiz. Vereinigung der Versicherungsmathematiker. 1995. Vol. 2. P. 177–212.
10. *Ghosh M.K., Arapostathis A., Marcus S.I.* Optimal control of switching diffusions with application to flexible manufacturing systems // SIAM Journal on Control Optimization. 1993. Vol. 35. P. 1183–1204.

11. *Eker S., Knapp M., Laderoute K.* Pathway Logic: Symbolic Analysis of Biological Signaling // Proceedings of the 7th Pacific Symposium on Biocomputing. 2002. P. 400–412.
12. *Lincoln P., Tiwari A.* Symbolic Systems Biology: Hybrid Modeling and Analysis of Biological Networks // Hybrid Systems: Computation and Control, 7th International Workshop. 2004. P. 660–672.
13. *Goss P.J.E., Peccoud J.* Quantitative modeling of stochastic systems in molecular biology by using stochastic Petri nets // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1998. Vol. 95, № 12. P. 6750–6755.
14. *Шарыкин П.Е., Курбацкий А.Н.* Модель распределенных объектно-ориентированных стохастических гибридных систем // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. - 2019. - № 2. - С. 52-61.
15. *Vujoritanu M.L., Lygeros J.* Toward a general theory of stochastic hybrid systems // Lecture Notes in Control and Information Science. 2006. Vol. 337. P. 3-30.
16. *Шарыкин, П.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. - Том 9, № 2. - С. 123-133.
17. *Clavel M. [u др.]* Maude: Specification and programming in rewriting logic // Theoretical Computer Science. - 2002. - Vol. 285, Issue 2. - P. 187–243.
18. *Sebastio, S., Vandin A.* MultiVeStA: Statistical model checking for discrete event simulators // Proceedings of the 7th International Conference on Performance
19. *Sen, K., Viswanathan M., Agha G.* On statistical model checking of stochastic systems // Lecture Notes in Computer Science. - 2005. - Vol. 3576. - P. 266–280.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЛОВ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА

**Е. В. Якимович**

*Белорусский государственный университет;  
eli.yakimovich@gmail.com;  
науч. рук. – С. И. Кашкевич, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В статье рассмотрена проблема изучения слов иностранного языка. На основе изученной литературы о памяти человека, был определен процесс изучения слов. Также были предъявлены функциональные требования к системе, выявлены основные ее компоненты, продумана архитектура. Как результат, была реализована система для изучения слов иностранного языка.

**Ключевые слова:** метод ассоциаций, мобильная разработка, архитектура приложений, клиент-серверное приложение, школы иностранных языков.

### **ЯЗЫК КАК НЕОТЪЕМЛИМАЯ ЧАСТЬ ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА**

Язык – средство общения между людьми. С его помощью они передают информацию, выражают свои мысли и желания. Любой язык является частью общества. Развитие общества тесно связано с развитием языка.

Изучение иностранных языков приобретает все большую популярность в жизни людей. Это связано с развитием коммуникации между различными народами, говорящими на разных языках. Кроме этого, в некоторых ситуациях изучить иностранный язык просто жизненно необходимо – например, переезд в другую страну, повышение квалификации. Также это необходимо для расширения своего кругозора и для развития памяти.

Существуют различные уровни владения иностранным языком. Согласно общеевропейским компетенциям владения иностранным языком CEFR [1], уровни могут быть определены следующим образом:

- уровень А – элементарный;
- уровень В – самостоятельное владение;
- уровень С – свободное владение.

Постоянное пополнение словарного запаса – это один из этапов изучения иностранных слов на всех уровнях.

Один из методов усвоения информации человеком построен на ассоциациях. Его суть состоит в следующем: если человек осознал какую-то информацию до изучения, то у него строятся определенные ассоциации [2]. Вариантом реализации метода ассоциаций для изучения слов



иностранный язык является способ с использованием карточек. Каждая карточка – это слово. Карточку можно открыть и увидеть определение этого слова и примеры его использования. Осознав, что это слово означает, у ученика строятся ассоциации, в результате чего информация усваивается лучше и вероятность того, что он запомнит это слово, становится больше.

## **ПРЕДЪЯВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ**

В системе изучения слов иностранного языка можно выделить две роли:

- учитель;
- ученик;
- администратор.

Для учителя система для изучения слов иностранного языка, основанная на методе ассоциаций, должна предоставлять следующие возможности:

- добавлять новое слово, с определенными характеристиками – транскрипцией, примерами использования, частью речи, категорией;
- создавать новую категорию при необходимости;
- просмотреть список своих слов;
- искать ранее созданные слова.

Ученик, использующий систему, может делать следующее:

- изучать слова в одном из режимов:
  - изучение новых слов;
  - повтор ранее изученных слов;
  - изучать и повторять слова одновременно.
- выбирать категории слов для изучения;
- посмотреть статистику по ранее изученным словам – сколько всего категорий было затронуто в ходе обучения, сколько слов было выучено;
  - посмотреть историю обучения – в истории отображаются моменты, когда пользователь помечал слова как изученные/неизученные;
  - сбросить историю обучения – очищается вся информация, в том числе и статистика;
- операции над учетной записью:
  - зарегистрировать новую учетную запись;
  - удалить существующую учетную запись;
  - восстановить доступ к учетной записи.

Остановимся подробнее на возможностях ученика, потому что система, прежде всего, ориентирована именно на него. Изучая слово, оно

представляется ученику в виде карточки. Карточку ученик может смахнуть или влево, или вправо. При смахе вправо, он помечает слово как изученное, влево – как неизученное. Если ученик находится в режиме повторения слов и помечает слово как неизученное, то оно уже не будет в списке слов на повторение, а в списке слов для изучения.

Кроме проверки работоспособности системы, задачей администратора является создание учетных записей для учителя. Учитель сам не может зарегистрировать свой аккаунт. Такая мера предосторожности была принята для того, чтобы сохранить должный уровень достоверности информации, которая предоставляется ученикам в процессе изучения слов иностранного языка.

## **АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ**

В системе выделим три основные компоненты:

- мобильное приложение на операционную систему Android для учителя;
- мобильное приложение на операционную систему Android для ученика;
- сервер.

Архитектура мобильных приложений построена на основе популярного шаблона «модель-представление-модель представления» MVVM [3]. Благодаря ей, полученные в результате приложения для учителя и ученика являются легко масштабируемыми и тестируемыми.

В основе сервера лежит микросервисная архитектура. Суть ее состоит в следующем: она разбивает монолитное приложение на более мелкие модули, которые называются сервисами. Важным этапом в проектировании сервера был этап проектирования схемы базы данных. В качестве базы данных была выбрана реляционная PostgreSQL.

## **РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ**

Рассмотрим процесс изучения слов. На главном экране пользователь видит слово, которое представляется ему как карточка (рис. 1). Нажав на кнопку 1, ученик увидит определение слова и примеры его использования (рис. 2). Нажав на кнопку 2, ученику предлагается пройти викторину – он должен выбрать одно из четырех предложенных определений (рис. 3).

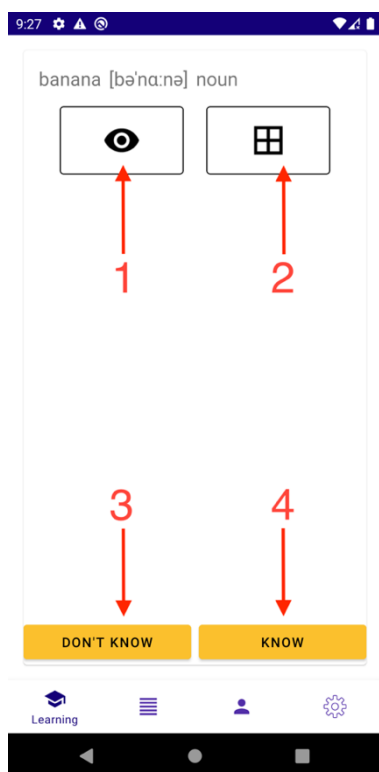


Рисунок 1 – Слово в закрытом состоянии

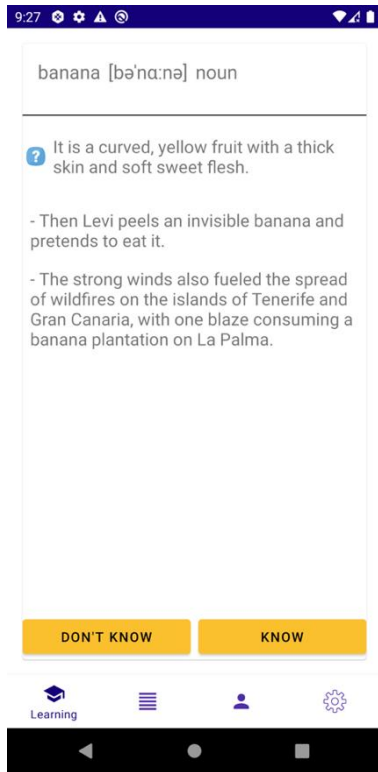


Рисунок 2 – Слово в открытом состоянии

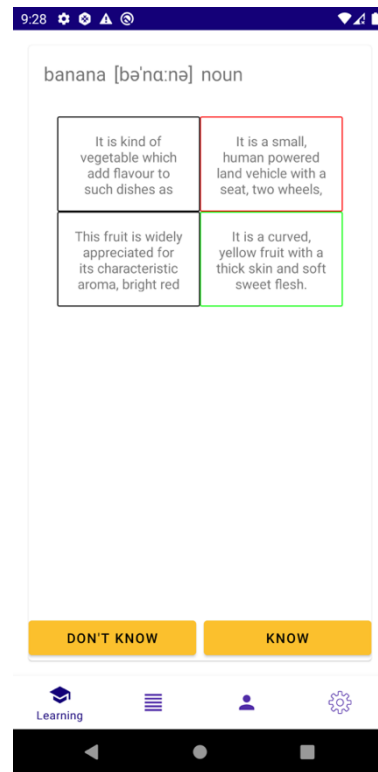


Рисунок 3 – Слово в состоянии викторины

Правильное определение будет выделено зеленым. Пользователь может смахнуть слово влево (или нажать на кнопку 3), таким образом пометив его как неизученное. Если же он смахнет его вправо или нажмет на кнопку 4, то пометит слово как изученное и оно будет в списке слов на повторение.

Карточки на главном экране представляются в виде стека. Когда пользователь помечает слово, ему отображается следующее.

Полученная в результате система предоставляет функционал, позволяющий эффективно изучать слова иностранного языка.

### Библиографические ссылки

1. CEFR [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.coe.int/web/common-european-framework-reference-languages/table-1-cefr-3.3-common-reference-levels-global-scale>
2. Гарри Лорейн, Джерри Лукас. Развитие памяти. – М.: ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2015. – 202с.
3. Архитектура android-приложений [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://developer.android.com/jetpack/docs/guide?gclid=EAIaIQobChMItC To7zF6AIVxI2yCh1mkQfCEAAAYASABEgLPufD\\_BwE&gclsrc=aw.ds](https://developer.android.com/jetpack/docs/guide?gclid=EAIaIQobChMItC To7zF6AIVxI2yCh1mkQfCEAAAYASABEgLPufD_BwE&gclsrc=aw.ds)

# ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

## ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

**К. А. Акула**

*Белорусский государственный университет, Минск*

*Kseneal@gmail.com*

*науч. рук. – А. В. Сидоренко, д-р техн. наук, проф.*

Исследуются способы машинного обучения с подкреплением. Охарактеризованы алгоритмы на основе метода временных различий для обучения мультиагентных систем. Для проведения вычислительного эксперимента для трех алгоритмов – SARSA, Q-learning и Deep-Q-learning – разработаны компьютерные программы. Проведен сравнительный анализ применения указанных алгоритмов по критерию значения вознаграждения в зависимости от числа итераций, что позволяет определить оптимальный алгоритм для обучения с подкреплением мультиагентных систем.

**Ключевые слова:** мультиагентные системы; обучение; алгоритмы; обучение с подкреплением.

### МЕТОДЫ ВРЕМЕННЫХ РАЗЛИЧИЙ

Алгоритмы, основанные на методах временных различий (Temporal difference learning), позволяют агенту осуществлять обучение после каждого временного шага (отдельного действия) и обновлять информацию о состоянии агента. Оценка вознаграждения на каждом временном шаге (действии) определяется так:

$$s_t \leftarrow s_{t-1} + \alpha [Target - s_{t-1}],$$

где *Target* – целевая ошибка,  $s_t$  – состояние в момент времени  $t$ ,  $\alpha$  – скорость обучения.

Приведенное выражение помогает достичь цели при обучении путем обновления на каждом временном шаге.

*Target* определяется следующим образом:

$$Target = E_{\pi} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \right],$$

где  $\gamma$  – дисконтирующий множитель,  $r$  – значение вознаграждения,  $\alpha$  и  $\gamma$  – параметры алгоритма для Q-обучения. Значения обоих параметров лежат в диапазоне от 0 до 1. Значение  $\gamma$  определяет влияние, которое придается вознаграждению, оно может быть равным нулю. Параметр  $\alpha$ , ко-

торый определяется при положительной скорости обучения, учитывая, что при обновлении значение потерь должно компенсироваться, не может равняться нулю.

В процессе обучения агент не знает о состоянии, вознаграждении и переходах. Он взаимодействует со средой (совершает случайные или информированные действия) и сохраняет информацию о новых параметрах (значениях пар состояния-действия), постоянно обновляя имеющиеся данные после выполнения каждого действия. Для обучения агентов мультиагентной системы при перемещениях в различных направлениях используются алгоритмы обучения с подкреплением.

Для этого используют алгоритмы управления SARSA и Q-Learning.

### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ SARSA

SARSA (State-Action-Reward-State-Action) – это алгоритм управления, основанный на методе временных различий, с использованием политики. Политика – это набор пар «состояние-действие». Политика отображает действия, которые должны быть предприняты агентом в каждом состоянии. Метод управления на основе политики выбирает действие для каждого состояния агента во время обучения. При этом целью является оценить  $Q(s, a)$  для текущей политики  $\pi$  и всех пар «состояние-действие»  $(s-a)$  [1].

Q-значение ( $Q(s, a)$ ) – это отображение между парой «состояние-действие» и действительным числом, обозначающим его полезность. Алгоритм SARSA представляет собой алгоритм, совершающий оценку оптимального Q-значения для всех пар «состояние-действие», обновляющееся согласно выражению:

$$Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)].$$

Если состояние  $S$  является терминальным (состояние цели или конечное состояние), то  $Q(S, a) = 0$ ,  $a \in A$ , где  $A$  – множество всех возможных действий.

Агент может проходить через одни и те же состояния снова и снова, экспериментируя с различными действиями, пока он не сможет определить, какие действия являются лучшими при некоторых состояниях.

### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ Q-LEARNING

Алгоритм Q-Learning, в отличие от алгоритма SARSA, представляет собой алгоритм управления, основанный на методе временных различий, без использования политики. Агент получает вознаграждение, совершая в конкретном состоянии наиболее оптимальное действие. Опираясь на

таблицу вознаграждений, он выбирает следующее действие в зависимости от того, насколько оно полезно, а затем обновляет величину, именуемую Q-значением. В результате создается новая таблица, называемая Q-таблицей. Если Q-значения оказываются больше, то мы получаем более оптимизированные вознаграждения.

Q-величины инициализируются случайными значениями, и по мере того, как агент взаимодействует со средой и получает различные вознаграждения, совершая те или иные действия, Q-значения обновляются на каждом временном шаге согласно выражению:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)]$$

Как и в случае с алгоритмом SARSA, целью является оценить значения Q, но алгоритм Q-Learning определяет действие  $a'$ , взяв за него действие  $a$  для которого Q-значения равно  $\max_a Q$  [1].

## АЛГОРИТМ DEEP Q-LEARNING

Алгоритм DEEP Q-LEARNING основан на использовании нейронных сетей при обучении с подкреплением мультиагентных систем. Нейронная сеть используется для аппроксимации функции значения или функции политики. То есть нейронные сети могут научиться отображать состояния в значения или пары «состояние-действие» в значения Q. Вместо того чтобы использовать таблицу поиска для хранения, индексирования и обновления всех возможных состояний и их значений, что невозможно при очень больших объемах данных, мы можем обучить нейронную сеть на выборках из состояния или пространства действий, чтобы научиться прогнозировать, насколько они ценны по отношению к обучению с подкреплением.

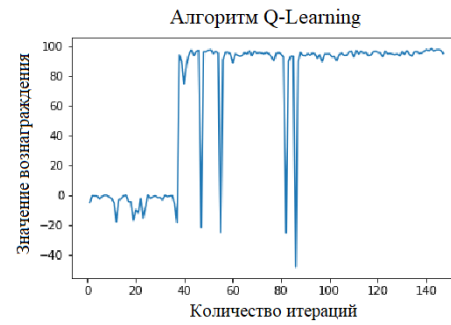
Как и все нейронные сети, они используют коэффициенты для аппроксимации функции, связывающей входы с выходами, и их обучение заключается в поиске правильных коэффициентов или весов путем итеративной корректировки этих весов вдоль градиентов, которые обещают меньшую ошибку [2].

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

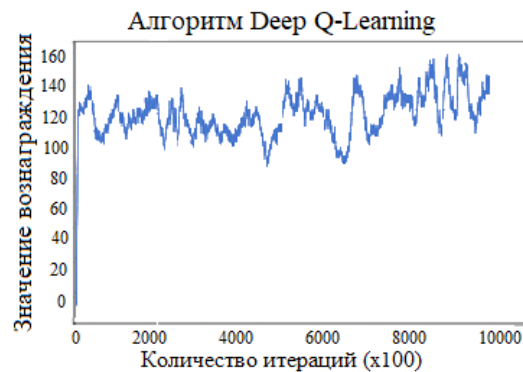
Разработанные нами компьютерные программы позволили нам провести вычислительный эксперимент по обучению с подкреплением мультиагентных систем. На рисунке приведены результаты вычислительного эксперимента, проведенного нами при обучении агента с применением алгоритмов SARSA, Q-Learning и Deep Q-Learning с использованием в качестве критерия обучения значения вознаграждения при разном числе итераций.



а)



б)



в)

Рис. 1. График зависимости значение вознаграждения от количества итераций при реализации различных алгоритмов: а) SARSA, б) Q-Learning, в) Deep Q-Learning

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены основные алгоритмы, основанные на методе временных различий, для обучения мультиагентной системы и программно реализованы алгоритмы обучения с подкреплением, а также проведен вычислительный эксперимент по обучению с подкреплением мультиагентной системы.

Анализ результатов вычислительного эксперимента по обучению с подкреплением мультиагентной системы показал, что по критерию вознаграждения наиболее эффективным является алгоритм Deep Q-Learning, обладающий наибольшей производительностью.

### Библиографические ссылки

1. *Jens Kober, J. Andrew Bagnell, Jan Peters Reinforcement Learning in Robotics a Survey// The International Journal of Robotics Research. 2013. V 32. № 11. P. 1238-1274. DOI: 10.1177/0278364913495721.*
2. *Thanh Thi Nguyen, Ngoc Duy Nguyen, Saeid Nahavandi Deep Reinforcement Learning for Multi-Agent Systems: A Review of Challenges, Solutions and Applications//IEEE Transactions on Cybernetics. 2020. VI. P. 1 – 14. DOI:10.1109/TCYB.2020.2977374.*

# РАСЧЁТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ИОНИЗИРОВАННОЙ ПРИМЕСИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ РИДЛИ

Д. А. Астратович

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*dmitrij.astratovich@yandex.by;*

*науч. рук. – В. М. Борздов, д-р физ.-мат. наук, проф.; Ю. Г. Василевский,  
ст. преп.*

В настоящей работе рассмотрены основные подходы к описанию процесса рассеяния электронов на ионизированной примеси при численном моделировании электрофизических свойств полупроводниковых структур. Проведён расчёт интенсивности рассеяния электронов на ионизированной примеси в рамках модели Брукса-Херринга и модели Ридли. Показано, что в области энергий электронов менее 0,1 эВ значения интенсивности рассеяния электронов, полученные в рамках модели Ридли, близки к уровню интенсивности рассеяния электронов в рамках модели Конуэлл-Вайскопфа, а при энергиях 0,1-1 эВ – близки к значениям, рассчитанным в рамках модели Брукса-Херринга. Таким образом, модель Ридли позволяет согласовать модели Конуэлл-Вайскопфа и Брукса-Херринга в данном диапазоне энергий электронов.

Ключевые слова: метод Монте-Карло; интенсивность рассеяния; модель Брукса-Херринга; модель Конуэлл-Вайскопфа; модель Ридли.

## ВВЕДЕНИЕ

При моделировании кинетических процессов в полупроводниках рассеяние электронов на ионизированных атомах примеси существенно влияет на кинетические свойства сильнолегированных полупроводниковых областей. Полное поперечное сечение рассеяния электрона на кулоновском потенциале иона:

$$\sigma = \pi b^2 = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma_d(\theta') \sin \theta' d\theta', \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол рассеяния,  $b$  – прицельный параметр,  $\sigma_d(\theta)$  – дифференциальное сечение рассеяния.

Из-за расходимости величины  $\sigma_d(\theta)$  при  $\theta \rightarrow 0$  интеграл в выражении (1) расходится.

При численном кинетическом моделировании рассеяния на ионизированной примеси по методу Монте-Карло используются три основные модели примесного рассеяния электронов, позволяющие в той или иной мере снять расходимость интеграла в формуле (1): модель Конуэлл-



Вайскопфа (CW), модель Брукса-Херринга (ВН), модель исключения третьего тела (модель Ридли).

Приближение Конуэлл-Вайскопфа состоит в ограничении сверху допустимых значений прицельного параметра  $b$  половиной среднего расстояния между примесными центрами:

$$b_{\max} = \frac{1}{2} n^{-\frac{1}{3}}$$

где  $n$  – концентрация ионизированной примеси.

Подход Брукса-Херринга учитывает экранирование кулоновского потенциала двухчастичного взаимодействия. В этой модели кулоновский потенциал заменяется потенциалом Юкавы  $V(r)$ :

$$V(r) = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \exp(-r\beta_s),$$

где  $\beta_s = \left( \frac{Ze^2 n}{\epsilon_0 \epsilon k_B T} \right)^{\frac{1}{2}}$ .

Для модели Ридли выражение для расчёта вероятности рассеяния в единицу времени:

$$W_R(E) = \frac{\nu(E) \left[ 1 - \exp\left( -\frac{2b_m W_{BH}(E)}{\nu(E)} \right) \right]}{2b_m},$$

где  $W_{BH}(E)$  – интенсивность рассеяния, рассчитанная по модели ВН,

$\nu(E) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \sqrt{\frac{2E}{m^*}}$  – скорость движения электронов.

$$W_{BH}(E) = \left( \frac{\sqrt{2} n e^4}{4\epsilon_0 \epsilon^2 \sqrt{m^*}} \right) E^{-\frac{3}{2}} \left[ \frac{1 + 2\alpha E}{(1 + \alpha E)^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot \left\{ \frac{\left[ 1 + 2c_k^2 \left( \frac{\beta}{2k} \right)^2 \right]^2}{4 \left( \frac{\beta}{2k} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{\beta}{2k} \right)^2 \right]} + c_k^2 \left[ 1 + 2c_k^2 \left( \frac{\beta}{2k} \right)^2 \right] \ln \left[ \frac{\left( \frac{\beta}{2k} \right)^2}{1 + \left( \frac{\beta}{2k} \right)^2} \right] + c_k^4 \right\},$$

где  $c_k = \left( \frac{\alpha E}{1 + 2\alpha E} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\beta^2 = \frac{4\pi n e^2}{\epsilon k_B T}$ ,  $k = \sqrt{\frac{2m^* E}{\hbar^2}}$ ,  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $\alpha$  – угловой коэффициент рассеяния.

## РАСЧЁТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В РАМКАХ МОДЕЛЕЙ ВН И РИДЛИ

Были проведены расчёты интенсивности рассеяния электронов в арсениде галлия, для которого  $\epsilon = 12,9$ ,  $m^* = 0,067$ ,  $\alpha = 0,576 \text{ эВ}^{-1}$ . Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 1-4.

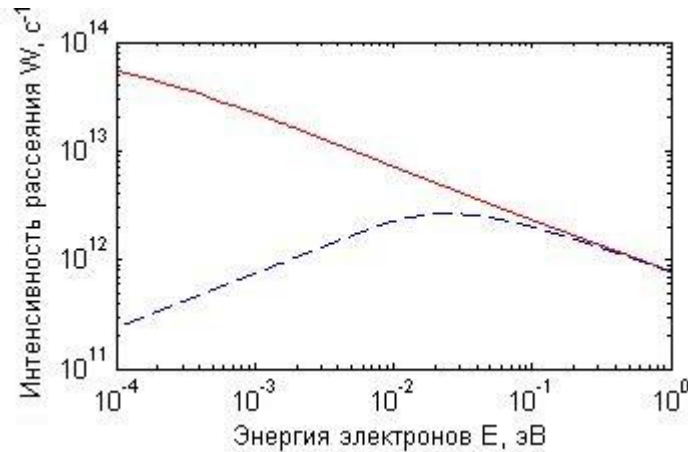


Рис. 1. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии электрона в арсениде галлия при значениях  $T = 77 \text{ К}$ ,  $n = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ : (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

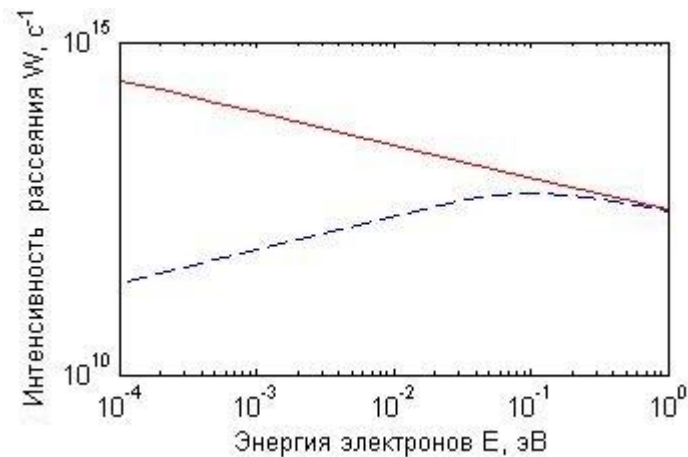


Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии электрона в арсениде галлия при значениях  $T = 300 \text{ К}$ ,  $n = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ : (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

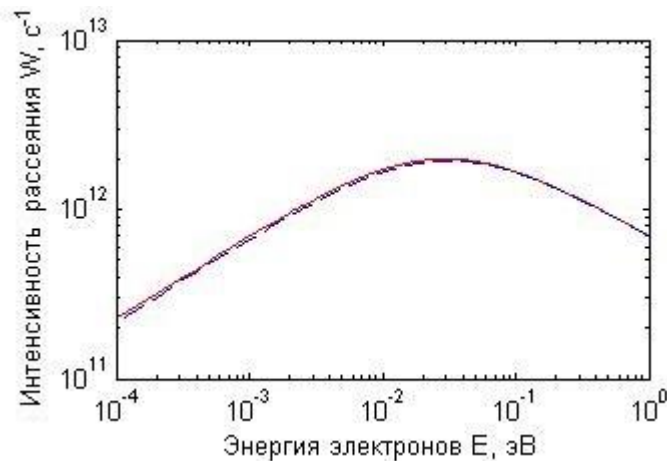


Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии заряда в арсениде галлия при значениях  $T = 77$  К,  $n = 1 \cdot 10^{24}$  м<sup>-3</sup>: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

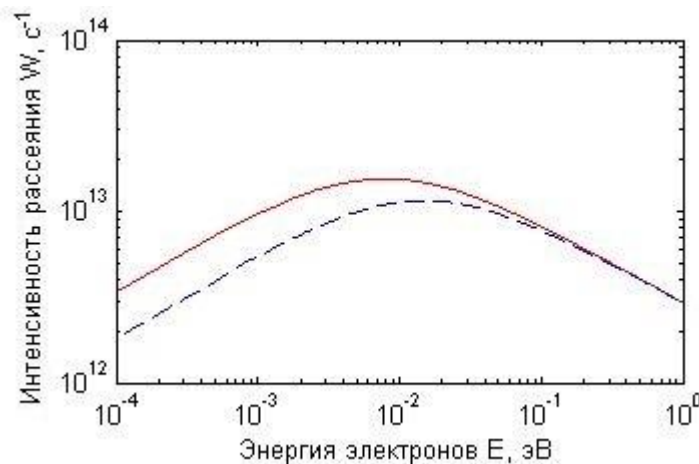


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии заряда в арсениде галлия при значениях  $T = 300$  К,  $n = 1 \cdot 10^{24}$  м<sup>-3</sup>: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

Оси координат в представленных графиках имеют логарифмический масштаб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен расчёт интенсивности рассеяния электронов в арсениде галлия при различных наборах значений температур и концентраций ионизированной примеси в рамках моделей ВН и Ридли.

Показано, что при значениях энергии электронов порядка 0,1-1 эВ модели ВН и Ридли дают близкие результаты моделирования, а при меньших энергиях модель Ридли дает меньшие величины интенсивности рассеяния, близкие к значениям интенсивности в модели СВ [2].

Таким образом, показано, что модель Ридли позволяет согласовать модели ВН и СВ.

#### **Библиографические ссылки**

1. Сперанский Д.С., Борздов В.М., Поздняков Д.В. Моделирование рассеяния электронов на ионизированной примеси в полупроводниках и полупроводниковых структурах методом Монте-Карло // Доклады БГУИР. 2010. № 2(56). С. 33–39.
2. Иващенко В.М., Митин В.В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло // «Наукова думка», Киев. 1990. С. 102–107.
3. Ruch J.G, Fawcett W. Temperature Dependence of the transport Properties of Gallium Arsenide Determined by a Monte Carlo Method. Journal of applied physics // Journal of Applied Physics. 1970. Vol. 41, № 9. P. 3843–3849.

# РАСПОЗНАВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПОСРЕДСТВОМ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

**В. С. Баранова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*dolphin7@gmail.com;*

*науч. рук. – В. А. Саечников, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В этой статье, исходя из актуальности проблемы насыщения околоземных орбит нефункциональными объектами (космическим мусором), речь идет о возможности создания системы поиска и распознавания с дальнейшей утилизацией неконтролируемых искусственных космических объектов. В качестве демонстрационного примера для детектирования обозначающих функций использовался простой шаблон, как предполагаемый набор ориентиров в процессе визуальной навигации. Представлены результаты определения точечных функций на данном шаблоне с помощью Computer Vision Toolbox программы MATLAB.

**Ключевые слова:** космический мусор, распознавание, визуальная информация, ориентиры, точечные функции, детектирование, визуальная навигация.

В качестве первого шага к применению методов визуальной навигации в проблеме решения засорения космоса можно избрать создание демонстрационных моделей спутника-преследователя с шаблонной целью для соответствующих исследований точности и поведения системы видения в космических условиях. Именно это направление рассматривалось в данной работе. На предложенный шаблон магнитной стыковочной платы с расположенными на ней оптическими ориентирами (рис. 1(a)) налагались искажения в виде вращения и масштабируемости и исходя из этого исследовался функционал и особенности визуальной обработки в MATLAB (Computer Vision Toolbox).

Если условиться, что на целевом объекте закреплена магнитная стыковочная плата, на которой в определенной конфигурации расположены маркеры любого удобного типа, например, яркие диоды или инфракрасные оптические маркеры, то, основываясь на этом, можно строить алгоритм визуальной обработки.

Предположим, что для стыковки «преследователь-цель» нам нужно рассчитать расстояние до объекта и его ориентацию. Тогда сложности в расположении ориентиров нам ни к чему. Исходя из этого, смоделируем предположительно выгодный вариант относительной конфигурации, например, диодов в качестве маркеров. На рис. 1(a) проиллюстрирована схема магнитной стыковочной платы, удобной для извлечения требуемой информации о целевом объекте.

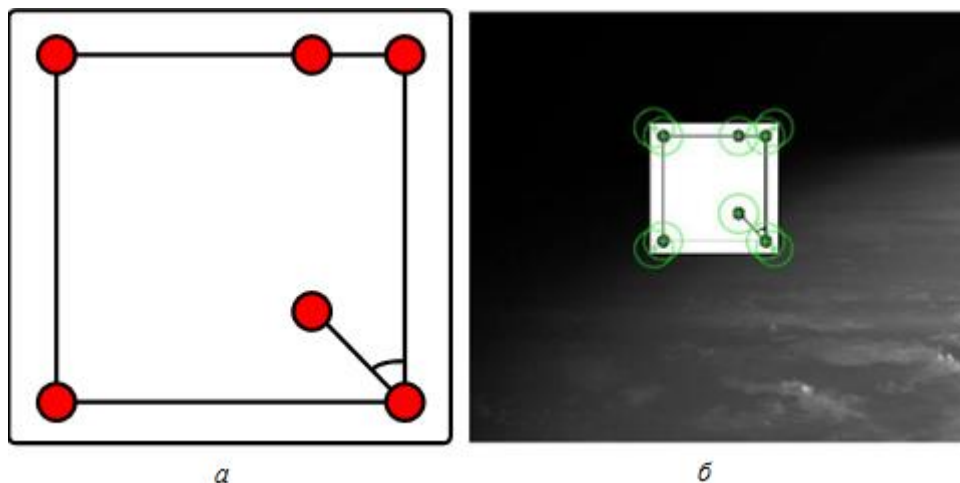


Рис. 1. Конфигурация расположения ориентиров на стыковочной плате (а), детектирование локальных функций (особенные пиксели с прилегающей окрестностью отмечены зелеными окружностями) (б)

Если говорить об заведомо неизвестных особенностях, которые просто контрастируют на общем фоне, то здесь можно воспользоваться детекторами точечных функций. В качестве примера на рис. 1(а) с помощью метода SURF обнаружены характерные особенности нашего шаблона.

Оценивая качество детектирования, можно убедиться, в каких случаях такой метод будет полезен. Именно такие методы, как SURF функции, имеет смысл применять в задачах поиска препятствий без сегментации, т.е. детектирования наличия объекта, в случае, когда точная информация для классификаторов заведомо неизвестна. Этот метод незатейлив, и его можно использовать для так называемого сбора данных с последующей подгонкой этих данных под какую-либо математическую модель, что и происходит на этапе классификации. Но в силу того, что все точечные функции имеют одинаковые параметры, при наличии большой плотности объектов велика вероятность ошибок на этапе поиска соответствий между отснятым кадром и имеющимися моделями.

Важно отметить, что, вне зависимости от масштаба и многочисленных искажений, сильно контрастирующие особенности объектов детектируются, пусть и с некоторыми выбросами. При этом возможен поиск соответствий, что как пример проиллюстрировано на рис. 2.

Хотя в случае нашей схемы маркеров на рис. 1 можно воспользоваться адаптированными локальными функциями, а именно детектированием функций в виде окружностей или пятен. В Computer Vision Toolbox есть соответствующие алгоритмы создания и поиска объектов в виде окружностей, но для этого приходится работать с логическими изображениями. Результат применения команд детектирования пятен представлен на рис. 3.

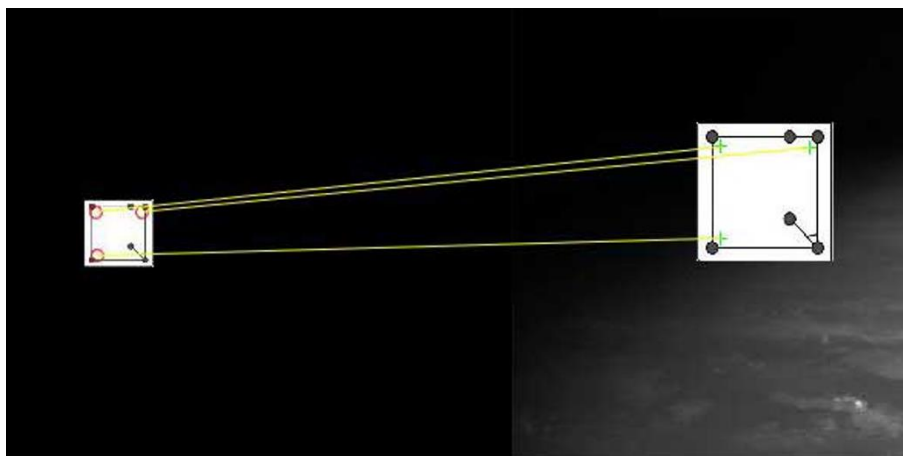


Рис. 2. Совпадающие локальные функции при масштабировании

Использование точечных функций и их соответствий позволяет без трудоемкого процесса сегментации извлечь необходимую информацию об ориентации объекта и расстоянии от него до системы видения. Кроме этого, при достаточно четких математических моделях обученного классификатора и при определенной параметризации точечные функции могут послужить хорошим решением в динамическом процессе распознавания, когда актуальность полученных данных пропадает по мере движения системы.

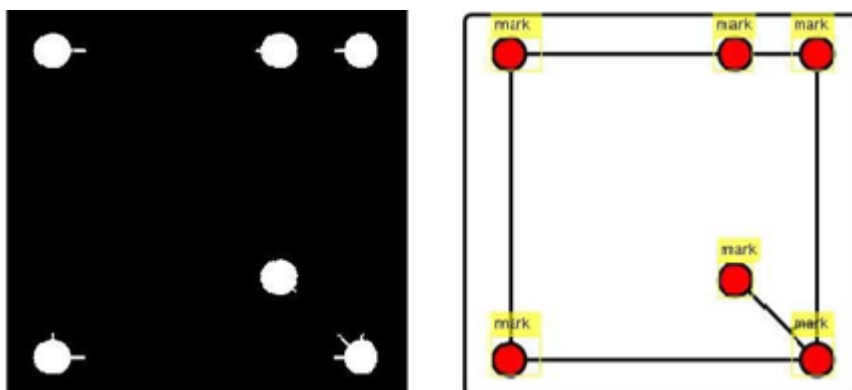


Рис. 3. Детектирование локальных функций в виде пятен с использованием бинарного изображения

В случае, показанном на рис. 4, за счет поиска соответствующих точек между шаблоном и искаженной моделью можно определить коэффициент масштабирования и угол поворота – они равны 0,7 и  $30^\circ$  соответственно.

Важно отметить, что точность отображения визуальной информации зависит от качества калибровки оптической системы и учёта внутренних параметров камеры и, не менее того, от степени искажения объектива. Поэтому, если просчитать возможные особенности среды и провести анализ возможных объектов, с которыми может столкнуться система ви-

дения, и обучить классификаторы соответствующим образом, то визуальная навигация как инструмент движения в космическом пространстве весьма реальна.

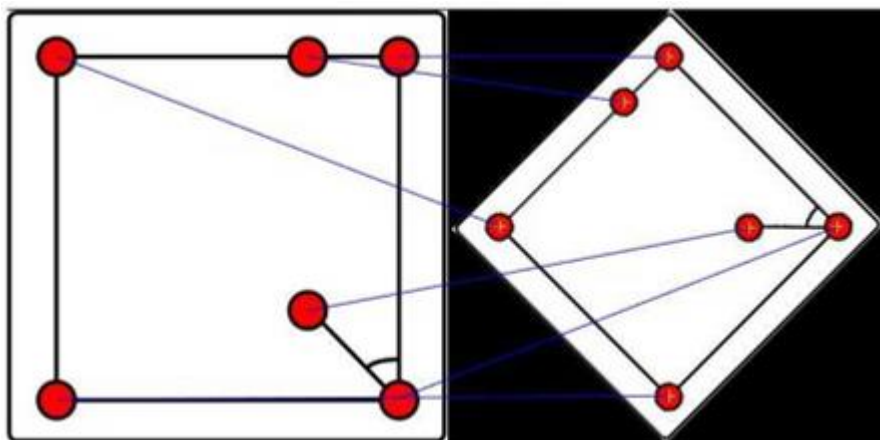


Рис. 4. Соответствие локальных точек при масштабировании и вращении

В заключение можно сказать, что при наличии обозначающих ориентиров на целевых объектах в космическом пространстве задача распознавания и взятия их под контроль всецело упрощается. На первом этапе проработки алгоритмов извлечения и отображения визуальной информации для навигации в космосе можно использовать шаблонную цель, которая при удачных испытаниях может использоваться как средство калибровки и помочь дальнейшей работе системы видения с еще не опознанной, но уже детектированной целью

#### Библиографические ссылки

1. Computer Vision Toolbox. [Electronic resource]. URL: [https://www.mathworks.com/help/vision/index.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://www.mathworks.com/help/vision/index.html?s_tid=CRUX_lftnav). (date of access: 05.05.2020).
2. Manuel Loaiza; Alberto Raposo, and Marcelo Gattass. A Novel Optical Tracking Algorithm for Point-Based Projective Invariant Marker Patterns. [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220844651\\_A\\_Novel\\_Optical\\_Tracking\\_Algorithm\\_for\\_Point-Based\\_Projective\\_Invariant\\_Marker\\_Patterns](https://www.researchgate.net/publication/220844651_A_Novel_Optical_Tracking_Algorithm_for_Point-Based_Projective_Invariant_Marker_Patterns) (date of access: 22.04.2020).



# КЛАССИФИКАЦИЯ МОЛЕКУЛ РНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ВЕКТОРИЗАЦИИ

**М. И. Бутько**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*budzko\_marie@mail.ru;*

*науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В работе программно реализованы алгоритмы векторизации и классификации РНК последовательностей, работоспособность которых демонстрируется на примере смоделированных данных. Разработаны: i) имитационная модель генерации данных; ii) модели векторизации последовательностей РНК на основе частот моно-, би- и триграммов нуклеотидов, параметров модели частот и позиций сочетаний нуклеотидов, длин последовательностей, корреляционных факторов нуклеотидов; iii) шесть методов классификации. Результаты работы могут использоваться для исследования экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** нуклеотидная последовательность; векторизация; классификация; кодирующие и некодирующие РНК

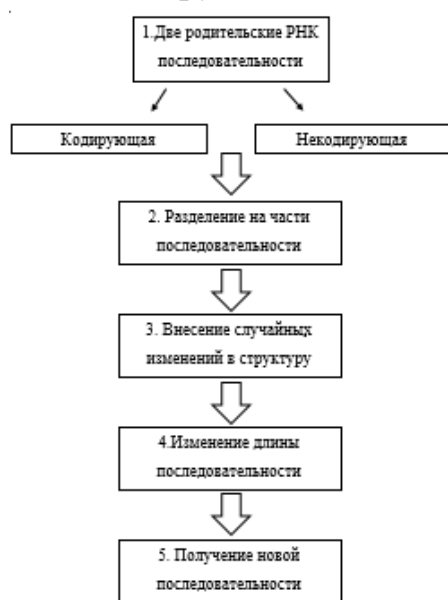
## **ВВЕДЕНИЕ**

У «высших» организмов в цепях молекул ДНК и РНК идет чередование интронных и экзонных отрезков [1]. При производстве молекул белков используются лишь интронные отрезки кодирующих молекул РНК. Если идентифицировать кодирующие и некодирующие РНК, то можно значительно сократить размер данных для исследования. Поэтому одна из важных задач биоинформатики – определение кодирующих и некодирующих молекул РНК. Для точной классификации молекул требуется выделить признаки последовательности с использованием алгоритмов векторизации. К основным недостаткам существующих моделей можно отнести: невысокую точность классификации на основе полученных признаков (около 90 %), что существенно меньше, чем при прямом применении нейронных сетей (99 %); ориентированность на обработку определенного типа последовательностей; ограниченно учитывают порядок следования нуклеотидов. Проанализировав наилучшие из существующих модели векторизации, можно разработать улучшенную модель векторизации, устраняющую вышеизложенные недостатки. Цель работы – разработать и исследовать алгоритмы определения кодирующих и некодирующих молекул РНК с использованием моделей векторизации нуклеотидных последовательностей и алгоритмов классификации.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ

Блок-схема алгоритма имитационного моделирования кодирующих и некодирующих молекул РНК представлена на рисунке. За основу взяты две родительские РНК последовательности (блок 1). Длина последовательности  $l$  генерируется на основе нормального распределения с математическим ожиданием  $\mu$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ .

Моделируемая последовательность разбивается на  $m$  отрезков длиной



в 1 % от заданной длины (длина минимальной интронной последовательности равна 20, берем приблизительно в два раза больше) (блок 2).

В блоке 3 вносятся модификации в последовательности. Выбирается количество изменяемых частей  $p$  (нормальное распределение). Моделируется число отрезков. Генерируется количество изменений на данных частях последовательности  $k$  (нормальное распределение). Производится случайная замена (мутация) нуклеотидов:  $k$  нуклеотидов на каждом из  $p$  отрезков.

Рис. 1. Блок-схема процесса моделирования данных

Вносятся изменения в длины результирующих последовательностей (блок 4). Последовательность урезается либо дополняется. В итоге получаем новые последовательности (блок 5).

Произведено моделирование 300 кодирующих и 300 некодирующих РНК последовательностей с перекрытием до 15 % и до 40 %.

## ВЕКТОРИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ РНК

С помощью процедуры векторизации символьная строка молекулы РНК преобразуется в вектор признаков, что позволяет применять алгоритмы классификации.

Разработаны 3 опорные модели векторизации [2, 3]. Признаки, реализованные в моделях: частоты би- и триграммов нуклеотидов (модель 3); параметры модели частот и позиций сочетаний нуклеотидов (модель 2); длина последовательности (модель 1); корреляционные факторы нуклеотидов (модель 1). Из модели 2 путем нормирования на длину последовательности получена еще одна модель векторизации. Для визуализации данных применен метод главных компонент (МГК). Точность методов классификации оценивается как отношение количества правильно клас-

сифицированных последовательностей РНК к общему количеству объектов из тестовой выборки.

## КЛАССИФИКАЦИЯ

В качестве методов классификации выбраны наиболее популярные в литературе методы:  $k$ -ближайших соседей, AdaBoost, случайного леса, наивная байесовская классификация, опорных векторов, наименьшего расстояния. Методы  $k$ -ближайших соседей, наименьшего расстояния и наивная байесовская классификация просты в реализации. Методы случайного леса и AdaBoost являются наиболее перспективными алгоритмами классификации. Метод опорных векторов один из наилучших методов для решения задачи бинарной классификации [4].

Выбран язык программирования R, являющийся языком высокого уровня с открытым исходным кодом. Важнейшие достоинства языка R – это открытость и простота изучения, к недостаткам можно отнести низкую производительность сложных алгоритмов [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ

Вычислительный эксперимент проводился на двух наборах данных: с перекрытием классов до 15 % и до 40 % (близко к реальным данным). Результаты работы классификаторов отражены в табл. 1 и 2.

Наибольшей точностью обладает метод опорных векторов, близкие показатели имеют AdaBoost и метод случайного леса. Наилучшего значения точности (100 %) при моделировании данных с пересечением до 40 % удалось достичь при использовании модели 2 с нормировкой по длине последовательности, а до 15 % – модели 3 (характерны два четко сформированных класса, с небольшим межклассовым расстоянием).

Таблица 1.

Точность классификации данных с перекрытием до 15 %

	Метод минимального расстояния	Наивная байесовская классификация	Метод $k$ -ближайших соседей	Опорных векторов	Случайный лес	AdaBoost
Модель 1	57,8	84,4	89,4	97,8	92,2	94,4
Модель 2	57,8	50,2	88,3	95,6	87,2	88,3
Модель 2, нормированная по длине	64,4	48,6	100	63,3	64,4	63,3
Модель 3	88,3	89,2	98,3	100	97,8	98,3

Установлено, что для каждой модели подходят свои группы алгоритмов классификации. Например, для модели 3 характерны разделимые классы, между которыми легко провести гиперплоскость, а, следовательно, лучше подходит метод опорных векторов.

Для РНК последовательностей, которые векторизованы с помощью модели 2 (нормированной по длине), лучшие результаты показал метод  $k$ -ближайших соседей (точность 100 %). Возможно, что объекты данных достаточно близки и внутрикласовое расстояние невелико.

Таблица 2.

Точность классификации данных с перекрытием до 40 %

	Метод минимального расстояния	Нивная байесовская классификация	Метод $k$ -ближайших соседей	Опорных векторов	Случайный лес	AdaBoost
Модель 1	55,6	81,6	89,4	95	86,1	88,3
Модель 2	55,6	51,7	88,3	91,7	82,2	78,3
Модель 2, нормированная по длине	91,6	92,2	100	95	96,1	96,1
Модель 3	62,2	77	98,3	98,8	98,8	97,9

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны 4 модели векторизации последовательностей нуклеотидов молекул РНК. Предложена имитационная модель генерации кодирующих и не кодирующих молекул РНК. Наилучшие результаты получены для модели на основе частот биграммов и триграммов нуклеотидов. Разработаны 6 алгоритмов классификации данных. Максимальная точность 100 % получена для метода опорных векторов. Хорошие результаты показали методы случайного леса и AdaBoost.

## Библиографические ссылки

1. *Al-Ajlan A., El Allali A.* Feature selection for gene prediction in metagenomic fragments // *BioData mining*. 2018. Vol. 11. Art. № 9. DOI: 10.1186/s13040-018-0170-z.
2. *Bao J.* An improved alignment-free model for DNA sequence similarity metric // *BMC Bioinformatics* / Bao J., Yuan R., Bao Z. // 2014. Vol.15:312. P.1–15.
3. Comparative analyses between retained introns and constitutively spliced introns in *Arabidopsis thaliana* using random forest and support vector machine / Mao R. and others // 2014. Vol. 9, P. 1–12.
4. *Zaki M. J., W. Meira Jr.* Fundamentals of Data Mining Algorithms // Cambridge University Press. 2010. P. 469–546.
5. *Мастюцкий С. Э., Шутиков В.К.* Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. 2015. Vol. 2. P.31–61.

# АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**А. П. Верстаковская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*verstakovskaya99@gmail.com*

*науч. рук. – А. А. Спиридонов, ст. преп.*

Рассматривается построение автономной мобильной станции приёма телеметрии с использованием программно-определяемой радиосистемы для определения орбит малых космических аппаратов (МКА). Данная станция позволит производить приём телеметрии МКА из любой точки мира в любой местности, удовлетворяющей допустимым нормам.

**Ключевые слова:** наземная станция приема, определение орбиты, программно-определяемый радиоприемник, приём телеметрии, малый космический аппарат.

Разработка новых методов построения наземных комплексов управления малыми и сверхмалыми космическими аппаратами является важной частью развития космической отрасли как университета, так и страны в целом [1]. С появлением новых технологий появляются возможности минимизировать затраты на построение таких комплексов и их размеры, при этом не теряя качества итогового продукта или даже улучшая его. Это, несомненно, актуально и для аэрокосмической индустрии. На сегодняшний день технологии позволяют принимать телеметрию спутников из любого уголка Земли, имея под рукой лишь компьютер с общедоступным программным обеспечением, приемник и антенну. Вскоре огромные наземные комплексы управления, занимающие гектары полезной площади, смогут уменьшиться до размеров небольшой комнаты со всем необходимым оборудованием.

В данной работе предложено минималистичное решение построения автономной мобильной наземной станции приема (МНСП) телеметрии, которое при этом позволит улучшить качество приема и увеличить количество принимаемых данных. Для решения задач по управлению университетскими сверхмалыми космическими аппаратами (СМКА), слежению и проведению сеансов радиосвязи актуальными являются вопросы надежного и оперативного приема телеметрии, прогнозирования будущих положений космического аппарата (КА). Выполнение прогнозирования для университетского наземного комплекса управления (НКУ) обычно происходит с использованием модели прогнозирования SGP 4, и входными данными являются орбитальные параметры в формате TLE системы NORAD (North American Aerospace Defense Command – Командование воздушно-космической обороны Северной Америки). TLE обновляются

ежедневно, доступны бесплатно, но в долгосрочной перспективе или в случае военных конфликтов система NORAD имеет возможность отключить общий доступ к базе данных. Реже на борту СМКА для определения точных координат и скорости используют навигационный приемник [2]. Еще одним способом получения начальных данных для моделей прогнозирования движения СМКА является определение орбиты на основе измерений характеристик радиосигналов телеметрической или командной радиолинии [3]. Измеряемыми параметрами для бюджетной университетской НСП являются время и доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала. Для корректного определения параметров орбиты МКА необходима временная синхронизация между приемной станцией и самим аппаратом. Наиболее точным из доступных является метод синхронизации с использованием GPS приемника с 1PPS сигналами.

Ранее уже была разработана архитектура построения МНСП на основе программно-определяемой радиосистемы [4]. МНСП состоит из антенны волновой канал с круговой поляризацией радилюбительского диапазона 435–438 МГц (или всенаправленной «квадрифилярной» антенны); системы приема на основе модуля SDR радиоприемника и усилителя входного сигнала; управляющего мобильного персонального компьютера (ноутбука); программно-аппаратных средств системы навигационно-баллистического обеспечения (НБО). Технология приёма предполагает приём одного и того же пакета телеметрии с СМКА на всех синхронизированных наземных станциях приема (НСП) и за счёт обработки измерений времени приёма и частоты радиосигнала телеметрии определения его точных орбитальных параметров.

Экспериментальный образец МНСП тестировался на приеме телеметрии и измерении орбит СМКА с различной периодичностью передачи пакетов телеметрии. В проведенных экспериментах были измерены времена приема и частоты радиосигналов телеметрии СМКА CubeBel-1 (измерения на одном пролете) и LUOJA-1 01 (измерения на нескольких пролетах). Радиосигналы телеметрии после преобразования на промежуточную частоту в модуле SDR радиоприемника поступали на вход модуля синхронизации, измерения частоты и времени для дальнейшей обработки. GPS модуль принимал радиосигналы навигационных КА и на вход модуля синхронизации, измерения частоты и времени передавал импульсные сигналы 1PPS, синхронизированные со шкалой времени UTC, текущие отсчеты системного времени GPS; точные координаты приемных антенн и NMEA пакеты. На выходе модуля синхронизации, измерения частоты и времени приема формировались время и частота принимаемых радиосигналов телеметрии, которые передавались в управляющий ПК для дальнейшей обработки в ПО определения и уточ-

нения орбит. Данные измерения на одном (для CubeBel-1) и нескольких последовательных пролетах (для LUOJA-1 01) СМКА по доплеровскому сдвигу частоты на моменты приема телеметрии сравнивались с результатами моделирования на основе SGP 4 модели по начальным данным в формате TLE. Было показано, что экспериментальные данные по доплеровскому сдвигу частоты хорошо согласуются с данными моделирования. Было проведено начальное определение параметров орбит СМКА. Для обработки измерений СМКА CubeBel-1 на одном пролете использовался алгоритм определения на основе модели невозмущенного движения. Для обработки измерений СМКА LUOJA-1 01 на нескольких пролетах использовался алгоритм определения на основе модели кругового возмущенного движения. По расчетным параметрам орбит СМКА была проведена оценка точности прогнозирования угла места, азимута КА и доплеровского сдвига частоты радиосигналов телеметрии. Абсолютные ошибки прогнозирования угла места и азимута не превосходили  $3^\circ$ , абсолютная ошибка прогнозирования доплеровского сдвига частоты не превосходила 150 Гц, что является достаточным для успешного приема радиосигналов телеметрии и их декодирования.

Используя данную архитектуру, предлагается сделать станцию автономной для возможности использования в любых условиях в любой точке страны и мира. С этой целью исходная структура станции была модифицирована следующим образом: персональный компьютер был заменен на одноплатный промышленный компьютер, была добавлена автономная система питания с возможностью зарядки от солнечных батарей или ветряных генераторов. Модифицированный вариант построения автономной МНСП показан на рисунке. В связи с предположением работы станции в неблагоприятных или экстремальных условиях, необходимо выбирать оборудование с соответствующими техническими параметрами: широкий интервал рабочих температур, в том числе отрицательных; устойчивость к влаге (данный параметр можно не учитывать при использовании герметичного корпуса для размещения всей аппаратуры); устойчивость к вибрациям; высокая энергоэффективность; малогабаритность; долгий срок службы. Важной характеристикой одноплатного компьютера является наличие GSM-модуля либо интерфейса Ethernet для осуществления передачи данных на центральный НКУ.

Для удаленного контроля работы аппаратуры автономная МНСП может быть оснащена аудио и видео оборудованием. Эта опция упразднит необходимость постоянного «полевого» контроля, что позволит проводить выездное обслуживание станции лишь при необходимости.

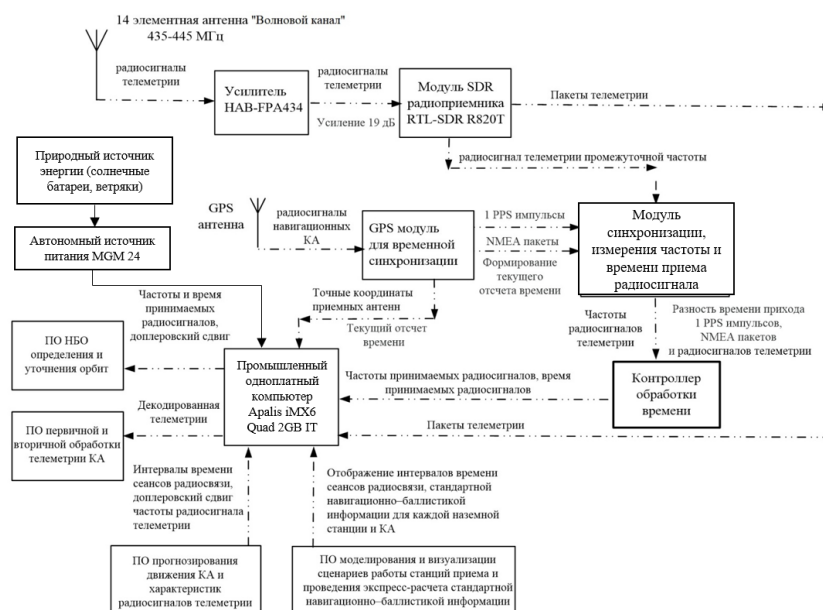


Рис. 1. Структурная схема (архитектура) автономной МНСП для телеметрии и определения орбиты МКА

Использование автономных МНСП для приема телеметрии СМКА позволит разительно увеличить географию приема, улучшить качество приема за счет возможности работы за пределами городской «зашумленной» среды, самостоятельно получать орбитальные параметры на основе обработки измерений, на практике обучать студентов технологиям определения орбит КА.

#### Библиографические ссылки

1. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты. Минск: БГУ, 2012.
2. Спиридонов А. А., Саечников В. А., Ушаков Д. В. Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 4. С. 331–340.
3. Sakamoto Y., Yotsumoto K., Sameshima K., etc. Acta Astronautica. 2008. Vol. 62, P. 151-158.
4. Верстаковская А. П., Спиридонов А. А., Черный В. Е. Мобильная станция приема телеметрии малых космических аппаратов // Электроника плюс. 2019. № 3. С. 52-57.



# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ

А. А. Горбунова

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*anastasia.gorbunova.so@yandex.ru;*

науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.

Работа посвящена сравнительному анализу алгоритмов снижения размерности данных, таких как методы главных и независимых компонент, стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением, равномерного приближения и проекции, многомерного шкалирования, неотрицательной матрицы факторизации, с целью классификации групп пациентов на основе данных об экспрессии генов. Сравнительный анализ реализованных методов выполнен на смоделированных наборах данных, представляющих кластеры различной сложности. Наилучшими алгоритмами являются методы стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением и равномерного приближения и проекции, позволяющие наиболее эффективно осуществить классификацию пациентов. В методе стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением среднее отношение кластерных расстояний составляет 17,71, в методе равномерного приближения и проекции – 12,50. Среднее время работы метода стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением составляет 12,7 с, метода равномерного приближения и проекции – 1,3 с.

**Ключевые слова:** методы снижения размерности; экспрессия генов; классификация; алгоритмы моделирования; критерии качества анализа.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие биотехнологий напрямую связано с разработкой эффективных методов и алгоритмов обработки большого объема информации, получаемой в результате секвенирования последовательностей ДНК и РНК. Используя секвенирование РНК, можно количественно измерить генную экспрессию, обнаружить новые транскрипты и однонуклеотидные полиморфизмы. Однако реализация данной задачи требует оптимального использования существующих алгоритмов снижения размерности данных. Среди существующих алгоритмов следует выделить наиболее перспективные методы, такие как метод главных компонент (далее используется аббревиатура PCA от англ. *principal component analysis*), метод независимых компонент (ICA от англ. *independent component analysis*), метод стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением (tSNE от англ. *t-distributed stochastic neighbor embedding*), метод равномерного приближения и проекции (UMAP от англ. *uniform approximation and projection*), многомерное шкалирование (MDS от англ. *multidimen-*

*sional scaling*), метод неотрицательной матрицы факторизации (NMF от англ. *non-negative matrix factorization*) [1-2].

Цель работы – изучить и исследовать алгоритмы снижения размерности данных на примере классификации групп пациентов на основе анализа данных об экспрессии генов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБОРОВ БИОДААННЫХ

В работе реализована имитационная модель кластеров многомерных данных [3], учитывающая количество кластеров, индекс разделения между кластерами, количество шумовых, нешумовых и прочих признаков. Для сравнения алгоритмов снижения размерности данных смоделированы три набора данных разной сложности, далее именуются система 1 (чистые данные), система 2 (средние данные) и система 3 (зашумленные данные). При моделировании данных важно реализовать наборы различными по степени разделения кластеров, наличию шумовых и нешумовых признаков и количеству выбросов. Наборы данных представляют кластеры 10-мерных данных. Количество кластеров в каждом наборе – 3.

Для моделирования чистых данных заданы следующие параметры: индекс разделения между кластерами – 0,6, количество нешумовых переменных – 8, количество шумовых переменных – 2, количество выбросов – 3. В результате получен набор данных, содержащий 462 объекта.

Для моделирования средних данных заданы следующие параметры: индекс разделения между кластерами – 0,4, количество нешумовых переменных – 4, количество шумовых переменных – 6, количество выбросов – 3. В результате получен набор данных, содержащий 485 объектов.

Для моделирования зашумленных данных заданы следующие параметры: индекс разделения между кластерами – 0,2, количество нешумовых переменных – 3, количество шумовых переменных – 7, количество выбросов – 10. В результате получен набор данных, содержащий 342 объекта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Качество анализа данных оценено по трем критериям: 1) время работы метода  $t$ , 2) средние внутрикластерные  $\langle d_{intra} \rangle$  и межкластерные  $\langle d_{inter} \rangle$  расстояния 3) отношения средних внутрикластерных и межкластерных расстояний  $\frac{\langle d_{intra} \rangle}{\langle d_{inter} \rangle}$ . Эффективность работы алгоритма определена следующим образом: чем меньше время, затраченное на работу алго-

ритма, тем он лучше; чем меньше внутрикластерное расстояние, тем больше точки сконцентрированы внутри кластера, тем эффективнее метод; чем больше межкластерное расстояние, тем дальше кластеры удалены друг от друга, тем эффективнее алгоритм.

Результаты классификации пациентов на основе анализа данных об экспрессии генов представлены для шести методов снижения размерности данных на рисунке. Наилучшие результаты показал алгоритм UMAP, отличительной особенностью которого является построение взвешенного неориентированного графа более низкой размерности. Алгоритм показал наименьшее значение  $\langle d_{intra} \rangle = 50,41$ , наибольшее значение  $\langle d_{inter} \rangle = 2,28$ , и наименьшее отношение  $\frac{\langle d_{intra} \rangle}{\langle d_{inter} \rangle} = 22,15$ .

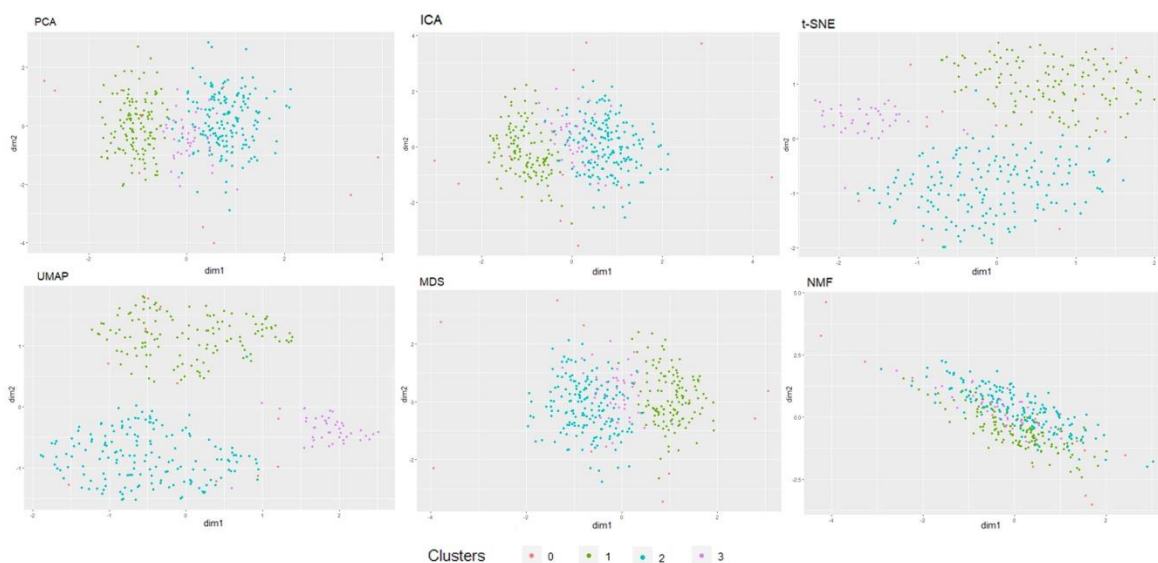


Рис. 1. Диаграммы разброса для кластеров данных системы 3 в пространствах наиболее информативных координат, вычисленных методами PCA, ICA, tSNE, UMAP, MDS, NMF

Методы tSNE и UMAP даже на сложных данных успешно выполняют задачу, однако UMAP работает качественнее, в tSNE наблюдается менее выраженное разделение, в то время как после выполнения остальных методов наблюдается частичное или полное перекрытие нескольких кластеров. По степени разделения данных наилучшие результаты демонстрирует метод UMAP. Значения  $\langle d_{intra} \rangle$  и  $\langle d_{inter} \rangle$  наихудшие у NMF. PCA имеет низкие показатели по рассматриваемым критериям, однако обладает более высокой скоростью работы. Самый быстрый алгоритм ICA плохо справляется с зашумленными данными, наблюдается значительное перекрытие кластеров. MDS показывает схожие результаты с ICA, однако проигрывает по времени работы. Оценки критериев качества работы алгоритмов представлены в таблице.

**Оценки критериев качества работы алгоритмов  
на смоделированных наборах данных**

Система	Параметр	Алгоритм					
		PCA	ICA	tSNE	UMAP	MDS	NMF
Система 1	$t, c$	0,02	0,01	15,42	1,38	0,22	0,22
	$\frac{\langle d_{intra} \rangle}{\langle d_{inter} \rangle}$	28,99	13,27	11,74	5,19	13,27	10,70
Система 2	$t, c$	0,01	0,01	15,11	1,41	0,27	0,23
	$\frac{\langle d_{intra} \rangle}{\langle d_{inter} \rangle}$	51,18	28,10	15,18	10,05	28,10	19,58
Система 3	$t, c$	0,03	0,02	7,57	1,06	0,11	0,25
	$\frac{\langle d_{intra} \rangle}{\langle d_{inter} \rangle}$	50,19	54,15	26,20	22,15	54,15	112,95

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ шести методов снижения размерности данных: PCA, ICA, tSNE, UMAP, MDS, NMF. Лучше всего с задачей разделения кластеров данных об экспрессии генов справляется UMAP (среднее отношение кластерных расстояний 12,5). Методы PCA (43,5) и NMF (47,7) подходят преимущественно для чистых данных невысокой размерности, при усложнении данных наблюдается большое перекрытие кластеров. Самый быстрый из представленных метод ICA (31,8) и сходный в работе с ним метод MDS (31,8) следует использовать на чистых или средних данных. Метод tSNE (17,7) отлично подходит для разделения чистых и средних данных, на зашумленных данных метод работает приемлемо, но хуже, чем UMAP. При увеличении начальной или конечной размерности данных, tSNE значительно проигрывает UMAP.

Выполненная работа позволяет сделать вывод о том, что наиболее оптимальными алгоритмами снижения размерности данных для исследования экспрессии генов являются методы tSNE и UMAP.

### Библиографические ссылки

1. Li, X. Genomic Analysis of Liver Cancer Unveils Novel Driver Genes and Distinct Prognostic Features / X. Li, W. Xu, W. Kang // *Theranostics*. 2018. № 8. P. 1740–1751.
2. Maaten, L., Hinton, G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*. 2008. Vol. 9, P. 2579-2605.
3. Qiu W., Joe H. Generation of Random Clusters with Specified Degree of Separation // *Journal of Classification*. 2006. Vol. 23. DOI: 10.1007/s00357-006-0018-y.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ СОТРУДНИКОВ КУХНИ ОБЪЕКТОВ ОБЩЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ

**И. Д. Горшков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*mailthedump@gmail.com;*

*науч. рук – А. В. Микулович, ст. преп.*

В работе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой мобильного приложения, предназначенного для структурирования и частичной автоматизации работы сотрудников объектов общественного питания. Реализация мобильного приложения производилась с помощью интегрированной среды разработки Xcode, предоставляющей весь необходимый функционал по созданию программно-аппаратной и графической части приложения. Интегрированная среда разработки написана на языке программирования Objective-C. Ее компоненты позволяют создавать программный код, графическую часть приложения и тестировать все возможные части кода с интерфейсом приложения. Логика приложения, реализуемая программным кодом и графическим интерфейсом, вынесены в отдельные файлы, что позволяет обеспечить полное покрытие тестами программного кода. Подобный подход позволяет грамотно использовать все компоненты интегрированной среды разработки Xcode, что в конечном итоге приводит к стабильной и отлаженной работе мобильного приложения.

**Ключевые слова:** Интегрированная среда разработки Xcode; мобильная разработка; objective-c; графический интерфейс; реализация мобильного приложения.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях увеличения населения и популяризации общепита грамотное принятие и обработка заказов становятся особенно важными. По результатам опроса, проведенного среди работников трех ресторанов (IL Патио, Union Coffee, Cafe Netto), все были согласны, что с помощью специализированного мобильного приложения они бы ускорили свою работу. Все три ресторана работали по одному методу обработки заказа: первым шагом было принятие заказа у клиента, вторым шагом – оформление заказа через специализированный терминал и третий шаг – появление чека на кухне для начала подготовки блюда.

В настоящее время на рынке не существует мобильных приложений, которые могли бы в полной мере автоматизировать работу с помощью мобильных устройств. Из-за этого официантам приходится тратить большое количество времени, чтобы оформить заказ и передать его на кухню, что в итоге приводит к убыткам ресторанов. В связи с этим было принято решение о разработке мобильного приложения, которое позволит официантам намного быстрее принимать заказы, оформлять их, а также отслеживать, какие столы они обслуживали в свою рабочую смену.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ К ПРИЛОЖЕНИЮ

Перед началом создания мобильного приложения с помощью интегрированной среды разработки Xcode [1] необходимо разработать техническое задание [2] и прототипы экранов приложения [3]. Техническое задание позволяет четко понимать, какой функционал должен существовать в будущем приложении и каковы примерные сроки разработки. На основе прототипов экранов (рис. 1) и задач, описанных в техническом задании, строится пошаговый план создания мобильного приложения.



Рис. 1. Интерфейс прототипа приложения

## МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Согласно техническому заданию приложение состоит из 6 экранов и имеет следующий функционал (рис. 2):

1. Логирование пользователя.
2. Создание нового заказа или просмотр текущих.
3. Выбор стола.
4. Выбор категории блюда.
5. Выбор блюда.
6. Проверка заказа и завершение формирования заказа.

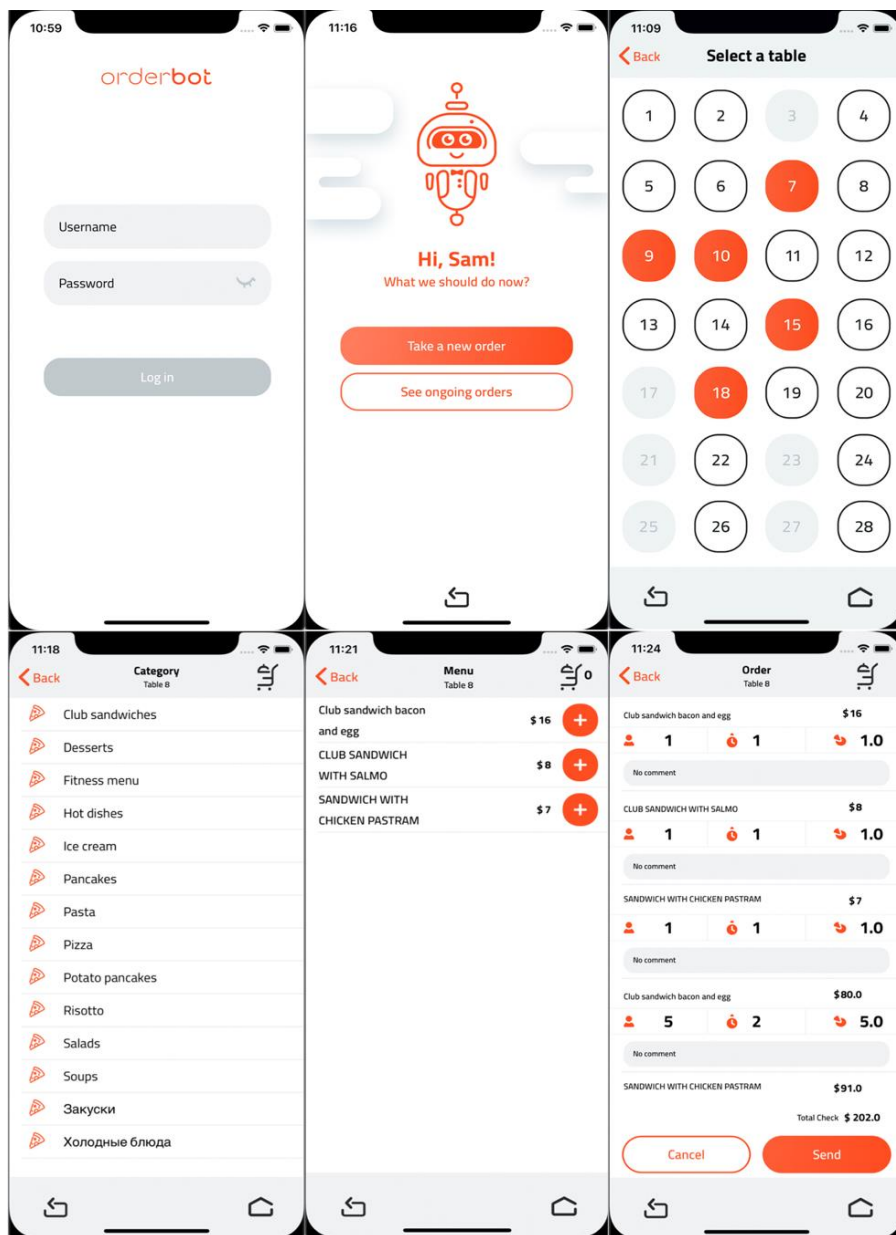


Рис. 2. Интерфейс разработанного приложения

В ходе работы было разработано мобильное приложение для автоматизации работы сотрудников кухни объектов общественного питания. В приложении был учтен весь описанный функционал технического задания. Графический интерфейс разработан в соответствии с созданными прототипами. Для разработки использовалась интегрированная среда разработки Xcode.

Была реализована основная идея – создать простое приложение, которое помогало бы легко и просто оформить заказ. При этом был учтён ряд недостатков уже существующих методов принятия заказов: долгое оформление заказа, лишняя посещаемость терминала, исправление ошибок официанта только через терминал, невозможность узнать готовность заказа без прихода на кухню. Интерфейс настоящего приложения достаточно прост и не требует долгого изучения.

## **ВЫВОДЫ**

Данное приложение может упростить и ускорить работу сотрудников кухни объектов общественного питания. Простой графический интерфейс позволяет быстро оформлять, редактировать и отслеживать заказы. За счет реализации приложения через интегрированную систему Xcode в будущем будет довольно просто добавлять новый функционал и вносить изменения в существующий графический интерфейс. На данный момент приложение поддерживает все существующие версии мобильных телефонов iPhone и операционные системы iOS.

## **Библиографические ссылки**

1. Xcode [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Xcode> (дата обращения: 21.05.2020).
2. Техническое задание на разработку приложения [Электронный ресурс]. URL: <https://punicapp.com/blog/pages/332/tehnicheskoe-zadanie-na-razrabotku-prilozheniya/> (дата обращения: 21.05.2020).
3. Прототипирование приложения [Электронный ресурс]. URL: <http://improve-group.ru/materials/prototyping-review.html> (дата обращения: 21.05.2020).



# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОТБОРА ПРИЗНАКОВ

**В. Н. Гребенник**

*Белорусский государственный университет, Минск*

*leragrebennik@yandex.com*

*науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.,*

*С. В. Гилевский, канд. техн. наук, доц.*

В настоящей работе предложен и исследован алгоритм для генерации многомерных наборов данных, которые учитывают информативность подгрупп признаков. Выполнен сравнительный анализ алгоритма счета Фишера, Relief-F и «минимальная избыточность – максимальная релевантность» на смоделированных данных, которые показывают работоспособность модели в контексте данной работы. Рассмотренные методы способны отбирать информативные признаки в многомерных данных, которые имеют большое количество неинформативных признаков. Работа позволяет снизить объем обрабатываемых данных, что дает возможность получить значительно более простые прогностические модели, что повышает их интерпретируемость.

**Ключевые слова:** отбор признаков, имитационное моделирование.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Активно развивающиеся информационные технологии и оборудование позволяют получать многомерные наборы данных. Многомерные наборы данных представляют собой некоторые объекты исследования, характеризующиеся набором признаков [1]. Основная часть признаков в таких данных не информативна, что приводит к снижению точности анализа и к высокому потреблению вычислительных ресурсов [1].

Для выбора информативных признаков используются методы автоматического отбора признаков [2]. Существующие методы достаточно просты и направлены на анализ несложных данных. Однако проблема заключается не в методах (их можно улучшить, зная точно, что требуется найти в наборах данных), а в использовании адекватных наборов экспериментальных или смоделированных данных, позволяющих тщательно исследовать алгоритмы методов.

Цель данной работы – разработка имитационной модели кластеров многомерных данных с учетом информативности признаков для тестирования алгоритмов автоматического отбора признаков.

## МЕТОДОЛОГИЯ

Входными параметрами имитационной модели являются: число кластеров в генерируемом наборе данных; число не шумовых, шумовых и избыточных признаков; степень разделимости кластеров; значение или диапазон значений размеров кластеров. На рис. 1 представлена блок-схема имитационного алгоритма.

В основе модели лежит мера или степень разделимости близлежащих кластеров. В качестве метрики используется индекс разделимости Цю и Джо [3].



Рис. 1. Блок-схема имитационного алгоритма

Рассмотрены кластеры данных, характеризующиеся различной степенью разделимости. Индекс разделимости для хорошо разделяющихся кластеров положен равным 0,64, для удовлетворительно разделяющихся кластеров – 0,34, и для плохо разделяющихся кластеров – 0,1 (за основу взята экспертная оценка).

Для проверки применимости предложенного подхода выбраны следующие методы отбора признаков:

- алгоритм счёта Фишера [4],
  - алгоритм Relief-F [5],
  - алгоритм «минимальная избыточность – максимальная релевантность» [6].
- Данные алгоритмы позволяют осуществлять ранжирование признаков по значимости и являются вычислительно эффективными.

Метод классификации  $k$ -ближайших соседей не имеет каких-либо внутренних механизмов отбора признаков, поэтому и выбран в качестве оценки точности классификации на заданном наборе признаков [7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью, проведения сравнительного анализа алгоритмов отбора признаков в условиях большого числа шумовых признаков был сгенерирован набор данных, содержащий 10 информативных и 40 шумовых признаков. В рамках данного набора признаков заданы 3, 7, 10 и 14 классов по 100 объектов наблюдения в каждом. Методы отбора демонстрируют свою применимость. Пример диаграммы значений точности классификации представлен на рис. 2.

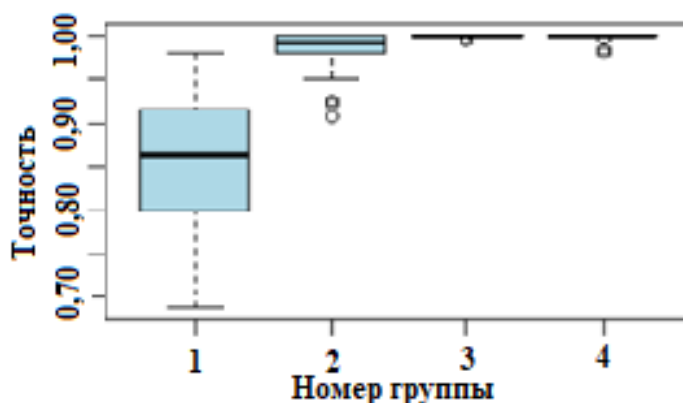


Рис. 2. Пример диаграммы значений точности классификации: 1 – исходный набор данных; 2 – отобранный набор методом Relief-F; 3 – отобранный набор методом счета Фишера; 4 – отобранный набор методом «минимальная избыточность – максимальная релевантность». Параметры моделирования: генерировалось 3 кластера признаков со значением индекса разделимости 0,34; 100 наблюдений в каждом кластере; количество признаков – 50, из которых 10 информативные и 40 неинформативные

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена и исследована имитационная модель для тестирования алгоритмов отбора признаков. Уникальной особенностью модели является генерация многомерных наборов данных с заданной степенью разделимости и различной информативности признаков. Результаты исследования алгоритмов отбора признаков на смоделированных данных демонстрируют применимость модели.

Исследованы подходы [4], [5] и [6] для генерации. Методы демонстрируют свою применимость в контексте разработанной имитационной модели.

### Библиографические ссылки

1. *Hanan Samet* Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures // Morgan Kaufmann Publishers – 2006. ISBN 13: 978-0-12-369446-1.
2. *L.Ladha* Feature Selection Methods And Algorithms // International Journal on Computer Science and Engineering Vol. 3 May 2011 - IJCSE11-03-05-051, ISSN : 0975-3397.
3. *Qiu, W.L.* Generation of Random Clusters with Specified Degree of Separation / W.L. Qiu, H. Joe //Journal of Classification. – Vol. 23(2). – 2005. – P.315–334. DOI: 10.1007/s00357-006-0018-y.
4. *Quanquan Gu, Zhenhui Li, Jiawei Han* Generalized Fisher Score for Feature Selection // Proceedings of the 27th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, UAI 2011.
5. *Marko Robinik-Sikonja, Igor Kononenko* Theoretical and Empirical Analysis of ReliefF and RReliefF // Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands – Machine Learning, 53, 23–69, 2003.
6. *Zhenyu Zhao, Radhika Anand, Mallory Wang* Maximum Relevance and Minimum Redundancy Feature Selection Methods for a Marketing Machine Learning Platform. DOI: 10.1109/DSAA.2019.00059.
7. *Oliver Sutton* Introduction to k Nearest Neighbour Classification and Condensed Nearest Neighbour Data Reduction // February, 2012. Corpus ID: 18781499.

# МАКЕТ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ НАНОСПУТНИКА

**В. Е. Евчик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск,*

*slava97evev@gmail.com*

*науч. рук. – А. А. Спиридонов, ст. преп.*

Предложен вариант построения бортового модуля системы определения ориентации и стабилизации для макета университетского наноспутника. Макет наноспутника и подсистема «Наземный комплекс управления» составляют основу аппаратных средств лаборатории удаленного доступа. Описаны программно-аппаратные средства модуля системы определения ориентации и стабилизации и его функциональные возможности.

**Ключевые слова:** наноспутник; система определения ориентации и стабилизации; имитатор космического аппарата; лаборатория удаленного доступа.

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Лабораторная база подготовки специалистов аэрокосмической отрасли даже на классе сверхмалых космических аппаратов – это дорогостоящее, а иногда и уникальное оборудование, которое неэффективно использовать в обычном физическом лабораторном практикуме при персональной подготовке студентов на отдельных лабораторных стендах. Стоимость инженерной модели наноспутника с программным обеспечением достигает сотен тысяч долларов США. Кроме того, нужно заметить, что космический аппарат – это сложный комплексный прибор с которым близкий контакт человека-оператора невозможен, поэтому необходимо специальное оборудование для дистанционного управления и сбора экспериментальных данных [1]. Навыки дистанционного управления и сбора экспериментальных данных являются необходимой частью подготовки специалистов аэрокосмической отрасли.

Уникальность и высокая стоимость аппаратуры, ее востребованность как в образовательном процессе, так и в реальных научных исследованиях привели к идее создания лабораторий удаленного доступа по аэрокосмическим направлениям «Космические аппараты», «Наземные комплексы» [2].

## МОДУЛЬ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

Имитатор космического аппарата (КА) и подсистема «Наземный комплекс управления», макетно имитирующая работу реального наземного

комплекса управления КА, составляют основу аппаратных средств для лаборатории удаленного доступа. Бортовой модуль определения ориентации и стабилизации работает в составе имитатора КА совместно с подсистемами «Бортовой компьютер», «Бортовой модуль связи», «Бортовой модуль электропитания». Бортовой модуль предназначен для определения ориентации подсистем, имитирующих работу бортовых систем КА и стабилизации углового положения этих подсистем. Он использует коммерческие комплектующие для датчиков ориентации и разработанные электромагнитные катушки для обеспечения требуемого углового момента стабилизации.

## РАЗРАБОТКА

Для реализации бортового модуля определения ориентации и стабилизации был использован микроконтроллер STM32F103 вместо первоначально запланированного микроконтроллера ATmega2560. Это связано с его большей производительностью, меньшим энергопотреблением, большим набором интерфейсов подключения и унификацией бортовых компьютеров на имитаторе КА. В бортовом модуле определения ориентации и стабилизации реализуются алгоритмы определения ориентации, алгоритмы стабилизации и алгоритмы управления угловым положением имитатора КА. Микроконтроллер STM32F103 бортового модуля определения ориентации и стабилизации подключен к подсистеме «Бортовой компьютер» на основе микроконтроллера STM32F746 через SPI интерфейс.

В качестве исполнительных органов системы стабилизации были разработаны магнитные катушки как воздушные, так и с сердечником из магнитомягкого материала, создающие управляющие моменты. Для управления угловым положением используется трехосевая электромагнитная система стабилизации: 6 катушек, расположенных по трем взаимно-перпендикулярным осям. Две катушки располагаются вдоль осей  $Ox_b$  и  $Oy_b$  связанной с бортовым модулем определения ориентации и стабилизации системы отсчета и имеют максимальные значения магнитных моментов не менее  $0,1 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ . Еще 4 катушки, расположенные вдоль оси  $Oz_b$ , имеют суммарное максимальное значение магнитного момента не менее  $0,1 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ .

Управление электромагнитной системой стабилизации осуществляется микроконтроллером STM32F103 путем подачи команд управления. Микроконтроллер посылает команды на включение и выключение катушек, на изменение направления токов в магнитных катушках, через UART TTL на драйвер катушек A3953. Также посылаются команды на

цифровой потенциометр MCP4561, подключенный к микроконтроллеру через I2C интерфейс, тем самым обеспечивая управление по величине тока катушек согласно алгоритмам стабилизации и управления угловым положением, как показано на рисунке. Каждая из магнитных катушек подключена к драйверу катушек A3953 посредством линии питания через датчик тока и напряжения INA219, который обеспечивает получение телеметрии по току и напряжению от каждой катушки.

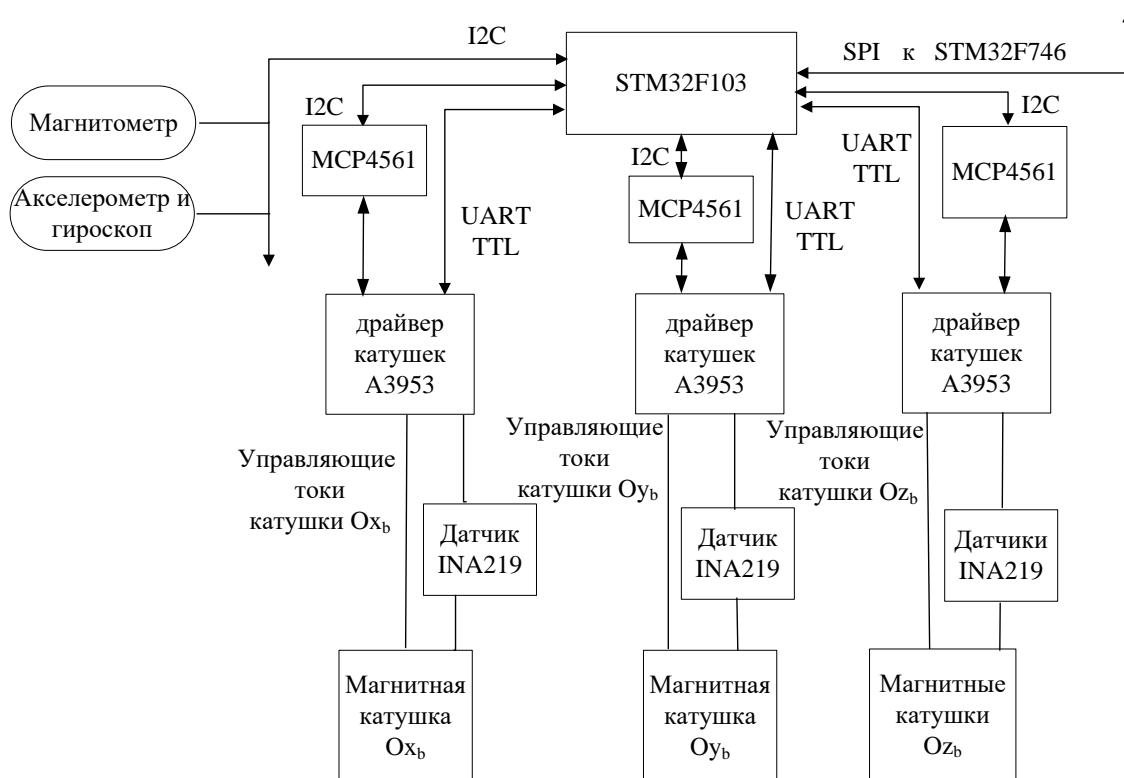


Рис. 1. Структура бортового модуля определения ориентации и стабилизации

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

При макетном моделировании одноосной системы ориентации и стабилизации имитатор КА подвешивается на струнном подвесе в имитаторе магнитного поля учебного комплекса отработки систем ориентации и стабилизации малых КА вдоль вертикальной оси  $Oz$  неподвижной инерциальной системы координат  $Oxuz$  (связанной с неподвижным имитатором магнитного поля). Это обеспечивает его вращение вокруг этой оси  $Oz$ , которая совпадает либо с осью  $Oz_b$  связанной с имитатором КА вращающейся системы координат  $Ox_b y_b z_b$ , либо с осью  $Oy_b$ . Система координат  $Ox_b y_b z_b$  равномерно вращается относительно неподвижной инерциальной системы координат  $Oxuz$  с относительной угловой скоростью  $\omega_z$ . Оси  $Ox_b$  и  $Oy_b$  направлены вдоль осей магнитных катушек, ста-

билизирующих имитатор КА во внешнем магнитном поле. Учебный комплекс отработки систем ориентации и стабилизации малых КА моделирует реальное орбитальное магнитное поле с учетом масштабных коэффициентов.

Бортовой модуль определения ориентации и стабилизации определяет ориентацию и угловую скорость вращения имитатора КА, подвешенного на струнном подвесе, на основе данных основных датчиков, проверяет точность определения ориентации по показаниям резервных датчиков системы ориентации. Программное обеспечение (ПО) определения ориентации позволяет моделировать и обрабатывать детерминированные и статистические алгоритмы определения ориентации на основе данных как одного датчика (например магнетометра), так и на основе данных нескольких датчиков (магнетометра и трехосевого гироскопа) с учетом смещений показаний датчиков. ПО управления угловым положением позволяет моделировать и обрабатывать алгоритмы демпфирования угловой скорости; алгоритмы раскрутки спутника вокруг оси симметрии до заданной угловой скорости; наведения имитатора КА, подвешенного на струнном подвесе, на заданное направление.

## **РЕЗУЛЬТАТ**

Разработка и внедрение в образовательный процесс лаборатории удаленного доступа позволит повысить качество подготовки специалистов по специальностям, связанным с разработкой космических аппаратов и систем управления, в том числе и по специальности «Аэрокосмические радиоэлектронные и информационные системы и технологии»; приведет к сокращению объемов закупки импортного оборудования для учебных и научных целей. Разработка бортового модуля определения ориентации и стабилизации для лаборатории удаленного доступа позволит на практике познакомить студентов с датчиками и алгоритмами определения ориентации КА, исполнительными органами и алгоритмами стабилизации и управления угловым положением КА.

### **Библиографические ссылки**

1. *Абламейко С. В.* Малые космические аппараты. Минск: БГУ, 2012. 159 с.
2. *Спиридонов А. А.* Интеллектуальные информационные системы: труды Междунар. научно-практ. конф. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. Ч.1. С. 170-174.



# РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ РАСПИСАНИЯ СТУДЕНТАМИ ФАКУЛЬТЕТА РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Е. Д. Искренков**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*e.iskrenkov@gmail.com;*

*науч. рук. – Ю. А. Бондаренко, ассистент*

В данной работе была выполнена разработка веб-приложения для просмотра и редактирования расписания учебных занятий студентами факультета радиофизики и компьютерных технологий на основе веб-фреймворка Ruby on Rails [1]. Предусмотрен доступ к данным, хранящимся на сервере приложения, при помощи как веб-браузера, так и популярного на данный момент мессенджера Telegram, с использованием чат-бота. Разработан открытый API, предоставляющий любому желающему доступ к данным и, следовательно, позволяющий разрабатывать клиенты для любых операционных систем (ОС) с использованием соответствующих технологий. Приложение было введено в эксплуатацию в 2019 году и активно используется по сей день.

**Ключевые слова:** веб-приложение; Ruby; Ruby on Rails; Telegram; API; MySQL; реляционные базы данных.

## **ВВЕДЕНИЕ**

На данный момент в БГУ не существует единого, контролируемого самим университетом портала для публикации изменений в текущем учебном расписании, что несет собой неудобство как для самих студентов, так и для старост групп, которым собственноручно приходится любым возможным способом доносить расписание и изменения в нем до учащихся. Целью данной работы было решить данный вопрос, создав удобный, доступный и легко масштабируемый инструмент для сохранения, обновления и просмотра расписания студентами факультета.

## **ТЕХНОЛОГИИ**

При выборе технологий для реализации задуманного проекта важнейшими критериями являлись, в первую очередь, простота и скорость разработки. Выбор языка программирования пал на язык Ruby, разработанный японским разработчиком Юкихио Мацумото в 1995 году [2]. Философией языка является удобство и минимизация затрат труда программиста при разработке программы, освобождение программиста от рутинной работы, которую компьютер может выполнять быстрее и качественнее, что как нельзя лучше соответствует нашим требованиям. Кроме того, неоспори-

мым преимуществом Ruby перед другими объектно-ориентированными языками программирования является наличие реализованного на нем и свободно распространяемого веб-фреймворка Ruby on Rails, который был создан с уважением к концепциям и принципам самого Ruby – простоте и легкости в использовании. Ruby on Rails обладает минимальным значением Time to Production (время до релиза приложения) и значительно расширяет функциональные возможности языка, предоставляя огромный инструментарий для создания типовых веб-приложений.

Для сохранения данных, введенных пользователем, приложение использует свободную реляционную базу данных MySQL [3]. Обычно MySQL используется в качестве сервера, к которому обращаются локальные или удалённые клиенты, однако в дистрибутив входит библиотека внутреннего сервера, позволяющая включать MySQL в автономные программы. Для удобного доступа к данным в коде приложения используется технология программирования ORM (Object-Relational Mapping), реализованная в виде отдельного фреймворка, входящего в состав Ruby on Rails, – ActiveRecord.

Кроме того, приложение взаимодействует с популярным мессенджером Telegram для быстрой и удобной доставки расписания. Для этой цели используется Telegram API [4], который требует предварительной регистрации чат бота и получения уникального API-токена для дальнейшей работы.

## СХЕМА БАЗЫ ДАННЫХ

Как было упомянуто ранее, приложение взаимодействует с базой данных MySQL посредством ORM-фреймворка. Схема базы данных приложения приведена на рис. 1.

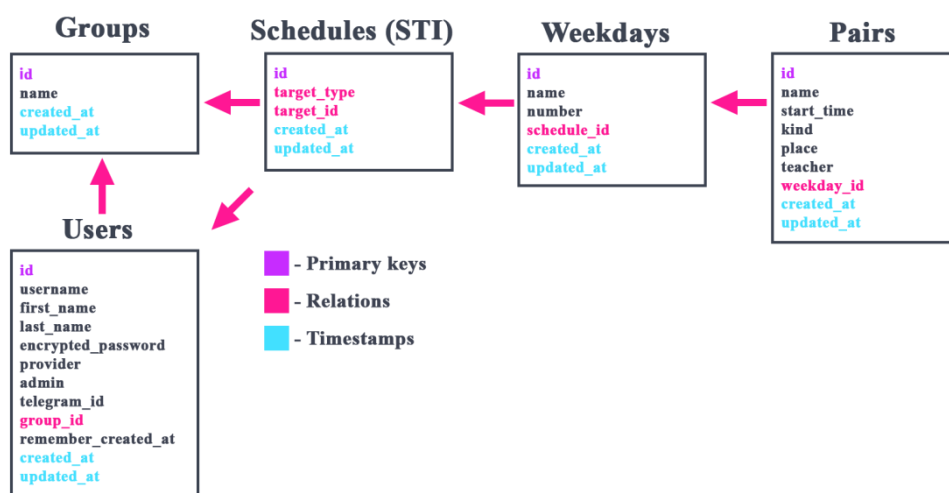


Рис. 1. Схема базы данных приложения

Главная сущность приложения – User, она представляет собой конкретного пользователя, зарегистрированного в системе. Как видно на

схеме, в таблице Users присутствует колонка *admin*, благодаря которой осуществляется проверка прав пользователя на редактирование расписания. Таким образом, любой пользователь может являться администратором и иметь доступ к созданию новых групп и изменению расписания существующих. Также, каждый User принадлежит своей группе, с которой, в свою очередь, связано конкретное расписание. В нем содержится 7 дней недели, каждому из которых соответствует список пар. Интересным моментом в схеме является то, что модель Schedule поддерживает механизм STI (Single Table Inheritance), что позволяет Расписанию принадлежать как всей группе, так и отдельному пользователю.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение использует концепцию MVC (Model - View - Controller), что позволяет удобно и грамотно разделить его логику. Модели полностью соответствуют приведенной ранее схеме базы данных, так как каждая модель связана со своей таблицей. Рассмотрим схему классов контроллеров приложения, представленных на рис. 2.

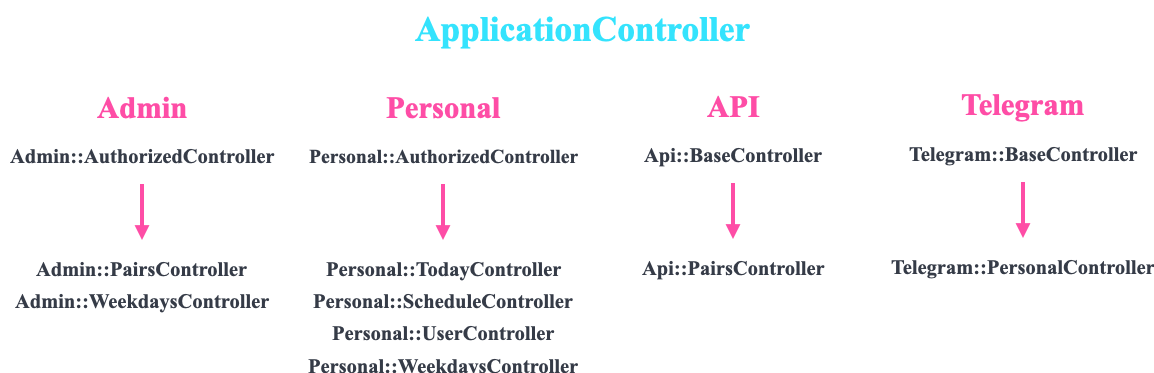


Рис. 2. Схема наследования контроллеров приложения

Как мы видим, все контроллеры наследуются от базового класса ApplicationController, предоставляемого фреймворком. Далее все контроллеры разбиты на 4 именные области, каждая из которых отвечает за свою часть приложения. Контроллеры, определенные в именной области Admin, наследуются от AuthorizedController, который содержит авторизационную логику администратора. Таким образом, все Admin контроллеры будут доступны только при наличии соответствующих прав. В области имен Personal также содержится базовый контроллер, проверяющий аутентификацию пользователя. Гость не имеет доступа к контроллерам этой области. Контроллеры области имен API предоставляют открытый API для разработчиков в то время, как контроллеры в области имен Telegram принимают и обрабатывают запросы Telegram бота.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ TELEGRAM БОТА

В процессе регистрации Telegram генерирует для каждого созданного бота уникальный API токен. Используя его, мы можем получить текущую очередь сообщений, отправленных кем угодно в чат с нашим ботом. Наша задача – запустить процесс-демон, который будет с некоторым интервалом опрашивать Telegram на предмет наличия обновлений. На данном этапе из всех предоставленных нам данных самым важным для нас является поле *id*. По его значению система находит зарегистрированного пользователя в базе данных. Определив пользователя, отправившего сообщение, нам не составит труда найти расписание, принадлежащее группе пользователя, и отправить ему текстовый ответ.

## ВЫВОДЫ

Благодаря своей простоте и интуитивности фреймворк Ruby on Rails является выдающейся базой для создания любых по сложности, и что немаловажно, расширяемых веб-приложений. В данной работе с его помощью удалось с относительной простотой объединить веб-часть и часть, ответственную за обработку сообщений Telegram ботом в одном приложении. Кроме того, удалось создать удобную и интуитивную систему для отслеживания расписания студентами факультета радиофизики и компьютерных технологий, которая полностью открыта для разработчиков и имеет API для работы, что позволяет использовать ее для разработки клиентов под любые необходимые платформы.

### Библиографические ссылки

1. Rails Guides [Электронный ресурс]. URL: <https://guides.rubyonrails.org/> (дата обращения: 17.04.2020).
2. Ruby Language Wiki [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ruby> (дата обращения – 20.04.2020).
3. MySQL 8.0 Reference Manual [Электронный ресурс]. URL: <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/> (дата обращения – 19.04.2020).
4. Telegram API docs [Электронный ресурс]. URL: <https://core.telegram.org/bots/> (дата обращения – 19.04.2020).
5. *Russ Olsen*. Eloquent Ruby. Pearson Education, Inc., 2011.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**А. С. Исмаилова, И. Д. Парфимович**

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

*ianast@list.ru; irongrivus@mail.ru*

*науч. рук. – Е. С. Григорчук, ст. преп.*

Методом просвечивающей электронной микроскопии проведены структурные исследования углеродных нанотрубок, синтезированных на различных каталитических системах. Продемонстрировано влияние типа каталитической системы на структурные параметры нанотрубок. Установлено, что за счет озонно-кислородной функционализации происходит удаление аморфных примесей с поверхности углеродных нанотрубок.

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки; электронная микроскопия; озонно-кислородная функционализация.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Характеристики нанокompозитных материалов полимер/углеродные нанотрубки (УНТ) зависят от диспергирования УНТ в матрице и межфазного взаимодействия между УНТ и полимером. Однако, атомы углерода на стенках таких материалов, как УНТ и графен, химически стабильны из-за ароматической природы связи. Как результат, УНТ являются инертными и могут взаимодействовать с матрицей полимера главным образом за счет Ван-дер-Ваальсового взаимодействия, которое неспособно обеспечить устойчивые связи через интерфейс углеродный наноматериал (УНМ)/полимер [1]. Поэтому, значительные усилия должны быть направлены на разработку методов модификации свойств поверхности УНТ, с целью обеспечения сопряжения поверхности данных материалов с полимерными матрицами.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния химической функционализации на структурные параметры углеродных нанотрубок, синтезированных на различных каталитических системах: Ni/MgO и Fe-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Метод получения катализаторов заключался в растворении исходных компонентов (с использованием ультразвука и без него) и термической обработке полученного раствора (разложение/прокаливание). Предварительные исследования показали, что применение ультразвукового воздействия (частотой 22 кГц и мощностью 2 кВт) при получении раствора исходных компонентов Ni/MgO катализатора позволяет повысить его эффективность. Для закрепления результата, полученного при активации раствора предкатализатора ультразвуком, необходимо его подвергнуть термическому разложению в течение 3 минут. Наиболее рациональным временем обработки раствора предкатализатора ультразвуком (объем 50 мл) является 10 с, этого времени активации достаточно для повышения эффективности формируемого катализатора на 20-30 %. Поэтому все металлоксидные катализаторы для реализации данного проекта получали с использованием кратковременного ультразвукового воздействия.

В качестве параметра, характеризующего эффективность полученных катализаторов, был выбран удельный выход углеродного наноструктурного материала, синтезированного на исследуемых каталитических системах. Именно этот показатель позволил судить об активности полученных каталитических систем. Удельный выход нанопродукта ( $\gamma$ ) определяли по формуле:

$$\gamma = (m_2 - m_1) / (m_1 - m_0),$$

где  $m_0$  – масса подложки;  $m_1$  – масса подложки с катализатором;  $m_2$  – масса подложки с катализатором и синтезированными на нем УНТ.

В результате было получено 4 металлоксидных каталитических систем с различным компонентным содержанием. Виды каталитических систем и их характеристики представлены в таблице.

*Таблица*

**Характеристики металлоксидных каталитических систем**

Катализатор	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Эффективность, $\gamma_{\text{угл}}/\gamma_{\text{кат}}$
Ni/0,16MgO	51,9	9,64
Ni/0,3MgO	55,6	11,30
Ni/0,5MgO	60,8	4,90
Fe-Co/2,1Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	79,03	21,2

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изображений, полученных на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ), позволяет сделать вывод о том, что все образцы УНМ состоят из нитевидных структур (показаны на рисунке).

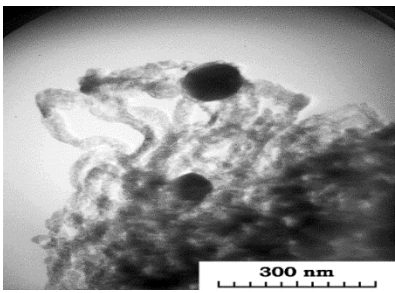
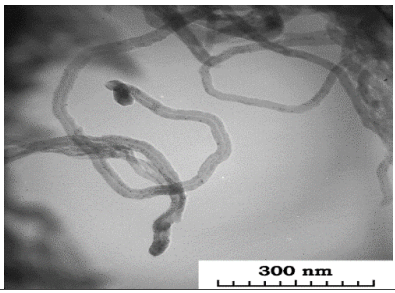
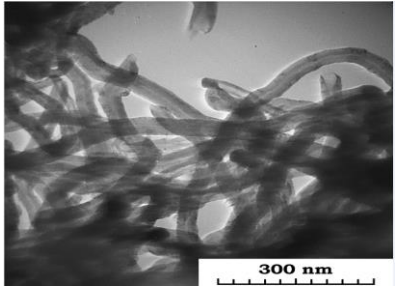
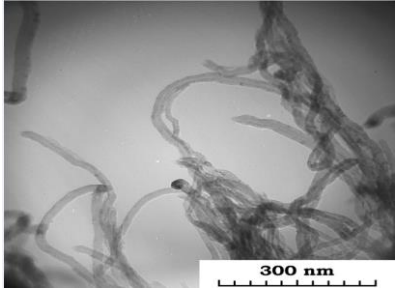
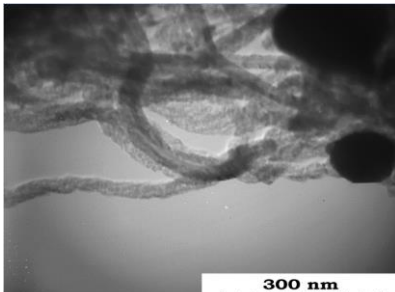
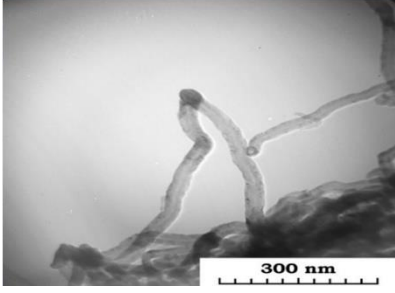
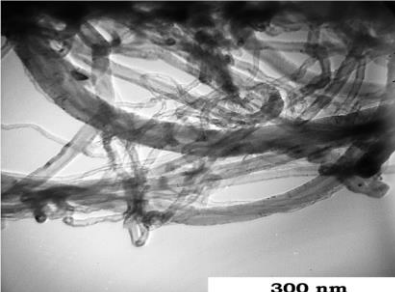
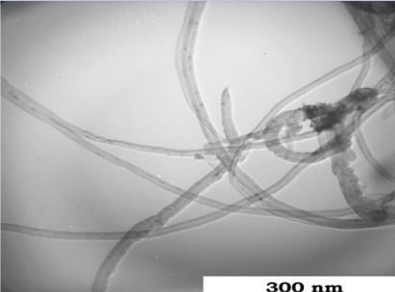
Виды	ПЭМ изображение исходных УНТ	ПЭМ изображение УНТ после окисления озоново-кислородной смесью
$\text{Ni}_{0.3}\text{MgO}$		
$\text{Ni}_{0.5}\text{MgO}$		
$\text{Ni}_{0.16}\text{MgO}$		
$\text{Fe-Co}_{2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$		

Рис. 1. ПЭМ микрофотографии образцов УНТ, синтезированных на различных каталитических системах

Более четкую морфологию имеют структуры, синтезированные на  $\text{Ni}/_{0,3}\text{MgO}$  и  $\text{Ni}/_{0,16}\text{MgO}$  катализаторах. Углеродные нитевидные образования, синтезированные на  $\text{Ni}/_{0,16}\text{MgO}$  и  $\text{Ni}/_{0,3}\text{MgO}$  катализаторах, имеют диаметр  $\sim 30\div 60$  нм. В образцах, полученных на  $\text{Ni}/_{0,3}\text{MgO}$  и  $\text{Ni}/_{0,5}\text{MgO}$  каталитической системе, помимо нитевидных образований присутствует много непрореагировавшего катализатора.

Синтезированные на  $\text{Fe-Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$  катализаторах УНМ представляют собой нитевидные образования диаметром  $\sim 30$  нм. Для данных УНМ также можно отметить закапсулированное состояние металлических частиц катализатора.

Необходимо, однако, отметить, что ПЭМ-изображения окисленных УНТ выглядят более четкими, что, возможно, обусловлено удалением примесей аморфного материала при данном типе химической обработки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

За счет подбора катализаторов были синтезированы серии углеродных нанотрубок с различными геометрическими параметрами для дальнейшего изучения влияния синтезированных массивов УНТ на электропроводящие и структурные характеристики композитных материалов на их основе.

Работа выполнена в лаборатории элионики Научно-исследовательского института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко совместно с коллегами из Тамбовского государственного технологического университета.

## **Библиографические ссылки**

1. *P. C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, J. K. Kim* Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review // *Composite: Part A*. 2010. Vol. 41. P. 1345 – 1367.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОГРАММЕ VISUAL SPACE

А. Г. Кезик

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*wiren469@gmail.com;*

*науч. рук. – А. А. Спиридонов, ст. преп.*

Разработано программное обеспечение «VisualSpace». Оно позволяет моделировать с различными временными масштабами орбитальное движение космических аппаратов вокруг выбранной планеты Солнечной системы на основе начального вектора состояния; орбитальное движение космических аппаратов вокруг Земли на основе усредненных орбитальных параметров в формате TLE; орбитальное движение планет Солнечной системы на основе аналитической модели VSOP87. Моделирование производится в трехмерном пространстве, что позволяет наглядно демонстрировать эволюцию орбит со временем.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, орбитальное движение, космический объект.

Моделирование орбитального движения космических объектов является необходимым как для решения задач проектной баллистики, так и планирования операций управления космическим аппаратом. Для космических аппаратов это позволяет запланировать сеансы управления и связи, организовать научные эксперименты, решать множество прикладных задач. Программа «VisualSpace» позволяет моделировать в режимах реального времени и производить симуляцию с различными временными масштабами орбитальное движение объектов Солнечной системы с обширной базой данных малых тел; орбитальное движение космических аппаратов вокруг выбранной планеты Солнечной системы на основе начального вектора состояния; орбитальное движение космических аппаратов вокруг Земли на основе начального вектора состояния или усредненных орбитальных параметров в формате TLE; параметры слежения наземных станций и параметры принимаемых сигналов выбранного космического аппарата; сценарии совместной работы сети наземных станций приема [1].

Разработанное нами программное обеспечение (ПО) «VisualSpace» позволяет проводить расчеты: орбитальных параметров движения космических аппаратов в геоцентрических (планетоцентрических), орбитальных, топоцентрических системах координат (СК); стандартной баллистической информации для заданного пункта наблюдения с возможностью выбора параметров пролета.

Моделирование производится в трехмерном пространстве, что позволяет наглядно демонстрировать эволюцию орбит со временем. Кроме

околоземного пространства возможно перемещение в границах солнечной системы, а в перспективе и в куда больших масштабах. Движение околоземных космических объектов рассчитывается по модели SGP4. ПО «VisualSpace» позволяет загружать TLE космических объектов из текстового файла. При этом составляется список доступных для моделирования объектов, как показано на рис. 1.

**OBJECTS DATABASE**

SGP OBJECTS

1 Search... 2 OBJECTS: 113 ALL+

Title	Period	Ecc	Inc	LAN	AOP	TLE Epoch
CUTE-1 (CO-55) +	101,2492	0,0009519	98,6834	127,4842	194,7166	28.04.2020 23:45:59
CUBESAT XI-IV (... +	101,2786	0,0009160	98,6904	128,0483	207,4470	29.04.2020 0:03:16
CUBESAT XI-V +	98,3767	0,0018176	98,0014	256,8909	80,9305	29.04.2020 2:28:02
3 CUTE-1.7+APD II... +	96,7446	0,0011686	97,5713	109,6737	303,3477	29.04.2020 10:49:19
AAUSAT-II +	96,3196	0,0010560	97,4927	126,1775	217,3668	29.04.2020 10:57:05
DELFI-C3 (DO-64) +	95,5143	0,0013600	97,4232	163,7096	124,5275	29.04.2020 3:50:08
SEEDS II (CO-66) +	96,5779	0,0011663	97,5403	115,3198	271,4827	28.04.2020 22:25:07
SWISSCUBE +	98,8752	0,0006359	98,6095	300,1567	282,2625	29.04.2020 11:25:08

cubesat.txt

Рис. 1. Загрузка орбитальных параметров в TLE формате:

1 – поиск по названию или номеру в каталоге; 2 – сортировка по орбитальным параметрам; 3 – список объектов загруженных из текстового файла с TLE

В данном списке также доступна возможность сортировки по орбитальным параметрам, а также поиск по названию и номеру в каталоге NORAD. При нажатии кнопки + объект добавляется на трехмерную сцену, где моделируется его движение. Реализована возможность подключения к базе данных для удобной загрузки необходимых TLE с сайта <https://www.space-track.org/>.

Графический интерфейс пользователя «VisualSpace» включает в себя панель симуляции времени, информационные панели, различные меню, предоставляющие функционал для работы с космическими аппаратами, и база активных объектов, как показано на рис. 2.

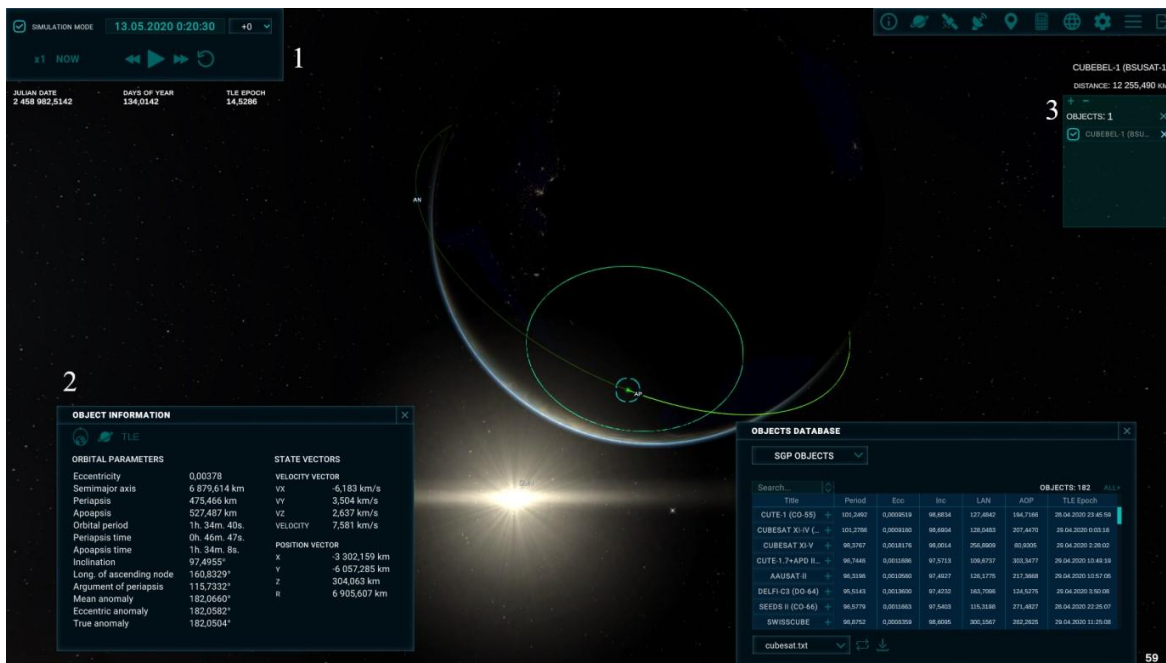


Рис. 2. Элементы графического интерфейса пользователя ПО «VisualSpace»: 1 - панель симуляции времени; 2 - информационная панель; 3 - база активных объектов

Помимо наблюдения движения в трехмерном пространстве также присутствует возможность наблюдать положение объекта над поверхностью Земли с визуализацией трассы и радиуса видимости на двумерной карте. По умолчанию время в программе привязано к системному времени компьютера и протекает в нормальном темпе. Однако есть возможность ручного перематывания времени. В режиме симуляции возможно ускорять, останавливать и обращать течение времени. Реализована возможность изменения часового пояса.

В «VisualSpace» реализована аналитическая модель движения восьми основных планет Солнечной системы VSOP87 (рис. 3). Используются две разновидности этой модели: VSOP87a и VSOP87c. По первой рассчитываются орбитальные параметры планеты, а по второй – гелиоцентрические координаты. VSOP87 гарантирует для Меркурия, Венеры, барицентра Земля-Луна и Марса точность в одну угловую секунду в течение 4000 лет до и после эпохи J2000. Та же точность обеспечивается для Юпитера и Сатурна за 2000 лет и для Урана и Нептуна за 6000 лет до и после J2000.

Точная модель движения Луны позволяет предсказывать солнечные и лунные затмения и учитывать возмущения, оказываемые Луной на космические аппараты. Также в программе используется обширная база данных малых тел, включающая в себя все известные астероиды и малые планеты.

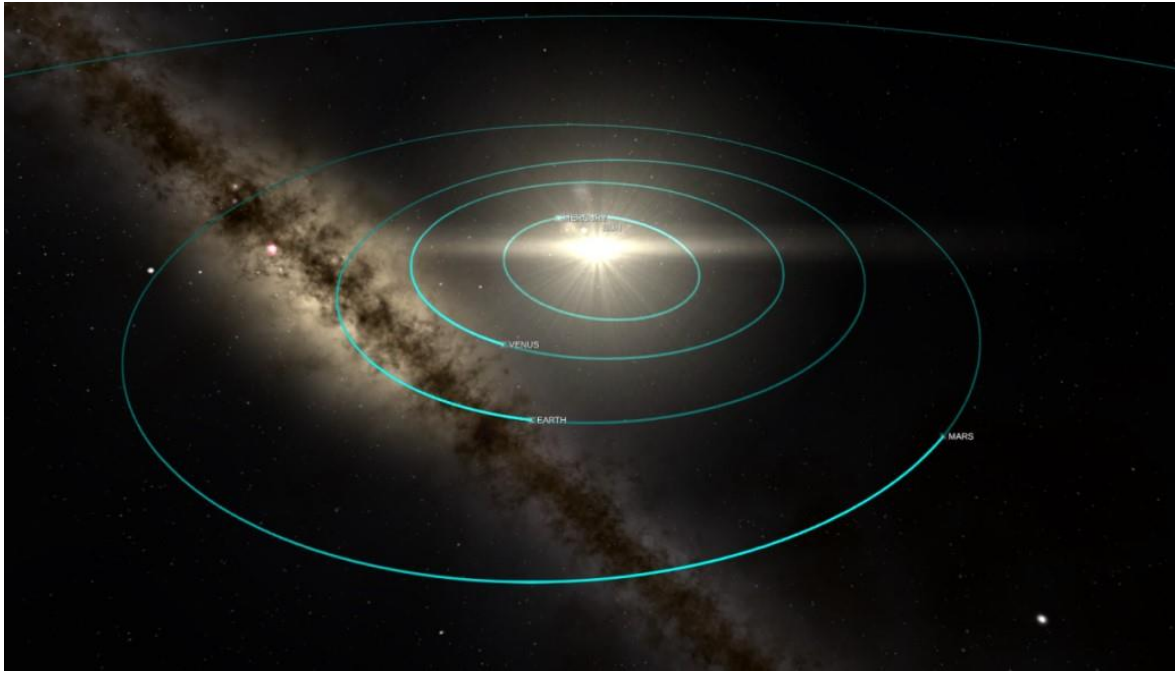


Рис. 3. Модель Солнечной системы

В «VisualSpace» совмещены функциональные возможности трехмерных планетариев (например, Celestia и Space Engine) и программ для наблюдения за околоземными спутниками (Heavensat, Previsat, Orbitron). Программное обеспечение «VisualSpace» используется в рамках проекта «Разработка и создание научно-образовательной сети приема и обработки информации с образовательных космических аппаратов» Национальной Космической Программы Республики Беларусь для визуализации системы наземных станций и начального экспресс-анализа параметров слежения и радиосигналов выбранного малого космического аппарата.

#### **Библиографические ссылки**

1. Моделирование совместной работы сети наземных станций приема телеметрии малых космических аппаратов / А.Г. Кезик, А.А. Спиридонов // Электроника плюс. 2019. № 3. С. 58–62.

# РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬ- НОГО АППАРАТА

**Е. В. Козинская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*kozinskaya\_katya@mail.ru;*

*науч. рук. – А. А. Спиридонов, ст. преп.*

В данной работе был разработан модуль мониторинга чрезвычайных ситуаций, состояния природных и сельскохозяйственных объектов для беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Advanced. В качестве отладочного комплекса была выбрана одна из самых популярных плат с открытым программным кодом – Arduino Uno. Компоненты модуля подбирались таким образом, чтобы с их помощью можно было оценить общую картину состояния окружающей среды: температуру, влажность, освещенность, степень загрязнения газами, пылью и радиацией, повышение уровня шума. Была разработана система приёма-передачи, хранения и обработки полученных данных. Модуль успешно прошел тестовые испытания.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; модуль мониторинга; состояние окружающей среды.

Уже несколько десятилетий учёные бьют тревогу по поводу приближающейся экологической катастрофы. С каждым годом проблема загрязнения окружающей среды становится всё более актуальной из-за роста количества выбросов в атмосферу токсичных паров, твёрдых частиц и излучения. Это приводит к глобальным изменениям климата, что негативно влияет на биосферу. С помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) отслеживание состояния окружающей среды становится простым и доступным в масштабах города и страны.

Основной угрозой при возникновении чрезвычайных, аварийных и пожароопасных ситуаций на природных и сельскохозяйственных объектах является загрязнение окружающей среды с возникновением пожаров и угрозой для жизни людей, а также с большим экономическим ущербом вследствие потерь продукта и нарушения непрерывного производственного процесса. Чтобы ликвидировать последствия и минимизировать ущерб чрезвычайных ситуаций, крайне необходимы своевременные и достоверные данные о развитии подобных ситуаций. Основным направлением совершенствования системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в состояниях природных и сельскохозяйственных объектов является внедрение систем мониторинга. Беспилотные авиационные комплексы имеют явное преимущество перед другими способами в ситуациях, когда требуется оперативность. Сокращение общего времени реагирования связано с тем, что не требуется развертывания обеспечивающих

средств, которые необходимы при применении других способов. Они позволяют выявить чрезвычайную ситуацию, провести объективную оценку ситуации и незамедлительно её ликвидировать. Поэтому работа в области разработки архитектуры построения и методов аэроэкологического мониторинга чрезвычайных ситуаций, состояния природных и сельскохозяйственных объектов является актуальной.

При разработке модуля мониторинга на основе коммерческих датчиков подбирались такие компоненты, с помощью которых можно было бы оценить общую картину состояния окружающей среды: температуру, влажность, освещенность, степень загрязнения газами, пылью и радиацией, повышение уровня шума.

Существует множество микроконтроллеров и платформ для осуществления «physical computing»: Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard и многие другие. Однако в качестве отладочного комплекса была выбрана одна из самых популярных плат с открытым программным кодом семейства Arduino – Arduino Uno на базе микроконтроллера ATmega328. Эта плата обладает рядом преимуществ перед другими, схожими по функционалу устройствами: относительно низкая стоимость, кросс-платформенность, простая и понятная среда программирования. Для удобства работы с Arduino существует бесплатная официальная среда программирования Arduino IDE, работающая под Windows, Mac OS и Linux. Работа возможна также через Visual Studio, Eclipse, другие IDE или командную строку.

Для сборки модуля мониторинга окружающей среды были подобраны датчики, совместимые с платформой Arduino:

- Счетчик Гейгера J305 – основной сенсор для измерения радиации. Он регистрирует альфа-, бета-, гамма-излучение и рентгеновские лучи. Обладает самой высокой чувствительностью в сравнении с другими способами регистрации радиации, например, ионизационными камерами. Диапазон измеряемых значений – от 2 мкР/ч до 120мР/ч.

- Модуль датчика температуры и влажности DHT-22, состоящий из чувствительного ёмкостного датчика и NTC-термистора. Датчик достаточно точный, погрешность измерений составляет  $\pm 2\%$ . Фиксируемый диапазон значений: влажность — 0~100%; температура – от -40 до 80 °С.

- Датчик газа MQ-6 предназначен для контроля концентрации изобутана, бутана и сжиженных углеводородных газов в диапазоне от 200 до 10000 ppmv (ppmv – миллионная доля исследуемых газов в расчете на один кубометр воздуха). Отличается высокой скоростью реагирования и повышенной чувствительностью в широком диапазоне концентраций.

- Сенсор освещенности GY-30 представляет собой люксметр для определения освещенности с широким диапазоном измерений – от 0 до 65535 лк.

- Датчик пыли DSM-501 предназначен для определения чистоты воздуха и детектирует количества пылевых или дымовых частиц в диапазоне от 0 до 250 мкг/м<sup>3</sup>. Он позволяет обнаружить частицы пыли размером от 2,5 мкм.

- Датчик удара и вибрации 801S используется для определения внешних вибрационных воздействий. Основа датчика вибрации – гибкая металлическая пружинка, внутри пластиковой трубки, которая колеблется от любых воздействий на неё. Диапазон величин – от 0 до 250 мм/с.

- Модуль положения GY-521, включающий в себя гироскоп для измерения линейных ускорений и акселерометр – угловых скоростей. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определить движение тела в трехмерном пространстве. Программируемый диапазон значений: для гироскопа –  $\pm 2000^\circ/\text{сек}$ , акселерометра –  $\pm 155 \text{ м/с}^2$ ).

Передача информации происходит с помощью приёмо-передатчиков HC-12. Этот модуль работает как беспроводной удлинитель UART и не вносит каких-либо изменений в передачу информации, рабочая частота— 433,4–473,0 МГц, мощность передатчика – до 100 мВт, дальность передачи информации – до 1000-1800 м на открытом пространстве в зависимости от режима работы.

Для модуля был использован шилд Data Logging Shield v.1.0, предназначенный для синхронизированной записи информации, ее хранения и считывания на внешний носитель информации – SD-карту.

Модуль имеет автономный от дрона источник питания – Power Bank. На его плате установлен литий-ионный аккумулятор ёмкостью 2000 мА·ч, а также встроена защита от перегрузки – если ток превысит 900 мА, срабатывает контур предохранителя и устройство выключится. Система способна работать более двух суток, используя данный Power Bank.

Разработанный модуль мониторинга состояния окружающей среды на основе коммерческих датчиков был протестирован с помощью беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Advanced, продемонстрировав свою работоспособность. Дрон способен поднимать небольшой полезный груз без существенных изменений своих летных характеристик. Ёмкости его аккумулятора хватит, чтобы непрерывно проводить аэроэкологический мониторинг в течение получаса. Ниже приведены данные, полученные с помощью датчиков (см. рисунок):

```
Humidity = 26.00 %
Temperature = 17.50 °C
Gas_sensor = 232 ppmv
Vibration_sensor = 45 mm/s
Illumination = 700 lx
Radiation = 12 µR/h
Dust_coefficient = 52.35 µg/s^3
Accelerometer  aX = 56   | aY = -65 | aZ = 12   m/s^2
Gyroscope      gX = -163 | gY = -43 | gZ = -387 °/s
```

*Рис. 1.* Результат работы разработанного модуля мониторинга окружающей среды

На данный момент в мире создано достаточно большое количество аналогичных систем, поэтому главным преимуществом данного модуля станет его бюджетность, мобильность, легкость в эксплуатации и обслуживании. Эта система работает автономно от беспилотника, что дает возможность использовать её для любого другого летательного аппарата, а также проводить измерения в стационарном состоянии. Кроме этого, при появлении на рынке новых модулей, можно обновлять данную систему не меняя платформу.

DJI Phantom 4 Advanced, с помощью которого проводился мониторинг, способен осуществлять полет в небольшой дождь, также относительно устойчив к радиационному загрязнению, есть опыт применения его в Чернобыльской зоне отчуждения. Однако сильное радиационное воздействие негативно сказывается на нем и на работе большинства датчиков разработанного модуля; возможно обнаружение данной чрезвычайной ситуации, но не длительный ее мониторинг.

Таким образом, использование беспилотного летательного аппарата, в качестве полезной нагрузки которого выступают камера высокого разрешения и система датчиков мониторинга, позволяет оперативно измерить параметры среды, а это помогает своевременно ликвидировать чрезвычайную ситуацию и снизить риск дальнейшего загрязнения окружающей среды.

#### **Библиографические ссылки**

1. *Н.Н. Зосимович.* Беспилотники для экологического мониторинга // LAP LAMBERT Academic Publishing 2013
2. *В.С. Фетисов.* Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние // Уфа: ФОТОН, 2014



# ЭФФЕКТИВНЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

**М. Н. Кольчевская, И. Д. Парфимович, Н. А. Савкин**

*Белорусский государственный университет, г. Минск  
kolchevskaya.mary@gmail.com; paraan23@gmail.com  
науч. рук. – Ф. Ф. Комаров, Е. С. Григорчук, ст. преп.*

Существует большое разнообразие электронных устройств, излучающих в процессе своего функционирования в окружающее пространство электромагнитные волны в широком частотном диапазоне. В результате высокий уровень избыточного излучения приводит к электромагнитному загрязнению окружающей среды, которое может негативно сказываться как на биологических объектах, так и на корректной работе электронных приборов [1]. С целью устранения влияния фонового электромагнитного излучения (ЭМИ) разработан новый тип пирамидального радиопоглощающего материала (РПМ) на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), применимого в так называемых радиочастотных безэховых камерах (БЭК).

**Ключевые слова:** многостенные углеродные нанотрубки, эпоксидный полимер, композитный материал, электромагнитное излучение, экранирование.

Целью работы было определение основных параметров, обеспечивающих значительное поглощение ЭМИ, и изготовление радиопоглощающего композитного материала. В стандартной технологии изготовления поглотителей БЭК используются профилированные пенополиуретановые заготовки, которые пропитываются специальным составом, содержащим частицы углерода, либо смесь частиц углерода и феррита. Однако для достижения требуемого уровня ослабления электромагнитных помех необходимо большое количество наполнителя - не менее 60 вес.%, что сказывается на ухудшении механических характеристик материала и его долговечности. Использование МУНТ позволяет уменьшить концентрацию наполнителя для достижения эффективных поглощающих характеристик и, следовательно, позволит сохранить механические свойства исходной полимерной матрицы.

Методика изготовления радиопоглощающего композитного материала происходила в 3 этапа: выбор типа и изготовление наполнителя; определение геометрических параметров радиопоглощающего композита; создание на основе данных первых двух этапов пирамидальных РПМ (рис. 1) и их анализ.

На первом этапе основное внимание было направлено на выбор наилучших для данной работы углеродных нанотрубок (УНТ) и разработку методов модификации их свойств поверхности.

В качестве объектов исследования выступали композитные материалы на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭД-20 с нанотрубками типа «Таунит-МД», выбранными за счет их большей протяженности (20 мкм) и меньшей запутанности по отношению к остальным видам [2]. Разработка эффективных методик диспергирования позволяет достичь высоких показателей при низких концентрациях наполнителя. По результатам исследований, смешивание МУНТ с полимером происходило за счет сфокусированного ультразвукового воздействия с добавлением поверхностно активных веществ [3], данный метод обеспечивает качественное сопряжение поверхности УНТ с полимерными матрицами.



*Рис. 1. Фото пирамидального радиопоглощающего композитного материала на основе пенополиуретана, акрилового сополимера и углеродных нанотрубок «Таунит-МД»*

На втором этапе определялись параметры, дающие наилучший результат поглощения. Ключевое влияние на характер взаимодействия ЭМИ с пирамидальными РПМ оказывает их геометрия: высота пирамид и угол при вершине пирамиды. При высоте пирамиды 7 см, используемой в данной работе, минимальная рабочая частота составляет 1 ГГц:

$$h = \frac{\lambda}{4}, f = \frac{c}{\lambda} = 1 \text{ ГГц} \quad (1)$$

Расчет количества переотражений осуществлялся по приближенному методу геометрической оптики, изображенному на рис. 2 [4]. Перемещение луча в полости РПМ описывается:

$$h_n = 2(H - \sum_{i=1}^n h_{i-1}) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} / (\operatorname{tg} \theta_{n-1} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}), \quad (2)$$

где

$$\theta_{n-1} = \alpha(n-1) + \theta \quad (3)$$

Условие выхода луча из поглощающей полости и определение количества переотражений:

$$\sum_{i=1}^{N+1} h_n < 0 \quad (4)$$

Выбраны следующие параметры пирамидальных РПМ: высота 7 см, длина основания пирамиды 3 см, угол при вершине  $23^{\circ}40'8,37''$ . Расчетное количество переотражений для углов падения  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  составили соответственно 8, 7, 6 и 4.

На третьем этапе формировался радиопоглощающий материал за счет пропитки пенополиуретановой заготовки композитной суспензией, изготовленной на первом этапе. Соотношение компонент в суспензии составило: 7 массовых частей воды, 1 массовая часть акрилового сополимера, 100 ммоль функциональных веществ, 5 масс.% УНТ в сухом остатке (при испарении воды).

Анализ представленных на рисунке 3 результатов частотной зависимости коэффициента отражения ЭМИ позволяет сделать вывод о том, что демонстрируемая пирамидальным РПМ характеристика отраженного ЭМИ сигнала близка по своим значениям аналогичной характеристике свободного пространства. При этом, по сравнению со свободным пространством, отмечается небольшое ослабление (3-4 дБ) коэффициента отражения.

Таким образом, на основе сформированного в работе материала могут быть изготовлены элементы безэховой камеры с рабочим диапазоном от 2 до 40 ГГц. Эффективность работы в диапазоне 2 – 15 ГГц подтверждается расчетными значениями коэффициента отражения от материала на металлической пластине – обеспечение, как минимум, -10 дБ при однократном отражении. Экспериментальные измерения готового РПМ проводились в диапазоне частот 15 – 40 ГГц. За счет выбранной геометрии пирамидального РПМ, на частотах от 1 ГГц обеспечивается, как минимум, 8 переотражений, что приводит к ослаблению сигнала на 40 – 50 дБ.

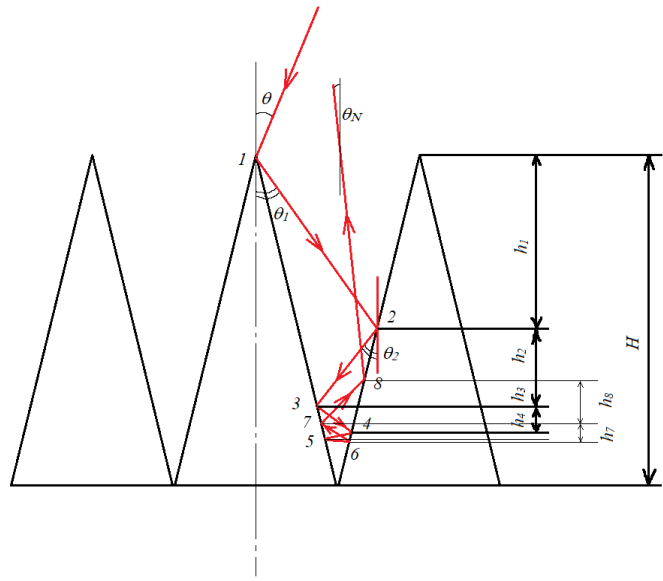


Рис. 2. Расчет переотражений в полости пирамидальных РПМ рассеивающего типа

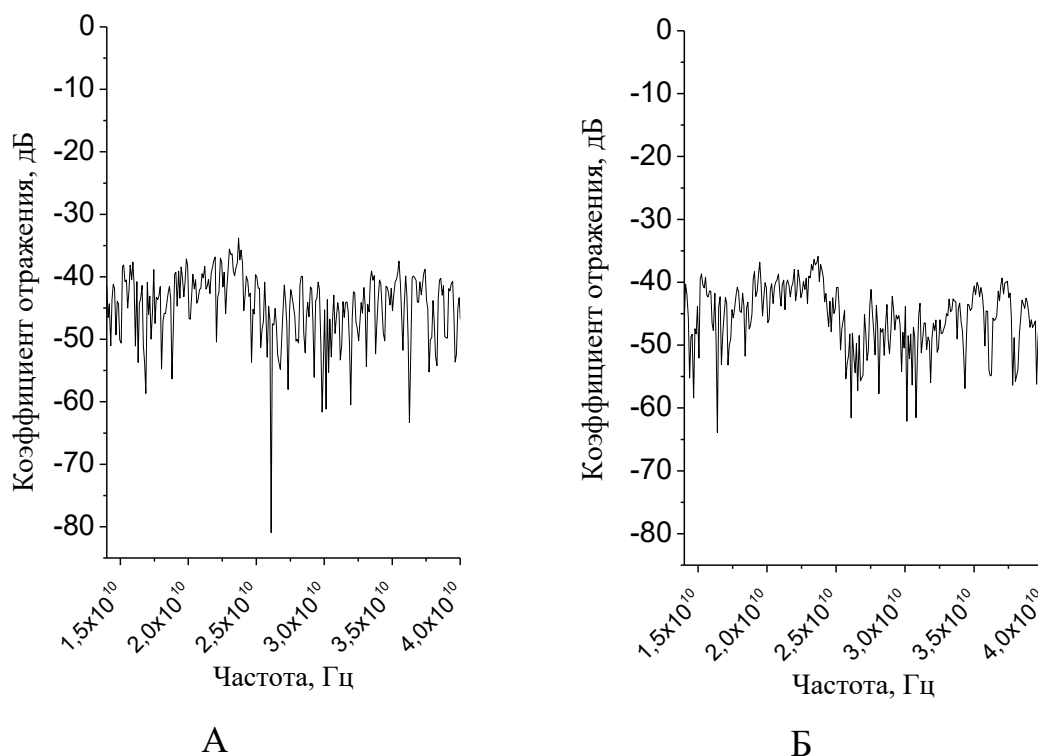


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения для: А – свободного пространства, Б – пирамидального радиопоглощающего материала

#### Библиографические ссылки

1. Clayton R.P. Introduction to Electromagnetic Compatibility. New Jersey: published by John Wiley & Sons, 2006. 1013 p.
2. Bai J.B., Allaoui A. Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites – experimental investigation // Compos A. 2003. Vol. 34, No. 8. P. 689 – 694.
3. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // Polymers. 2012. Vol. 4, No. 1. P. 275-295.
4. Мицмахер М.Ю., Торганов В.А. Безэховые камеры СВЧ. – Москва: Радио и связь, 1982. – 128 с.

# ВЕРИФИКАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**В. В. Корнелюк**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*vlad.kornelyuk@mail.ru;*

*науч. рук. – С. В. Василенко, ассистент*

В данной работе произведена процедура верификации программной реализации модели магнитного поля Земли путём точечного сравнения её показаний с показаниями онлайн-калькулятора геомагнитного поля, размещённого на сайте Британской геологической службы. В качестве модели геомагнитного поля использовалась Всемирная магнитная модель (WMM). Кроме того, проанализирована зависимость точности и вычислительной сложности задачи расчёта геомагнитного поля от количества используемых коэффициентов модели WMM. Найдено оптимальное по соотношению «точность – время расчёта» количество коэффициентов при использовании модели в составе подсистемы ориентации наноспутника.

**Ключевые слова:** магнитное поле Земли; модель геомагнитного поля; World Magnetic Model (WMM); International Geomagnetic Reference Field (IGRF); верификация; система ориентации наноспутника.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, планета Земля обладает собственным магнитным полем, источником которого является жидкое вещество ядра планеты, а также намагниченные породы земной коры. Посредством наземных и орбитальных геофизических наблюдений были составлены аналитические модели магнитного поля Земли, которые отличаются по точности и сложности расчёта, среди них модели прямого и наклонного диполей, IGRF, WMM, осреднённая и др. Модель магнитного поля Земли позволяет определить вектор магнитного поля в любой точке околоземного пространства.

Модели геомагнитного поля используются в задачах навигации воздушных и водных судов, ориентации космических аппаратов (КА), лабораторной симуляции магнитного поля Земли при разработке КА и др. Такие важные применения выдвигают повышенные требования к точности и надёжности математических моделей и программного обеспечения. Вот почему перед использованием программной реализации той или иной математической модели необходимо проверить правильность её работы, т. е. верифицировать.

Одним из возможных вариантов применения данной модели является задача определения ориентации наноспутника относительно Земли по показаниям бортового магнитометра. Наноспутники формата CubeSat имеют размеры порядка  $10\text{ см}^3$ , ограниченный энергобюджет и, как

следствие, скромные вычислительные мощности бортовых процессоров. Данный факт заставляет разработчиков искать возможности снижения вычислительной сложности решаемых задач.

В данной работе описана процедура верификации программной реализации Всемирной магнитной модели (WMM) [1], а также обоснована возможность снижения вычислительной сложности задачи без снижения общей точности определения ориентации. WMM – это популярная, регулярно обновляющаяся и очень точная модель геомагнитного поля. Её реализация была взята с официального сайта организации «Национальные центры информации об окружающей среде», США [2].

## ВЕРИФИКАЦИЯ

Исходный программный код, реализующий модель магнитного поля Земли, был взят с официального сайта организации «Национальные центры информации об окружающей среде» (США) [2] и использовался в качестве проверяемого образца. Данная реализация сравнивалась с онлайн-калькулятором геомагнитного поля, размещённого на официальном сайте Британской геологической службы [3]. В качестве входных данных для процедуры верификации использовалось около 28000 точек, равномерно распределённых по орбите наноспутника BSUSAT-1. Результаты сравнения представлены на рис. 1.

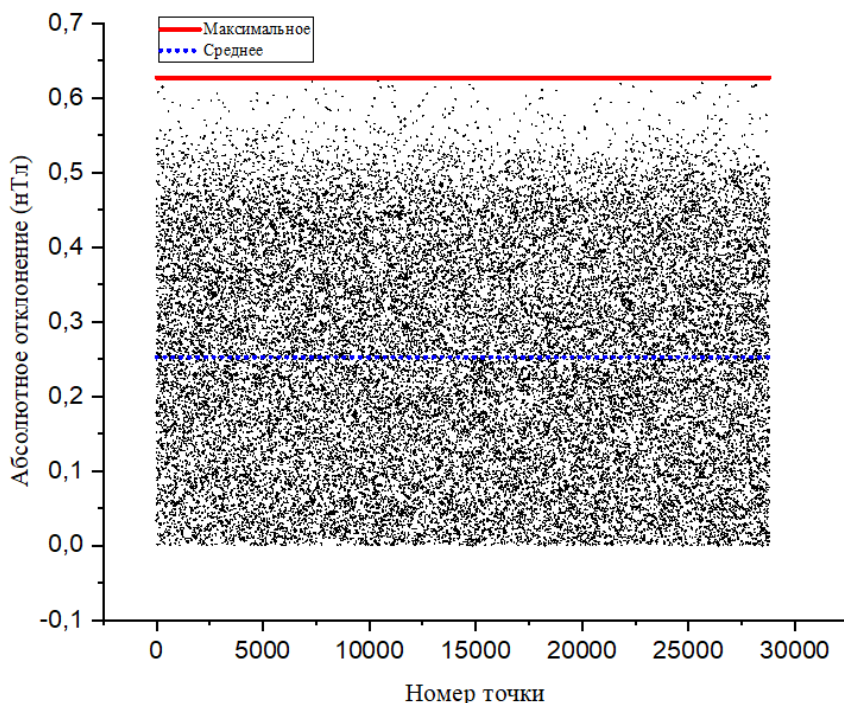


Рис. 1. Абсолютное отклонение верифицируемой реализации от онлайн-калькулятора

Как видно из рис. 1, верифицируемая реализация хорошо согласуется с онлайн-калькулятором сайта [3] и абсолютное отклонение не превосходит величину 1 нТл.

### СНИЖЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ЗАДАЧИ

В модели WMM [1] магнитное поле Земли аппроксимируется сферическими гармоническими функциями – нормализованными по Шмидту присоединёнными полиномами Лежандра до степени и порядка 12 включительно. Модель содержит 168 коэффициентов Гаусса, определяющих магнитное поле на начало эпохи 2020.0, а также 168 коэффициентов, отвечающих за изменение магнитного поля во времени в течении пятилетней эпохи до 2025.0. Каждая уникальная комбинация степени  $n$  и порядка  $m$  ( $m \leq n$ ,  $0 < n \leq 12$ ) сферической гармоники имеет свой набор коэффициентов. Всего таких наборов – 90.

Был произведён вычислительный эксперимент для определения зависимости времени и ошибки расчёта магнитного поля от числа используемых наборов коэффициентов. В качестве входных данных использовалось 68000 точек орбиты спутника BSUSAT-1. Число наборов коэффициентов изменялось от 1 до 90.

Результаты эксперимента показаны на рис. 2 и 3.

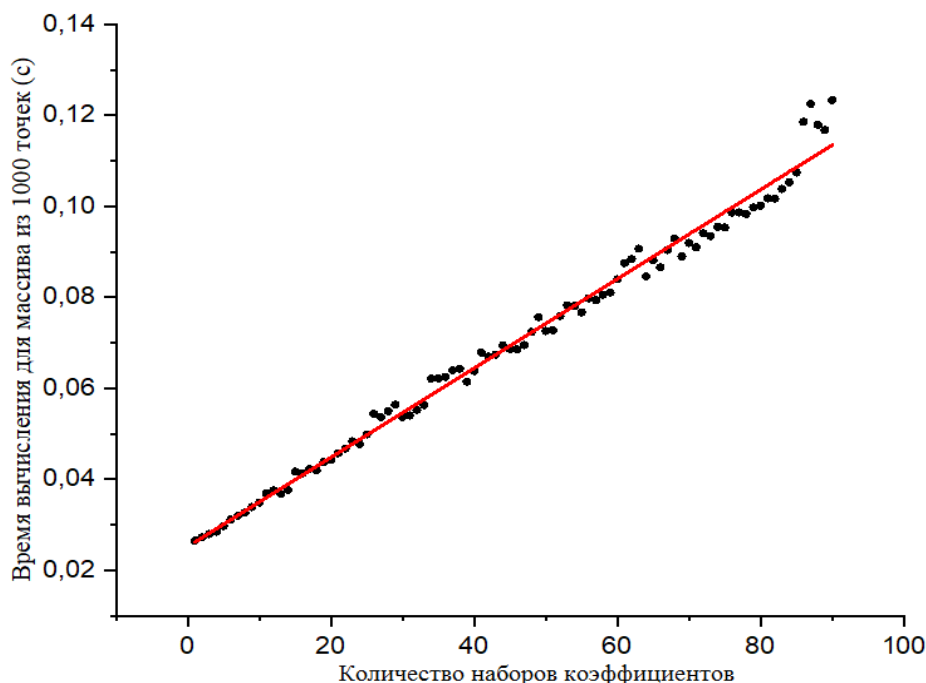


Рис. 2. Зависимость времени вычислений от количества коэффициентов модели WMM. Вычисления проводились на процессоре Intel Core i5-8300H

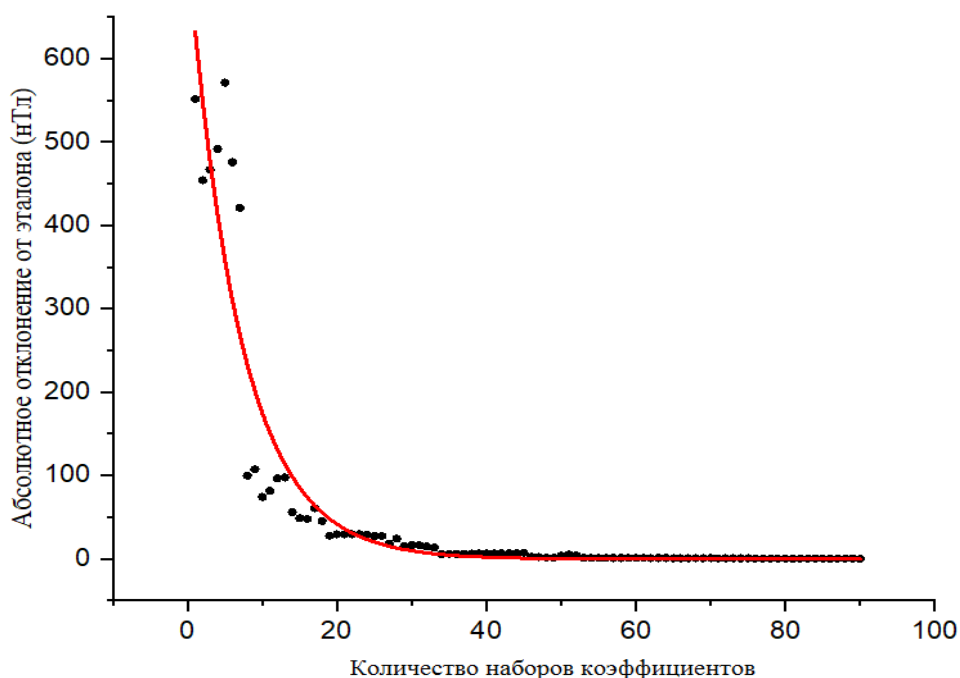


Рис. 3. Зависимость усреднённого абсолютного отклонения от количества наборов коэффициентов

В эксперименте по определению ошибки расчёта за точное значение магнитного поля принималось значение при полном наборе коэффициентов модели.

Из результатов исследования следует, что в системе определения ориентации наноспутника по магнитному полю допустимо использовать реализацию модели WMM с количеством наборов коэффициентов в 10-15, при котором ошибка составляет около 100 нТл, что соответствует точности бортовых MEMS-магнитометров [4]. Это позволит уменьшить время расчёта магнитного поля примерно в 3 раза.

#### Библиографически ссылки

1. World Magnetic Model 2020. Report. [Electronic resource]. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020\\_Report.pdf](https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020_Report.pdf) (date of access: 24.05.2020).
2. Страница на сайте организации «Национальные центры экологической информации США» [Electronic resource]. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml#downloads> (date of access: 20.05.2020).
3. Онлайн-калькулятор геомагнитного поля на сайте организации «Британская геологическая служба» [Electronic resource]. URL: [http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/models\\_compass/wmm\\_calc.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html) (date of access: 20.05.2020).
4. LSM9DS, iNEMO inertial module, 3D magnetometer, 3D accelerometer, 3D gyroscope. [Electronic resource]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds1.pdf> (date of access: 24.05.2020).



# ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛИЦА ПО ФОТОГРАФИЯМ

**М. Н. Курочкин**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*mak7kurochkin@gmail.com;*

*науч. рук. – Е. А. Головатая, ст. преп.*

В наше время трехмерные технологии стали весьма востребованы в самых разных областях деятельности. 3D-моделирование является неотъемлемой частью таких сфер, как наука, промышленность, медицина, кинематограф и т. д. В ближайшее десятилетие ожидается стремительное развитие в области трехмерной реконструкции и распознавания. На основе алгоритма трехмерной реконструкции PRNet и алгоритма детектирования лиц MTCNN было разработано программное средство, позволяющее построить трехмерные модели всех лиц на изображении, а также реализовано веб-приложение, построенное на основе разработанной программы. Разработанное программное средство может быть использовано в целях автоматизации процесса построения трехмерных изображений лиц по одной фотографии, что позволяет сократить затрачиваемое время для перевода изображений из двумерного пространства в трехмерное.

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование лица; распознавание лица на фотографии.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

### Детектирование лица на изображении с помощью алгоритма MTCNN

Обнаружение лица и выравнивание имеют важное значение для многих задач, таких как распознавание лица и анализ выражения лица. Тем не менее, различные визуальные вариации лица, такие как окклюзии, позы и экстремальное освещение, создают большие проблемы для этих задач в реальных приложениях.

В алгоритме MTCNN предлагается новая структура с использованием унифицированных каскадных сверточных нейронных сетей (CNN) посредством многозадачного обучения. Предлагаемая структура состоит из трех этапов. На первом этапе создаются окна-кандидаты через неглубокую сеть CNN. Затем происходит уточнение окна, чтобы отклонить большое количество окон, не содержащих лицо, через более сложную CNN. Наконец, используется более мощная CNN для уточнения результата и вывода лицевых ориентиров. Благодаря этой многозадачной структуре обучения производительность алгоритма может быть заметно улучшена [1, с. 3].

## **Внедрение алгоритма PRNet для трехмерной реконструкции лица**

На сегодняшний день существует множество подходов к трехмерной реконструкции лиц. Наибольшее распространение получил метод, называемый регрессионной карточной сетью (PRN), для совместного прогнозирования плотного выравнивания и восстановления трехмерной формы лица. Данный метод превосходит предыдущие работы по 3D выравниванию лица и реконструкции на нескольких наборах данных. Между тем, метод имеет несложную структуру. Все это достигается благодаря тщательно продуманному дизайну двумерного представления трехмерной структуры лица и соответствующей функции ошибки. В частности, происходит проектирование UV-карты положения, которая представляет собой 2D-изображение, записывающее 3D-координаты полного лицевого облака точек, и в то же время сохраняет смысловую нагрузку каждой точки UV-карты. Затем обучается простая сеть «кодер-декодер» с взвешенными потерями, которая больше фокусируется на дискриминативной области, чтобы произвести регрессию UV-карты положения из одного 2D-изображения лица [2, с. 5].

По сравнению с предыдущими работами метод может напрямую установить плотное соответствие между всеми регионами лица и 3D-шаблона. В методе не требуется никаких промежуточных параметров, что означает, что сеть может работать очень быстро, минуя сложные операции.

Большинство алгоритмов трехмерной реконструкции лиц требуют подачи на вход одной фотографии, где изображено только одно лицо. Если необходимо построить модели некоторого множества лиц, то, во-первых, нужна фотография каждого лица по отдельности, во-вторых, для каждой фотографии придется снова и снова запускать алгоритм реконструкции, менять его параметры. Такой подход является неэффективным касательно затраченного времени и качества реконструкции.

Для увеличения скорости обработки фотографий и исключения необходимости выделять отдельные лица вручную в данной работе предложен способ автоматизации данных процессов.

В качестве алгоритма реконструкции лица был выбран PRNet, так как среди рассмотренных методов он дает наилучшие результаты и не требует больших вычислительных мощностей. Для детектирования лиц на фотографии используется алгоритм MTCNN, рассмотренный ранее.

## **Разработка веб-приложения для предоставления сервиса по распознаванию лица и его трехмерной реконструкции**

На сегодняшний день наблюдается рост популярности интернет-сервисов, и все большее количество людей предпочитают выполнять

различные задачи онлайн, без предварительной установки необходимого программного обеспечения и других офлайн-инструментов. Также веб-приложение обладает рядом преимуществ перед десктоп-приложением, а именно:

- кроссплатформенность;
- отсутствие необходимости устанавливать и настраивать пакет;
- обновление пакета не требует каких-либо действий со стороны пользователя;
- обеспечение надежности хранения данных при сбое аппаратуры клиентских компьютеров;
- малая требовательность к ресурсам терминала;
- увеличение мощности вычислительной системы прозрачно для пользователя и может производиться без прерывания обслуживания.

В качестве веб-сервера был выбран aiohttp, работающий на основе библиотеки asyncio. Также при разработке был использован шаблонизатор Jinja для языка программирования Python, на котором написана сама программа обработки изображений.

Важным этапом разработки является тестирование созданного веб-приложения. Был определен список сценариев для тестирования:

1. Пользователь не указывает файл для обработки и нажимает кнопку «отправить», что приводит к появлению сообщения о том, что файл не выбран.

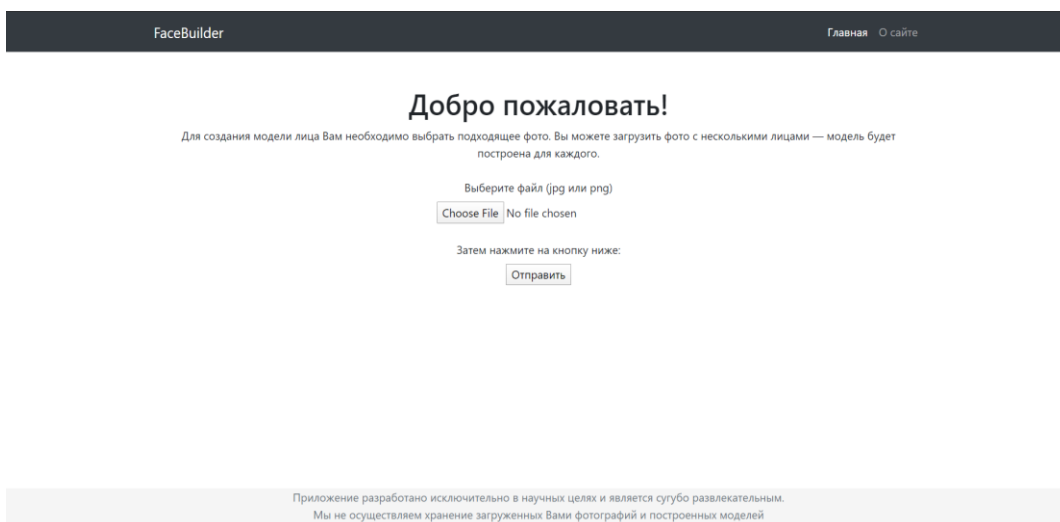
2. Пользователь пытается отправить файл с расширением, отличным от .png или .jpg. В результате появляется сообщение о неподходящем расширении файла.

3. В случае возникновения ошибок в ходе выполнения программы (невозможность обнаружения лица, некорректная обработка данных и так далее) пользователю сообщается о возникших трудностях и предлагается попробовать загрузить изображение снова или выбрать другой файл.

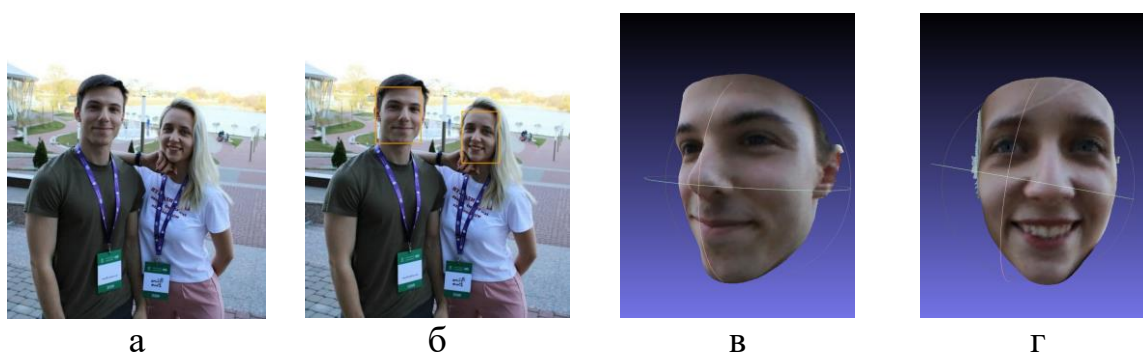
4. Если пользователь не дожидается результатов работы программы, все входные и выходные данные должны быть удалены при следующем запуске.

Все упомянутые сценарии были реализованы и успешно пройдены.

Таким образом, разработанное приложение (рис. 1) удовлетворяет всем предъявляемым требованиям и выполняет свою задачу: предоставление сервиса по детектированию лиц на изображении и их трехмерной реконструкции (рис. 2).



*Рис. 1.* Главная страница веб-приложения



*Рис. 2.* Результаты работы программы: (а) – основное изображение, (б) – детектирование лиц, (в) – реконструкция первого лица, (г) – реконструкция второго лица

### Библиографические ссылки

1. *A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton.* Imagenet classification with deep convolutional neural networks in *Advances in neural information processing systems*. 2012. P. 1–8.
2. *Yao Feng, Fan Wu, Xiaohu Shao, Yanfeng Wang, Xi Zhou.* Joint 3D Face Reconstruction and Dense Alignment with Position Map Regression Network // *Shanghai Jiao Tong University, CloudWalk Technology Research Center for Intelligent Security Technology, CIGIT*. P. 1–15.

# АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ИНТЕРАКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В. М. Медведев

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
tom.stanley19981996@gmail.com;  
науч. рук. – А. В. Курочкин

В данной статье представлена интерактивная пользовательская система, основанная на алгоритмах распознавания и идентификации личности по лицу. На основе поставленных требований и технических возможностей системы проанализированы существующие алгоритмы распознавания и их недостатки, существенно влияющие на качество. В работе предложена архитектура разрабатываемой системы с разделением по ключевым модулям, а также представлены рекомендации по подбору параметров исследуемых моделей для повышения точности распознавания и идентификации лица в реальном времени по видеопотоку.

**Ключевые слова:** нейронные сети; глубокое обучение; идентификация личности; интерактивные системы; компьютерное зрение.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

В качестве системы для проектирования был выбран интерактивный домашний помощник (рис. 1). К числу основных требований относятся: многопоточность (одновременная обработка лиц нескольких пользователей), хорошее качество распознавания, устойчивость к шумам во входных данных, производительность и защищенность данных.



Рис. 1. Архитектура будущей интерактивной системы

Архитектура системы состоит из следующих компонентов:

- Камера. Используется для подачи непрерывного видеопотока на процессор.

- Процессор. Получает видеопоток с камеры, преобразовывает его в кадры, нормализует, центрирует, и осуществляет другую предварительную обработку для улучшения качества дальнейшего детектирования. При этом от видеопотока отделяется аудио и формируется спектрограмма.

- Детектор. Получает кадры и спектрограмму, осуществляет поиск лица в кадре и выделяет его с использованием метода Виолы-Джонса и каскадов Хаара [1]. В спектрограмме осуществляется отделение говорящих. Обычно детектор содержит обнаружение торцевых кромок изображения, сегментацию и локализацию.

- Экстрактор. Здесь выделяются шаблоны для каждого лица и речь говорящего, которые затем передаются на вход в матчер. Шаблон для лица – это некоторое представление ключевых точек или текстуры, а для речи – фонемы и форманты [2]. В зависимости от используемой в системе модели экстрактор и матчер могут быть объединены.

- Матчер. Представляет собой алгоритм для сопоставления лица и речи с данными в базе. Получает на вход шаблон лица и речь говорящего от экстрактора и сопоставляет его с данными в базе. На выходе образуются метка, например, имя человека, и границы лица. Отправляет результат работы модулю администрирования.

- Анализатор. После успешной идентификации анализирует полученные данные: эмоции, окружение, речь. Анализатор состоит из двух частей. Первая часть отвечает за преобразование данных в текстовый вид, а вторая – за структурирование полученной информации и выделение значимых частей. После этого он создает приоритет генерации интерактива и передает данные генератору в виде готового набора команд.

- Генератор. На основе полученной информации от анализатора взаимодействует с пользователем при помощи устройств вывода.

- Модуль администрирования. Контролирует весь процесс работы системы, отвечает за добавление новых пользователей в систему и дает команду к анализу полученной информации. Обрабатывает нештатные ситуации и взаимодействует с пользователем через приложение.

Система должна уметь распознавать действия в ситуации, когда личность не распознана, и немедленно оповещать об этом владельца через администратора. Для ускорения работы алгоритма в системе распознавания можно использовать структуры данных на основе k-d или VP деревьев.

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ

### Алгоритм Виолы-Джонса

Алгоритм разработан для фронтальных изображений лица, поэтому плохо определяет лица, повернутые вбок, вверх или вниз, а при изменении освещения лица алгоритм и вовсе перестает работать (рис. 2). Несмотря на эти недостатки, алгоритм до сих пор является одним из самых быстрых и популярных для задач классификации, но медленным при обучении.

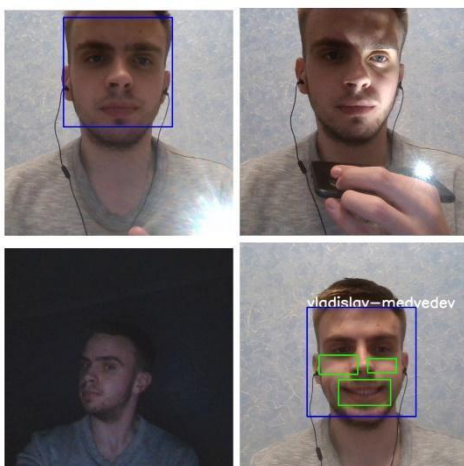


Рис. 2. Результат распознавания алгоритмом Виолы-Джонса

### Метод главных компонент

Получаемый вектор признаков в результате работы метода главных компонент может использоваться для последующего сравнения с вектором, имеющимся в базе данных. Проблемы распознавания схожи с проблемами в алгоритме Виолы-Джонса за исключением того, что метод главных компонент неплохо работает в случаях, когда лицо частично скрыто. Но при плохой освещенности он начинает ошибаться, неверно идентифицируя человека.

### Методы на основе глубокого обучения. FaceNet

FaceNet инвариантна к освещению, позе и другим изменениям. Хорошее качество распознавания наблюдается также при наличии на лице посторонних предметов и в случае отдаления от камеры (рис. 3). Если использовать в базе данных небольшое количество изображений, сеть может колебаться между пользователями, что не очень хорошо.

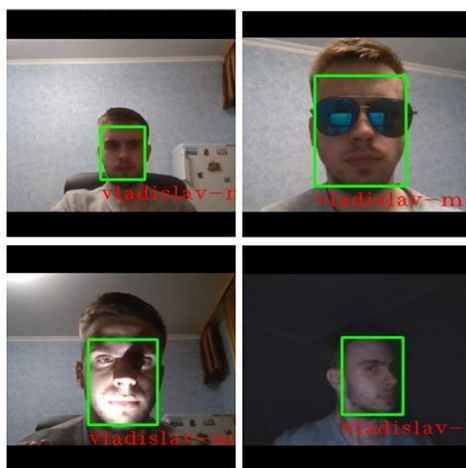


Рис.3. Результат распознавания FaceNet

Наиболее существенный минус FaceNet – это ошибочная идентификация при появлении нового пользователя, лицо которого воспринимается как одно из лиц, существующих в базе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритмы распознавания по лицу позволяют перейти к интерактивным системам нового уровня, не требующим прямого воздействия пользователя. В таких системах не удастся добиться полного совпадения лица в базе данных с лицом, поступающим на вход распознавателя, из-за постоянного перемещения человека в пространстве. Поэтому рациональнее применять алгоритмы, основанные на поиске по подобию. Помимо проблем с перемещением, распознавателю на стадии обучения нужно подавать различные модификации лица (положение головы, лицо с аксессуарами и под разными углами освещения) для получения хорошего качества идентификации, а в качестве алгоритмов распознавания стоит использовать модели глубокого обучения, которые зарекомендовали себя как модели, имеющие высокую точность распознавания.

## Библиографические ссылки

1. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~efros/courses/LBMV07/Papers/viola-cvpr-01.pdf> (data of access: 06.04.2020).
2. Coxhead P. Phones and Phonemes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.bham.ac.uk/~pxc/nlp/NLPA-Phon1.pdf> (data of access: 17.05.2020).



# ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРОТОКОЛА AX.25 НА ОС WINDOWS И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ СТУДЕНЧЕСКИХ НАНОСПУТНИКОВ

**В. В. Нехай**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*nehavita@gmail.com;*

*науч. рук. – И. А. Шалатонин, ст. преп.*

Предложен вариант построения системы приема и обработки телеметрии сверхмалых космических аппаратов, осуществляющей декодирование пакетов протокола пакетной связи AX.25, передаваемых посредством частотной манипуляции радиосигнала в режиме скремблирования G3RUH. Описано построение и настройка программно-определяемой радиосистемы (англ. Software-Defined Radio, SDR) на ОС Windows.

**Ключевые слова:** радиолюбительские спутники; пакетная радиосвязь; AX.25; программно-определяемая радиосистема; SDR; цифровая обработка сигналов; ЦОС.

Уровень развития современного общества определяется в первую очередь уровнем использования в нем информационных и аэрокосмических технологий. Проверенной мировой практикой способ подготовки специалистов аэрокосмической отрасли – разработка студентами университетских спутников. Университетский спутник обычно представляет собой сверхмалый космический аппарат весом до 10 кг формата CubeSat. Такой аппарат использует радиолюбительский частотный диапазон для связи с наземной станцией управления и передает на Землю данные по открытым протоколам. Именно таким является спутник, построенный студентами и молодыми учеными Белорусского государственного университета BSUSat-1, запущенный на солнечно-синхронную орбиту 29 октября 2018 г.

Современный космический аппарат немислим без наземной станции приема телеметрии и управления. Система телеметрического контроля малого космического аппарата (МКА) собирает информацию о параметрах работы его бортовых систем и по радиоканалу отправляют полученные данные на Землю. Анализируя зависимости параметров радиосигнала, излучаемого космическим аппаратом от времени, можно рассчитать или уточнить его орбиту.

Прямая связь с космическим аппаратом, запущенным на низкую околоземную орбиту высотой 520 км, возможна в течении коротких окон связи длительностью в несколько минут. Таких окон связи длительностью до 13 минут с университетским спутником BSUSat-1 бывает 3-4 в

вечернее и столько же в утреннее время. Остальное время спутник находится под горизонтом и недоступен для систем приема телеметрии БГУ.

На помощь приходят станции приема телеметрии спутников, расположенные по всему миру, созданные и поддерживаемые сообществом радиолюбителей всего мира. Как было сказано ранее, университетский спутник передает на Землю телеметрию по открытому протоколу AX.25 и использует радиолюбительский частотный диапазон, передавая сигнал на частоте 436,990 МГц, в связи с чем любой желающий может принять сигнал, расшифровать переданные данные и отправить их на сервер сбора телеметрии.



Рис. 1. Оборудование для приема радиосигнала

Для построения такой станции предлагается использовать самодельную антенну и приемник RTL-SDR v3 на основе тюнера R820T2 и АЦП RTL2832U стоимостью 15 долларов США (рис. 1). К приемнику подключается антенна, приемник подключается через порт USB к ЭВМ. Обработка сигнала ведется на ЭВМ с использованием методов цифровой обработки сигналов.

Структурная схема предлагаемой к построению системы приведена на рис. 2.

Космический аппарат излучает радиосигнал. Радиосигнал, испущенный космическим аппаратом, распространяясь в пространстве, достигает антенны наземной станции. По коаксиальному кабелю сигнал поступает на вход SDR-приемника.

Усиленный предварительным усилителем и оцифрованный SDR-приемником сигнал передается по USB-интерфейсу в виде I- и Q- компонент на ЭВМ.

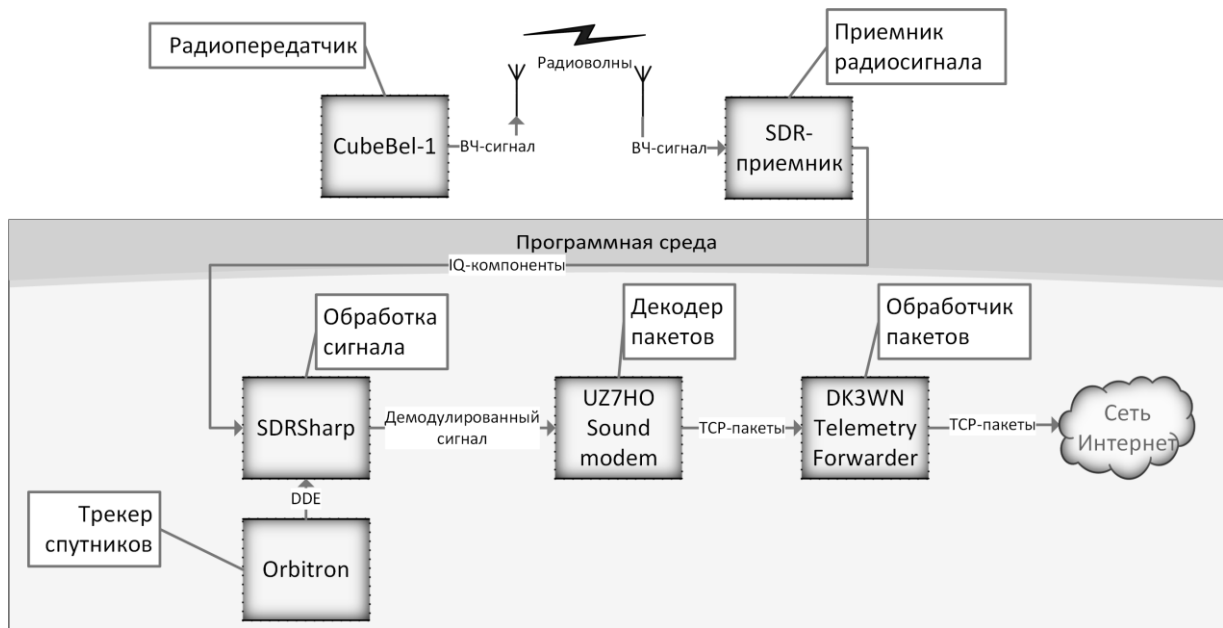


Рис. 2. Структурная схема системы

Программа SDRSharp применяет к сигналу полосовой фильтр шириной 12 кГц, настроенный на частоту приема сигнала, далее сигнал демодулируется в режиме узкополосной частотной модуляции. Оператор в реальном времени наблюдает сигнал на спектрограмме, настраивает систему для наилучшего приема (рис. 3).

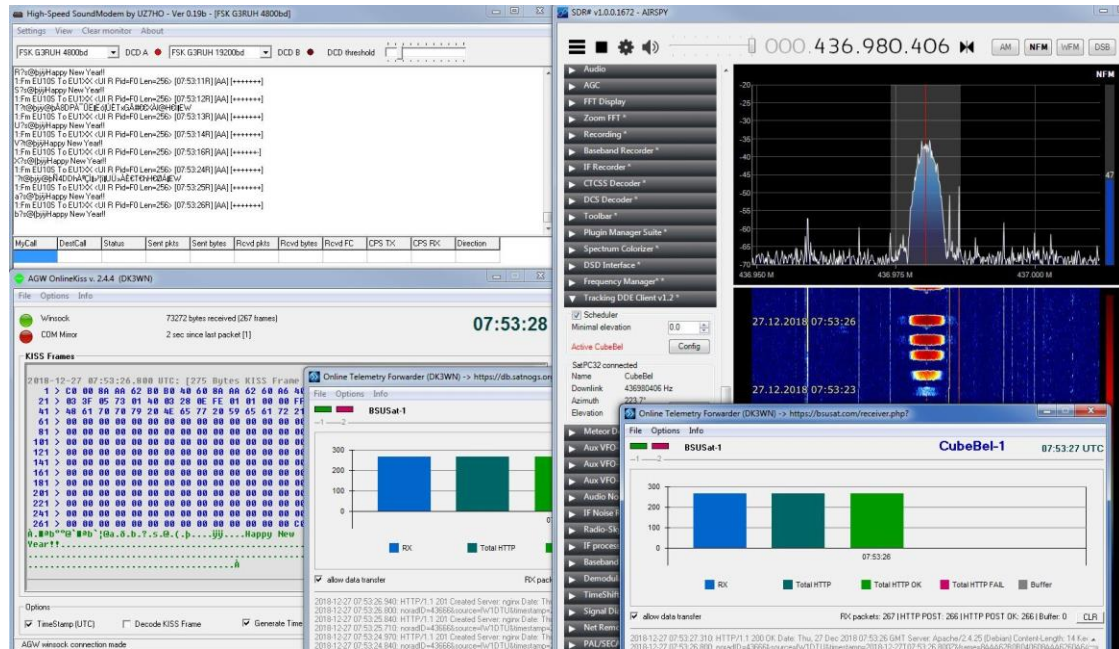


Рис. 3. Рабочий стол оператора

В основном, работа оператора сводится к поиску и настройке на радиосигнал, который может сдвинуться по частоте из-за особенностей передатчика на космическом аппарате. Немаловажную роль играет и то,

что космические аппараты движутся с большой скоростью (7,6 км/с для BSUSat-1) и имеет место заметный доплеровский сдвиг частоты радиосигнала для наблюдателя, достигающий в некоторых случаях десяти кГц. Для коррекции эффекта Доплера необходимо иметь точный и актуальный набор параметров орбиты космического аппарата. Исправить сдвиги сигнала может оператор, используя для этого специальное программное обеспечение – трекер спутников.

С программой SDRSharp по протоколу DDE связан трекер спутников Orbitron, рассчитывающий и корректирующий частоту приема несущей сигнала в соответствии с эффектом Доплера.

Демодулированный в SDRSharp сигнал проигрывается как аудиосигнал на вход виртуального аудиокабеля. Аудиосигнал слушает декодер пакетов UZ7HO Sound modem, обнаруживающий и декодирующий пакеты цифрового протокола пакетной связи AX.25 в режиме скремблирования G3RUH на скорости 9600 бод. Программа создает TCP-сервер, слушающий 8000 и 8100 порты.

К TCP-серверу подключается компьютерная программа AGW Online Kiss, анализирующая и сохраняющая декодированные пакеты, которые сохраняются локально и могут использоваться для ручного анализа либо для просмотра телеметрии с помощью парсера телеметрии.

Для отправки пакетов на сервера сбора телеметрии используется Online Telemetry Forwarder DK3WN, который определяет спутник, приславший пакеты и, используя прописанное правило, отправляет пакеты по сети на сервера сбора телеметрии конкретного спутника и на сервера сети SatNOGS.

Построенная станция приема и обработки сигналов со сверхмалых космических аппаратов используется в работе студенческого научного кружка «Встраиваемые микропроцессорные системы и промышленные сети» при приеме и обработке сигналов с искусственных спутников Земли, при проведении занятий со студентами факультета радиофизики и компьютерных технологий, а также факультетской коллективной радиостанцией с позывным EU1XX.

#### **Библиографические ссылки**

1. Шалатонин И.А., Спиридонов А.А., Саечников В.А. и др. Учебно-методический комплекс на базе программно-аппаратных средств для лабораторной отработки нано и пикоспутников // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч. - практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2017. Ч. IV. С. 54-58.
2. Проект первого белорусского университетского наноспутника [Электронный ресурс]. URL: <http://bsusat.com> (дата обращения: 12.05.2020).

# РАЗДЕЛЕНИЕ ТРАНСКРИПЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КЛЕТОЧНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ОПУХОЛЕВЫХ ТКАНЕЙ РАКА ЛЕГКОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТ

А. Л. Одинец

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
odinets96@mail.ru;*

*науч. рук. – Н. Н. Яцков, канд. физ.-мат. наук, доц.  
консультант – П. В. Назаров, канд. физ.-мат. наук, доц.*

В данной работе рассматривается разделение транскрипционных сигналов клеточных популяций с использованием метода независимых компонент. Вызванный стремительным развитием технологий секвенирования, быстрый рост экспериментальных массивов данных в области анализа генетической информации создаёт необходимость в создании и применении новых алгоритмов по поиску полезной их составляющей. Описанный в статье метод независимых компонент позволяет упростить анализ данных генной экспрессии. В качестве экспериментальных данных используется набор экспрессий генов пациентов с раком лёгкого. Приводятся результаты разделения транскрипционных сигналов для набора из 20531 гена 553 пациентов. Установлена возможность использования матрицы коэффициентов независимых компонент для классификации пациентов с высокой точностью.

**Ключевые слова:** транскрипционные сигналы; метод независимых компонент; карцинома; ДНК; генная экспрессия.

## ВВЕДЕНИЕ

С появлением генных микрочипов высокого разрешения стало возможно изучение и одновременный мониторинг экспрессии всего клеточного генома [1]. Однако размеры экспериментальных данных затрудняют использование классических алгоритмов анализа данных [2], например, для разделения транскрипционных сигналов клеточных популяций. Одним из перспективных направлений, позволяющим существенно улучшить разделение транскрипционных сигналов, является метод независимых компонент [3].

Целью работы является исследование возможностей применения метода независимых компонент для разделения транскрипционных сигналов на примере рака лёгкого – карциномы. В ходе выполнения работы решаются следующие задачи:

1. Программная реализация метода независимых компонент.
2. Анализ экспериментальных данных, представленных набором из библиотеки атласа генома рака (TCGA) [4].

### 3. Оценка устойчивости и точности разработанных алгоритмов.

#### МЕТОД НЕЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТ

В методе независимых компонент предполагается, что исходные сигналы  $s_i$  смешаны коэффициентами  $a_{ij}$ , где  $j$  – номер сигнала,  $i$  – номер переменной [5]. В эксперименте регистрируются смешанные сигналы:

$$X = S A \quad (1)$$

где  $X$  – матрица размера  $(N \times K)$  регистрируемых данных, где  $N$  – общее число генов в эксперименте,  $K$  – количество наборов измерений;  $A$  – матрица размера  $(F \times K)$  коэффициентов  $a_{ij}$ ;  $S$  – матрица размера  $(N \times F)$ , где  $F$  – количество независимых компонент, формирующая независимые компоненты или источники сигналов  $s_i$ . Если известны коэффициенты  $a_{ij}$ , то задача решается линейной системой, построенной на основе матриц формулы (1). Однако  $s_i$  и  $a_{ij}$  не известны.

Возможный подход к решению подобной ситуации – использовать для оценки  $s_i$  и  $a_{ij}$  некоторую информацию о статистических свойствах исходных сигналов  $s_i$ . Основопологающим предположением является то, что сигналы  $s_i$  негауссовы [5]. Производится поиск поворота экспериментальных данных  $X$ , чтобы результирующие сигналы  $s_i$  были наименее гауссовыми [5]. Для этого, после первого случайного поворота, каждый последующий уточняется посредством вычисления разницы энтропии случайной гауссовой величины и искомого вектора – независимой компоненты. Из-за предварительного шкалирования данных корреляция и ковариация обоих векторов должна совпадать. Разница энтропий – негэнтропия – стремится к максимуму по мере приближения к независимой компоненте и является опорным критерием в ряде реализаций метода независимых компонент [5].

Приняв во внимание указанные предположения, модель метода независимых компонент определена, возможно нахождение смешивающей матрицы и независимых компонент с точностью, определяющейся относительным вкладом независимых компонент в общую вариацию регистрируемых данных.

#### АНАЛИЗ ДАННЫХ ГЕННОЙ ЭКСПРЕССИИ

В работе рассмотрены данные генной экспрессии для лёгочного рака – карциномы, 20531 генов 553 пациентов. Априорно известны пациенты с опухолями – 502 человека. Требуется разделить транскрипционные сигналы больных и здоровых людей. В качестве среды обработки выбран язык R [6].

Применение метода независимых компонент требует выбора количества независимых компонент  $F$ . В качестве критерия оптимального выбора используется квадрат относительной ошибки главных компонент, представляющий собой отношение остаточной дисперсии к выборочной. Вычислены сигналы  $S$  и матрицы коэффициентов  $A$  для наборов независимых компонент от 1 до 50. Анализ кривой относительной ошибки главных компонент, представленной на левой половине рисунка, позволил принять решение о достаточности  $F = 20$  взятых независимых компонент. Разбиение данных на два класса (здоровые и больные пациенты) выполнено методом  $k$ -средних [7]. Наилучшие результаты получены для  $F \geq 10$  независимых компонент, что подтверждает правильность выбора.

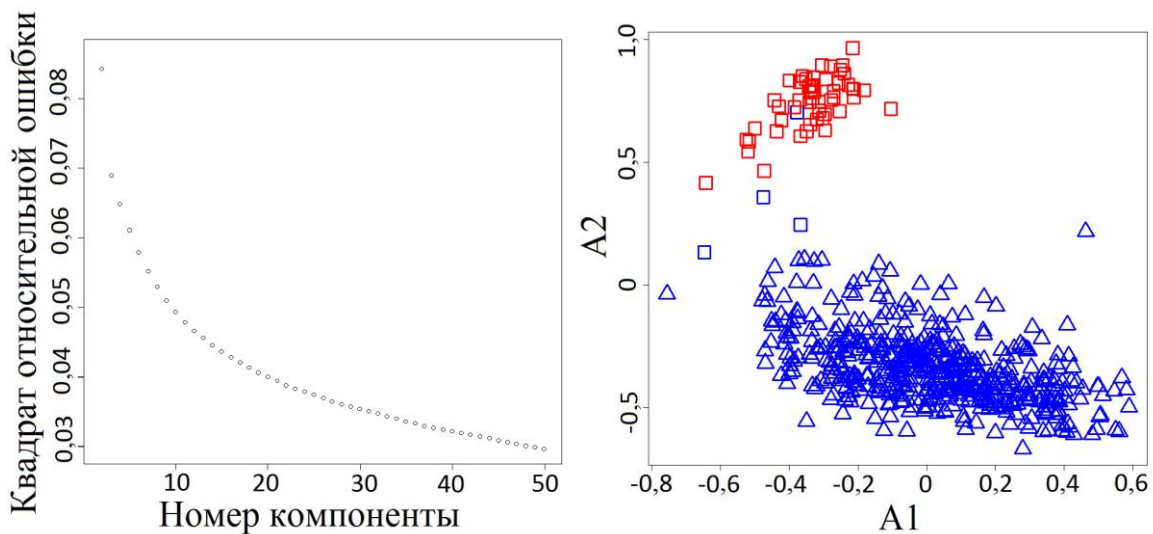


Рис. 1. Квадрат относительной ошибки главных компонент и значения первых двух векторов коэффициентов матрицы  $A$

Успешное разделение пациентов по признаку наличия опухоли, основанное на матрице коэффициентов  $A$ , представлено на правой части рисунка. Выделенная красным область отражает группу априори здоровых пациентов, квадратами обозначены пациенты соответствующего кластера, полученного методом  $k$ -средних.

Первая независимая компонента сопоставлена сигналу клеточной популяции на формирование опухоли. Анализ показал, что гены с уровнем сигнала, близким к нулю, участие в заболевании не принимают. Таким образом, метод независимых компонент позволяет не только выделить транскрипционные сигналы клеточных популяций, но и определить набор генов-маркеров.

Анализ полученных методом независимых компонент матриц  $S$  и  $A$  указал на разделение информации между ними. Матрица независимых компонент  $S$  позволяет выделить профили транскрипционных сигналов, в частности отвечающий за образование опухоли, следовательно и отве-

чающие за этот процесс гены. Матрица же коэффициентов  $A$  содержит информацию непосредственно о самих пациентах, позволяя выделять пациентов в группы по разным признакам. Это объясняется размерностью начальных и конечных данных: если исходный массив состоял из генов-строк и пациентов-столбцов, т. е. «гены» × «пациенты», то полученные  $S$  – это «гены» × «компоненты», в то время как  $A$  – это «компоненты» × «пациенты».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и применен к данным генной экспрессии метод независимых компонент. Проведен анализ генома рака лёгкого – карциномы. Методом независимых компонент разделены транскрипционные сигналы здоровых и больных пациентов. На основе критерия ошибки метода главных компонент выбрано оптимальное число независимых компонент – 20. На основе априорных данных проведена оценка разделения. Достигнута точность в 97,8 % верно классифицированных пациентов с перспективой улучшения посредством замены метода кластеризации.

## Библиографические ссылки

1. *Shefa U., Jung J.* Comparative study of microarray and experimental data on Schwann cells in peripheral nerve degeneration and regeneration: big data analysis // *Neural Regen Res.* 2019. Vol. 14, P. 1099–1104. DOI: 10.4103/1673-5374.250632.
2. *Gauch H.G. Jr, Qian S., Piepho H.P., et al.* Consequences of PCA graphs, SNP codings, and PCA variants for elucidating population structure // *PLoS One.* 2019. Vol. 14. DOI: 10.1371/journal.pone.0218306
3. *Nazarov P.V., Wienecke-Baldacchino A.K., Zinovyev A., et al.* Deconvolution of transcriptomes and miRNomes by independent component analysis provides insights into biological processes and clinical outcomes of melanoma patients // *BMC Med Genomics.* 2019. Vol. 12. DOI: 10.1186/s12920-019-0578-4
4. *Cooper L.A., Demicco E.G., Saltz J.H., et al.* PanCancer insights from The Cancer Genome Atlas: the pathologist's perspective // *J Pathol.* 2018. Vol. 244, P. 512–524. DOI: 10.1002/path.5028
5. *Sompairac N., Nazarov P.V., Czerwinska U., et al.* Independent Component Analysis for Unraveling the Complexity of Cancer Omics Datasets // *Int J Mol Sci.* 2019. Vol. 20. DOI: 10.3390/ijms20184414
6. *Kosinski M.* Package ‘RTCGA’ // Electronic resource. URL: <http://bioconductor.org/packages/release/bioc/manuals/RTCGA/man/RTCGA.pdf> (date of access: 20.10.2019)
7. *Яцков Н. Н., Шингарёв И. П.* Интеллектуальный анализ данных: методические указания к лабораторным работам. Минск: БГУ, 2012.



# КОМБИНИРОВАННЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ И ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. О. Поживилко

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

*pozhivilkoo@mail.ru;*

*науч. рук. – В. А. Зайков, ст. преп.*

В настоящей работе исследованы вольтамперные и спектральные характеристики разряда в парах ртути, основанного на комбинации индуктивного высокочастотного (ВЧ) разряда и разряда постоянного тока. Для зажигания индуктивного ВЧ разряда низкого давления разработан ВЧ генератор, мощностью до 300 Вт, работающий на частотах от 10 до 30 МГц. Показано, что в комбинированном разряде интенсивность излучения спектральных линий ртути зависит от величины постоянной составляющей тока разряда и может как понижаться, так и повышаться по сравнению с интенсивностью в чисто индуктивном разряде. Источники излучения с комбинированным типом разряда могут повысить эффективность преобразования электрической энергии в излучение резонансных линий атомов ртути.

**Ключевые слова:** индуктивный высокочастотный разряд; разряд постоянного тока; вольтамперные характеристики; оптические спектры.

Основным достоинством ВЧ индуктивного разряда является высокая концентрация электронов при относительно невысоком уровне ВЧ-мощности [1], что позволяет эффективно преобразовывать электрическую энергию в излучение резонансных линий ртути и может применяться для уничтожения микроорганизмов [2]. Увеличение мощности ламп с ртутным разрядом низкого давления позволит применять их там, где необходима высокая плотность излучения при сохранении высокого КПД и длительного срока службы этих ламп [1, 2].

Известно, что разряд низкого давления зажигается с помощью антенны, подключенной к ВЧ-генератору. Токи, текущие по антенне, индуцируют в плазме вихревое электрическое поле, которое нагревает электроны до энергий, превышающих порог ионизации рабочего газа.

Применение дополнительного разряда постоянного тока позволяет увеличить однородность плазменного столба, стабилизировать разряд и повысить плотность плазмы [3].

В настоящей работе изучался комбинированный разряд ВЧ индуктивного типа и постоянного тока в газоразрядных трубках, заполненных парами ртути. Исследования проводили с целью увеличения плотности излучения и повышения КПД преобразования электрической энергии в ультрафиолетовое излучение.

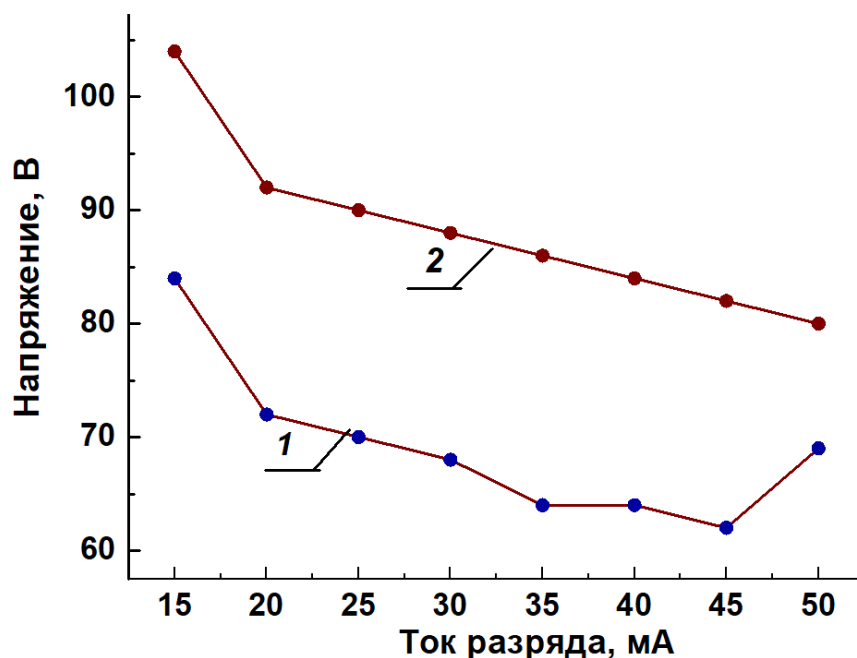
Схемы и работа генераторов ВЧ ранее рассматривались в работе [4]. Разработан ламповый генератор для зажигания индуктивного ВЧ разря-

да низкого давления, который состоит из задающего генератора на пентоде 6Ж38П и усилителя мощности на двух лучевых тетрадах ГС36Б. В ходе испытаний генератора установлено, что амплитудно-частотная характеристика задающего генератора равномерна в полосе от 10 до 30 МГц. Амплитуда и частота сигнала задающего генератора слабо зависят от входной ёмкости ламп усилителя мощности. Аноды ламп усилителя мощности соединены. в цепь анодов включается колебательный контур, состоящий из индуктора и подстроечного конденсатора.

Для измерений использовалась бактерицидная ртутная лампа ДРБ-8. Увioletовое стекло лампы пропускает излучение с длиной волны  $\lambda = 253,7$  нм, и задерживает озонирующее излучение с  $\lambda = 185,6$  нм. Спектральные измерения проводили с помощью компактного спектрометра S-100 обзорного типа.

При внесении ртутной лампы в индуктор наблюдается свечение плазмы газового разряда в парах ртути, при этом темное катодное пространства вблизи электродов отсутствует, что характерно для ВЧ-разряда. При подключении источника питания постоянного тока ТВ-1 к торцевым электродам лампы ДРБ-8 возникает комбинированный разряд и появляется темное катодное пространство, свечение плазмы становится равномерным.

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики разряда постоянного тока и комбинированного разряда.

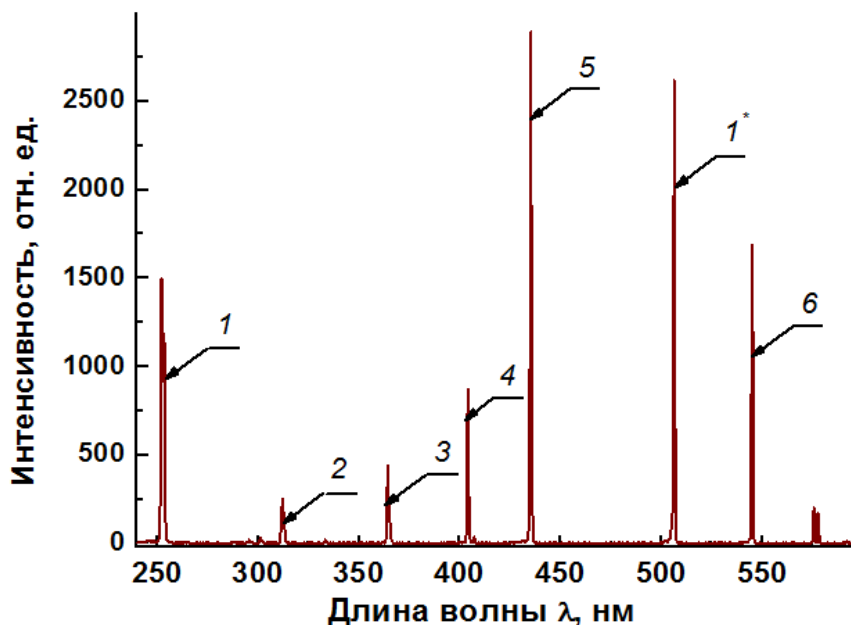


Кривая 1 – комбинированного разряда при частоте ВЧ-генератора 12 МГц; кривая 2 – разряда постоянного тока.

Рис. 1. Вольтамперные характеристики разряда

Уменьшение напряжения с увеличением тока разряда объясняется ростом давления паров ртути, испаряющихся со стенок лампы, при увеличении мощности разряда. В комбинированном разряде при одинаковых значениях тока напряжение ниже на 18-20 В (кривые 1 и 2).

На рис. 2 представлен спектр плазмы комбинированного разряда.



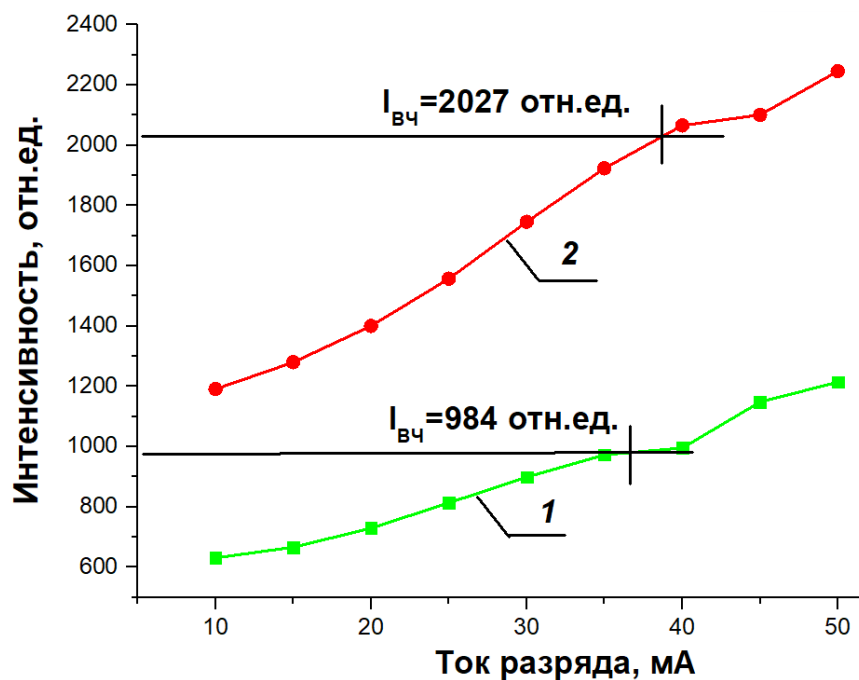
1 и 1\* - 253,6 нм, \*) - 2-й порядок дифракции, E=4,88 эВ; 2 - 313,2 нм, E=8,82 эВ; 3 - 366,3 нм, E=8,85 эВ; 4 - 404,7 нм E=7,73 эВ; 5- 435,8 нм, E=7,73 эВ; 6- 546,1 нм, E=7,73 эВ

Рис. 2. Спектр плазмы комбинированного разряда

В спектре плазмы разряда присутствуют резонансная линия ртути  $\lambda = 253,7$  нм (энергия возбуждения 4,88 эВ) и ряд линий ртути с большим значением энергии возбуждения до 8,82 эВ.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивностей спектральных линий комбинированного разряда от постоянной составляющей тока разряда. Горизонтальной чертой представлены интенсивности  $I_{ВЧ}$  спектральных линий для ВЧ индуктивного разряда, без постоянного тока. Следует отметить, что интенсивности излучения плазмы в комбинированном разряде могут быть как ниже, так и выше по сравнению с интенсивностью в чисто индуктивном разряде. Действительно, в случае комбинированного разряда изменение постоянной токовой составляющей приводит к самосогласованному изменению как параметров плазмы, так и долей мощности, вкладываемой в плазму через постоянный и индуктивный каналы возбуждения разряда.

В дальнейших исследованиях необходимо изучить взаимное влияние различных механизмов ввода энергии и механизмов ионизации в плазме комбинированного разряда.



1 - 253,6 нм,  $E=4,88$  эВ; 2 - 435,8 нм,  $E=7,73$  эВ. Частота ВЧ - 20 МГц.

Рис. 3. Зависимость интенсивностей спектральных линий комбинированного разряда от постоянной составляющей тока разряда

1. Разработан ВЧ генератор мощностью до 300 Вт, работающий на частотах от 10 до 30 МГц.
2. Показано, что в комбинированном разряде интенсивность излучения спектральных линий ртути зависит от величины постоянной составляющей тока разряда и может как понижаться, так и повышаться по сравнению с интенсивностью в индуктивном разряде.
3. Комбинированный разряд может использоваться для эффективного преобразования энергии разряда в излучение.

#### Библиографические ссылки

1. 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.
2. Кузьменко М. Е., Митичкин О. В., Безлепкин А. И., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Печеркин В. Я. Экспериментальное исследование амальгамной лампы низкого давления при повышенной мощности разряда // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38, № 3. С. 510–512. DOI:10.1007/BF02756012.
3. Неклюдова П. А., Никонов А. М., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Задириев И. И. Исследования комбинации индуктивного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 18-23.
4. Поживилко А. О. Разработка источника питания высокочастотного магнетронного распылителя // Науч. конф. студентов и аспирантов БГУ: сборник работ 76-й науч. конф., Минск, 13-24 мая 2019 г.: в 3 ч. / БГУ; в авторской ред. – Минск, 2014. Ч.1. С. 209-212.

# ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ С «KINK» ЭФФЕКТОМ

В. А. Радион

Белорусский государственный университет, г. Минск;

vladimirradion@yandex.by;

науч. рук. – В. М. Стецук

Проведено экспериментальное исследование мощностных и спектральных характеристик лазерных диодов с «kink» эффектом. С помощью интерферометра Майкельсона измерены скорости перестройки частоты генерации при изменении тока накачки. Показано, что коэффициент перестройки частоты излучения с изменением тока накачки может изменяться более чем на 50 %. Впервые показано частотная перестройка излучения кванторазмерного полупроводникового лазера до и после «kink» эффекта в импульсном режиме работы. Данный эффект может найти применение в дальномерах частотного типа для увеличения точности проводимых измерений.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер; «kink» эффект; токовая перестройка частоты излучения; интерферометр Майкельсона.

Известно, что полупроводниковые лазеры с полосковым контактом могут иметь нелинейное поведение зависимости мощности от тока. Нелинейное поведения ватт-амперной характеристики в литературе принято называть «kink» эффектом [1]. Также известно, что лазеры, как правило, эксплуатируются до области «kink» эффекта, а при дальнейшем увеличении тока очень часто деградируют. В этом случае «kink» эффект является причиной ограничения по току и мощности при эксплуатации

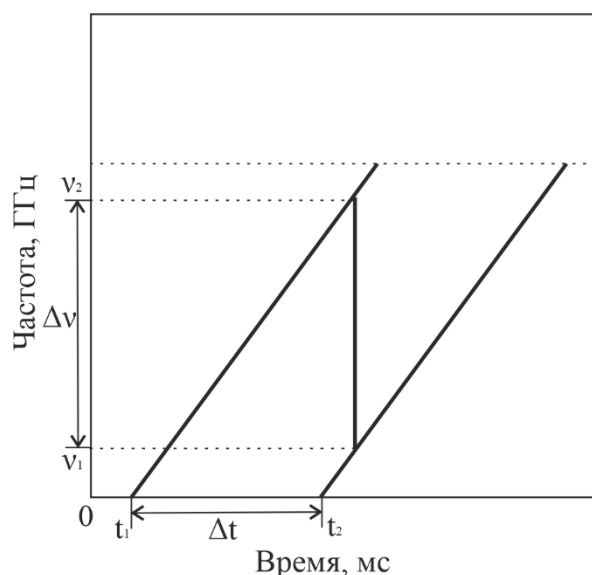


Рис. 1. Получение разностной частоты на выходе интерферометра при наличии временной задержки в одном из плеч

этих лазеров.

Целью данной работы является исследование перестройки частоты излучения полупроводниковых лазеров в области «kink» эффекта при пилообразном токе накачки.

Рассмотрению «kink» эффекта посвящено большое количество печатных работ [2–5]. Однако при изучении спектральных характеристик, как правило, использовались решеточные спектральные аппараты. Данные аппараты позволяют получить усредненный интегральный спектр при импульсном режиме накачки.

Динамику изменения спек-

тральных характеристик на данных аппаратах можно получить лишь точно. Поэтому для оценки изменения частоты излучения на различных участках пилообразного импульса нами был использован нескомпенсированный интерферометр Майкельсона.

При линейном пилообразном токе накачки вследствие изменения концентрации носителей и показателя преломления частота излучения должна изменяться линейно.

Вследствие разности плеч интерферометра Майкельсона данное изменение частоты будет происходить с задержкой, как показано на рис. 1. Поэтому на экране осциллографа мы будем фиксировать постоянную

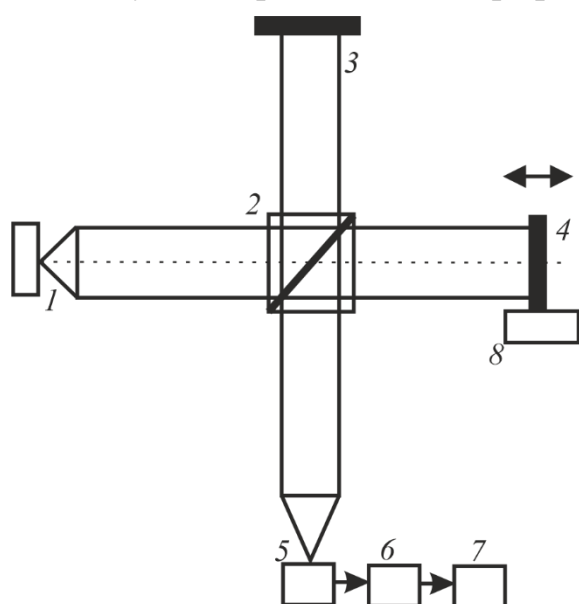


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для определения изменения перестройки частоты излучения при пилообразном импульсе тока накачки

1 – лазерный диод, 2 – светоделительный кубик, 3, 4 – зеркала, 5 – фотоприёмное устройство, 6 – цифровой осциллограф Bordo, 7 – компьютер, 8 – микрометрическая подвижка

низкочастотную составляющую.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для определения изменения перестройки частоты излучения при пилообразном импульсе тока накачки. Коллимированное излучение лазера 1 поступало на делительный кубик 2. Затем излучение попадало на зеркала 3 и 4 и после отражения, проходя через делительный элемент, поступало на фотоприёмное устройство 5. С нагрузки этого устройства сигнал попадал на цифровой осциллограф 6 и визуализировался с помощью компьютера 7. Микрометрическая подвижка позволяла с высокой степенью точности (5 мкм) осуществлять перемещение зеркала 4 для достижения разности хода лучей в плечах интерферометра, кратной оптиче-

ской длине резонатора лазера  $L_{\text{опт}}$ . Это требование возникает в случае генерации лазером нескольких продольных типов колебаний. В этом случае функция временной когерентности также становится дискретной по пространственной координате [6]. То есть максимальный сигнал динамической интерференционной картины фиксируется фотоприёмным устройством 5 именно при разности хода лучей, кратной  $L_{\text{опт}}$ . Знание разности оптического хода лучей в интерферометре позволяет вычис-

лить перестройку частоты генерации, используя данные о количестве периодов синусоидальной функции из рис. 3.

Для исследования были выбраны лазеры видимого диапазона с  $\lambda = 650$  нм, номинальной мощностью излучения 5 мВт, с шириной плоского контакта 5 мкм, длина кристалла составляла 250 мкм.

На рис. 4 представлен пилообразный импульс накачки полупроводникового лазера № 1 и соответствующее изменение мощности.

Порог генерации для данного лазера составил порядка 14 мА. На мощностной характеристике отчетливо виден «kink» эффект в диапазоне токов от 21 до 25 мА. Характеристика изменения мощности состоит из двух линейных участков: «а», «с» и области «kink» эффекта «b».

На рис. 3 из сравнения участков «а» и «с» видно, что период синусоидальной возрастающей функции участка «а» почти в два раза больше участка «с».

Частота перестройки на участке выше «kink» эффекта значительно больше. Но в области «kink» эффекта частота перестройки излучения понижается. На участке «а» коэффициент перестройки частоты генерации с изменением тока накачки составил 9 ГГц/мА, на участке «с» – 16,9 ГГц/мА.

Порог генерации лазера № 2 составил порядка 16 мА. На мощностной характеристике «kink» эффект наблюдался в диапазоне токов от 27 до 30 мА.

На участке до «kink» эффекта коэффициент перестройки частоты генерации с изменением тока

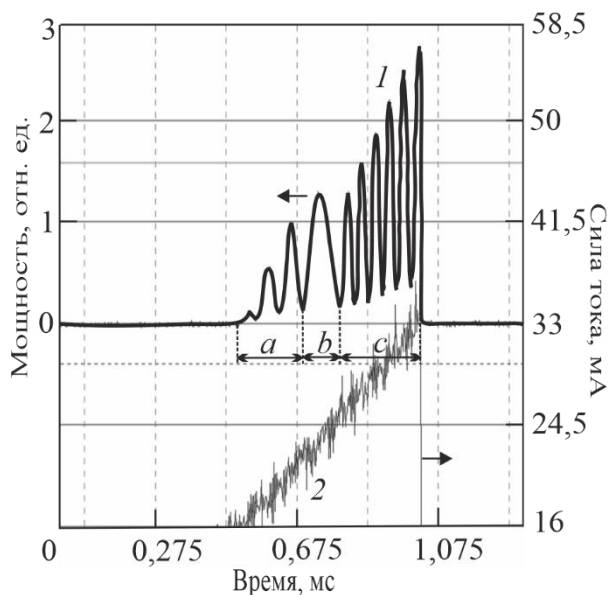


Рис. 3. Сигнал на выходе интерферометра Майкельсона (1) и пилообразный ток накачки (2) лазера № 1

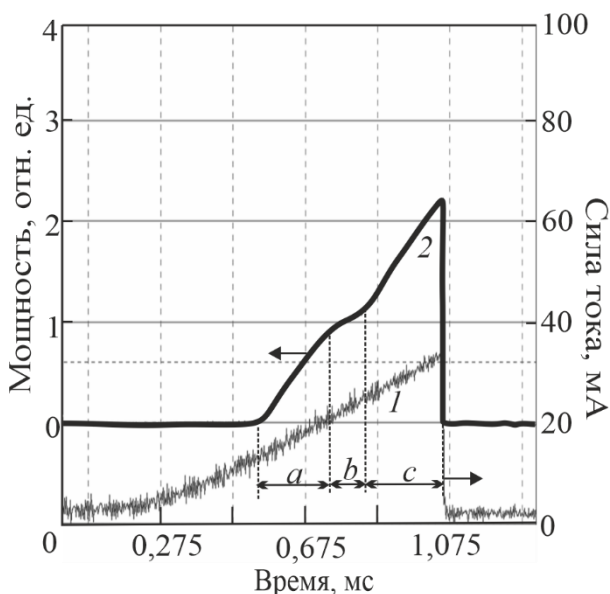


Рис. 4. Пилообразный импульс тока накачки (1) и изменение интенсивности излучения (2) для лазера № 1

накачки составил 12,3 ГГц/мА, на участке после – 30 ГГц/мА.

Следует отметить, что наряду с перестройкой под действием тока существует и температурный механизм перестройки частоты излучения. Так как длительность пилообразного импульса была порядка 0,8 мс, то в нашем случае действует два механизма, влияющие на перестройку частоты генерации: токовый и температурный. Поскольку для данного лазера появление «kink» эффекта связано с изменением положения активной области, то изменяется концентрация носителей заряда (уменьшается). Изменение частоты излучения на участке тока накачки «с» по сравнению с участком «а» будет больше. Однако не следует упускать из вида влияние температуры на частоту генерации. Возможным фактором появления «kink» эффекта является дефект в одной из областей волновода. При увеличении тока температура этой части волновода увеличивается, что приводит к образованию излома ватт-амперной характеристики, а также к увеличению перестройки частоты генерации с током.

В качестве основных результатов данной работы можем отметить следующее:

1. В результате применения нескомпенсированного интерферометра Майкельсона для оценки перестройки частоты излучения лазера была получена временная картина перестройки, которая позволила детально увидеть отличия в скорости перестройки частоты генерации на различных участках ватт-амперной характеристики.

2. Коэффициенты перестройки частоты излучения с изменением тока накачки до и после «kink» эффекта для лазера № 1 различались на 47 %, для лазера № 2 – на 59 %.

#### Библиографические ссылки

1. *Елисеев П. Г.* // Введение в физику инжекционных лазеров. 1983.
2. *Колыхалова Е. Д., Дюделев В. В., Зазулин С. В., Лосев С. Н., Дерягин А. Г., Кучинский В. И., Ефанов М. В., Соколовский Г. С.* // Получение ультракоротких мощных оптических импульсов от полупроводниковых лазеров за счет управления параметрами токовой накачки. 2017.
3. *Кунцевич Б. Ф., Мельников А. А., Кононенко В. К.* // Нелинейный отклик полупроводникового лазера с модуляцией тока накачки. 2002.
4. *Зегря Г. Г., Соловьев И. Ю.* // Влияние эффекта насыщения усиления на мощность излучения полупроводниковых лазеров на квантовых ямах. 2004.
5. *Бойкачев А. И., Грибковский В. П., Кононенко В. К., Охотников О. Г., Пак Г. Т., Рябцев Г. И., Яшумов И. В.* // Особенности ватт-амперной характеристики гетеролазеров с полосковым контактом. 1979.
6. *Alex R. Resinger, C. D. David, JR., K. L. Lawley, Amnon Yariv, FELLOW, IEEE* // Coherence of a Room-Temperature CVV GaAs/GaAlAs Injection Laser. 1979.



# ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ РАЗВИТИЯ РЕАКЦИИ И КООРДИНАЦИИ

**А. С. Семенович**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*alexser1999@gmail.com;*

*науч. рук. – И. П. Стецко, канд. техн. наук, доц.*

В данной статье приведены результаты проектирования программно-аппаратной платформы для создания электронного тренажера с использованием облачных технологий. Тренажёр позволяет улучшать реакцию спортсменов по различным программируемым алгоритмам тренировок с учетом направлений и координации их движений. Разработанная платформа обеспечивает режим удалённого накопления данных для анализа тренировочных данных при масштабных исследованиях.

**Ключевые слова:** измерение времени реакции, реакция выбора, электронный тренажер, MQTT- протокол, облачные технологии передачи и хранения данных.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современном мире достаточно ситуаций, в которых требуется высокая скорость реакции, и улучшение ее на одну десятую или даже на сотые доли секунды имеет большое значение [1]. Регистрация и анализ интервалов времени реакции у спортсменов различного уровня подготовки уже давно является одним из инструментов для оценки тренированности и профессиональности [2, 3]. Роль диагностики и тренировки времени простейшей двигательной реакции подчеркивается в большом количестве работ, посвященных аспектам подготовки спортсменов, сотрудников силовых ведомств, операторов сложной техники, оценки психофизического состояния или лечения двигательных расстройств [3, 4].

В психологии спорта различают простые и сложные реакции. Простые двигательные реакции характеризуются одним сигналом-стимулом и одним заранее известным ответным действием. Сложные реакции (реакции выбора) определяются двумя и более сигналами, одним или несколькими ответными действиями [3].

Чаще всего для оценки времени реакции на звуковой или световой раздражитель используют стационарные приборы (рефлексометры) или компьютерные программы [3]. Однако в спорте важна реакция в составе конкретно направленного двигательного действия или его элемента (старт, атакующее или защитное действие), поэтому для улучшения скорости простой двигательной реакции применяют упражнения на быстроту реагирования в условиях, максимально приближенных к соревновательным. Компактный программируемый электронный тренажер, со-

здающий стимулы, регистрирующий интервалы и корректность сенсомоторной реакции, с возможностью накопления тренировочных данных в составе оборудования или спортивного инвентаря безусловно предоставит больше возможностей для контроля и анализа тренировочного процесса.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРА

В результате анализа опубликованных тренировочных данных и методик подготовки спортсменов [1-3] были собраны и сформулированы технические и функциональные требования к электронному тренажеру:

- Время простой двигательной реакции зависит от внешнего сигнала-стимула: на звуковой сигнал оно составляет 50-160 мс, на световой – 100-200 мс, на тактильный – 105-180 мс. Эта величина может зависеть от стартового возбуждения, значимости состязания, степени тренированности, утомления, двигательного опыта, разминки, а также от того, на каком компоненте движения концентрируется внимание – сенсорном или моторном. Необходимо обеспечить длительность измерения на протяжении нескольких минут, дискретность измерения интервала на уровне единиц миллисекунд. Тренажёр должен обладать набором стимулов.

- Для исследования вариантов сложной сенсомоторной реакции испытуемый должен дифференцировать сигнал-стимул. На один сигнал надо реагировать, на другой – нет (реакция различения), или же выбирать соответствующий тип движения (реакции выбора). Тренажер должен контролировать корректность выполнения реакции выбора и обеспечивать поддержку нескольких вариантов стимулов одного типа – разные цвета или уровни сигналов.

- Компактный размер, автономный режим работы и режим группового взаимодействия (несколько узловых устройств на одном объекте), беспроводной канал для управления режимами и для связи с удаленным сервером для хранения тренировочных данных – основные эксплуатационные требования и преимущества перед аналогами, позволят размещать тренажер на спортивном инвентаре и осуществлять оперативную смену алгоритмов.

В качестве аппаратно-программной платформы для создания тренажера была выбрана современная открытая и недорогая IoT-платформа на основе микроконтроллера ESP32 производства компании Espressif. Кристалл включает в себя 2-х ядерный 32-разрядный процессор Tensilica Xtensa LX6 и контроллеры Bluetooth BLE, Wi-Fi которые позволяют подключить разнообразные цифровые датчики и легко организовать беспроводную связь с использованием интернет протоколов TCP/IP.

В качестве стимулов используется массив адресных RGB-светодиодов, акустический пьезо-излучатель и вибро-мотор. С помощью матрицы светодиодов создаются цветовые вспышки стимула или световой эффект «бегущая волна» для указания направлений движений (жестов) испытуемого. Исследуемый интервал реакции фиксируется с помощью кнопки, ИК-датчика расстояний или цифрового акселерометра (ADXL345). Для контроля качества и интервалов реакции выбора используется цифровой датчик жестов (APDS-9960).

Предложенная структурная схема (рис. 1) очень похожа на современную реализацию платформы «умного дома» с использованием технологий интернета вещей. Протокол прикладного уровня MQTT (message queuing telemetry transport) отлично зарекомендовал себя в подобных системах, он позволяет экономно отправлять команды для управления устройствами, публиковать и считывать данные от датчиков. В качестве локального брокера, который отвечает за получение, фильтрацию и рассылку сообщений клиентам, была опробована открытая реализация Mosquitto на основе Raspberry Pi, а в качестве бесплатных облачных сервисов – HiveMQ, CloudMQTT и SmartThings Samsung.

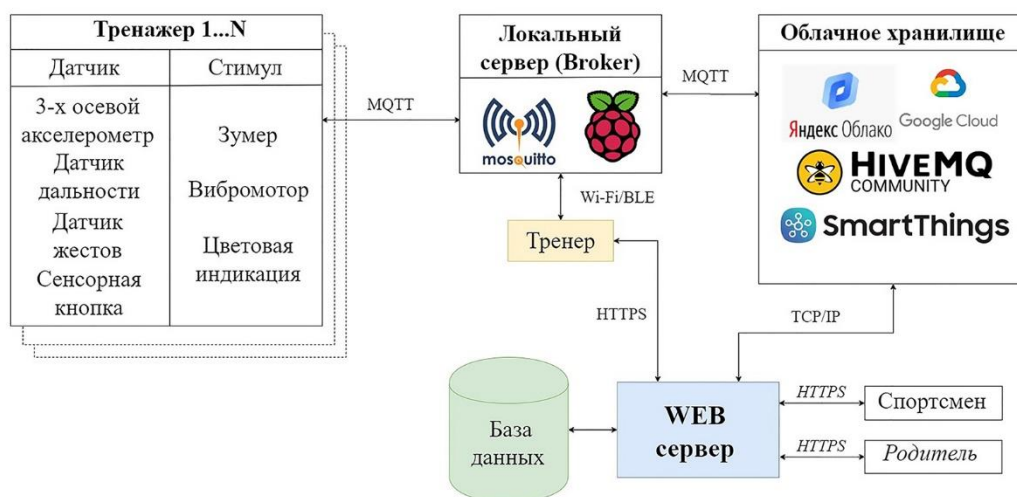


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратной платформы тренажера

Каждый тренажер (узел) обладает необходимым набором стимулов и датчиков реакции, тренажеры могут объединяться в группы, таким образом, что реакция на стимул одного узла может быть зарегистрирована датчиками другого узла.

Разработка и проектирование аппаратной части макета тренажера осуществлялась в среде Altium Designer. Отладка программного обеспечения выполнена в среде Visual Code с использованием общедоступных программных библиотек, созданных инженерным сообществом.

В разработанном прототипе электронного тренажёра (рис. 2) реализованы базовые алгоритмы тестирования простой и сложной двигательной реакции по методу случайного стимула с хронометрированием реакции и контролем качества выполнения заданного жеста.

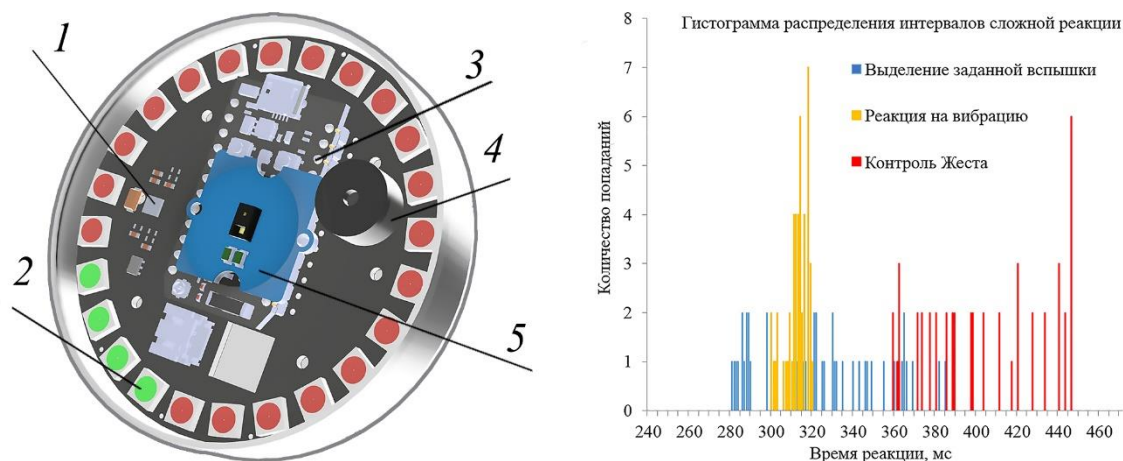


Рис. 2. 3D-модель прототипа тренажера и результаты тестирования реакций:

1 – акселерометр, 2 – RGB-индикация, 3 – ESP32, 4 – зуммер, 5 – датчик жестов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования была предложена архитектура и изготовлен полнофункциональный прототип электронного тренажера для формирования и контроля тренировочных режимов, с установкой на сокращение времени реагирования, улучшение координации и развитие выносливости спортсменов.

### Библиографические ссылки

1. *Московченко О.Н.* Оптимизация физических и тренировочных нагрузок на основе индивидуального адаптивного состояния человека. М., 2012.
2. *Грушко А.И., Бочавер К.А., Квитчастый А.В., Ковалева А.В., Кабанов Д.Ю., Константинова М.В., Касаткин В.Н.* Диагностика времени моторной реакции в различных видах спорта // Спортивный психолог. 2016. №1(40). С. 82-87.
3. *В. Н. Болгов, Н. П. Тагирова, Н. В. Дробинина и др.* Компьютерная программа «Реакциомер» для исследования двигательной реакции юных фехтовальщиков // Межд. научно-иссл. журнал. 2016. №10-3 (52). С. 119-122.
4. *Максимова С.Ю, Прописнова Е.П., Иванась Н. И.* Методика коррекции и развития двигательных навыков у детей дошкольного возраста с задержкой психического развития // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2015. №4(122). С. 113-118.

# АЛГОРИТМ ПОИСКА РОДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ИЗ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

И. К. Сечко

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*igorsechko.fish@gmail.com;*

*науч. рук. – Д. В. Щегрикович, канд. физ.-мат. наук*

В данной статье рассматривается идея построения алгоритма поиска пересечения родоводов различных интернет-пользователей, призванного решить задачу поиска родственников третьего и более кругов родства. Алгоритм предлагает пользователям ввести информацию о своих прародителях, после чего введенные данные сверяются и на основании количественной оценки сходства алгоритм определяет, есть ли между пользователями родственная связь или нет. Также введена матрица родственных соответствий, при помощи которой устанавливаются родственные соотношения. В существующих генеалогических порталах не реализуются подобные функции, поэтому в данной статье предлагается создание специализированной социальной сети или дополнение существующих социальных сетей предлагаемым алгоритмом.

**Ключевые слова:** родственный круг (круг родства); матрица родственных соответствий; информационный вес; алгоритм пересечения родоводов.

В настоящее время существует множество сайтов, предлагающих пользователю составить свое генеалогическое древо: familyspace.ru, myheritage.com, analizfamilii.ru, vgd.ru, rosgenea.ru. Однако на данных сервисах не реализуется возможность поиска пересечений в родоводах различных пользователей и установления родственных соответствий между ними. Предлагается разработать приложение и создать специализированный сервис для реализации данных возможностей.

Для реализации данной задачи был проанализирован ряд схем родства. Наиболее удобна для установления родственных соответствий схема В. Бусыгина [1]. В данной схеме были выделены родственные круги (рис. 1). Для работы предлагаемого алгоритма необходима база первичных данных (рис. 2). Приложение на основании этой информации устанавливает родственные соответствия между пользователями. Места жительства прародителей пользователи выделяют на карте, т.к. наименования административно-территориальных единиц не редко изменяются. Для последующей обработки используются первые 7 признаков, поскольку они несут наибольшую информацию о человеке (рис. 3). Пусть два пользователя создали описания своих предков:  $list_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}\}$ ,  $list_j = \{x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}, x_{j4}, x_{j5}, x_{j6}, x_{j7}\}$ , где  $x_1$  – имя,  $x_2$  – фамилия,  $x_3$  – отчество,  $x_4$  – годы жизни,  $x_5, x_6$  и  $x_7$  – места жительства 1, 2 и 3 соответственно и периоды проживания там.

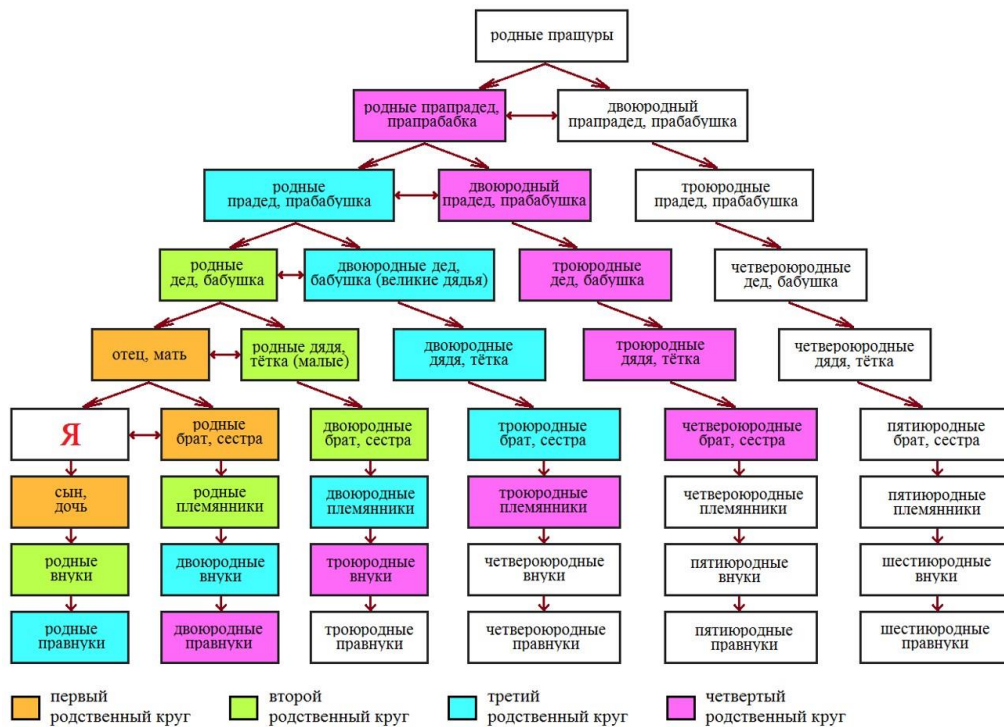


Рис. 1. Схема родства по В. Бусыгину с выделенными родственными кругами

Имя <input style="width: 100%;" type="text"/> Фамилия <input style="width: 100%;" type="text"/> Отчество <input style="width: 100%;" type="text"/> Годы жизни <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/> Место жительства 1 <input style="width: 100%;" type="text"/> <span style="font-size: small;">указать на карте</span> Даты проживания <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/> Место жительства 2 <input style="width: 100%;" type="text"/> <span style="font-size: small;">указать на карте</span> Даты проживания <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/> Место жительства 3 <input style="width: 100%;" type="text"/> <span style="font-size: small;">указать на карте</span> Даты проживания <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/>		Профессия <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Периоды <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/> Интересы <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Школа <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Учебное заведение <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Служба в армии, участие в войнах: место <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> время <input style="width: 50%;" type="text"/> - <input style="width: 50%;" type="text"/> Участие в иных исторических событиях <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Награды <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/> Родство по схеме В. Бусыгина <input style="width: 100%;" type="text" value="Выберите"/>
---	--	--

Рис. 2. Структура базы первичных данных

Для определения сходства описываемых людей будем сравнивать признаки из каждого списка. При этом первые четыре сравниваются соответственно, а последние три – перебором. Перебором сравниваются места проживания людей. Для учета сходства введем информационные веса признаков, поскольку разные признаки имеют разную значимость информации.

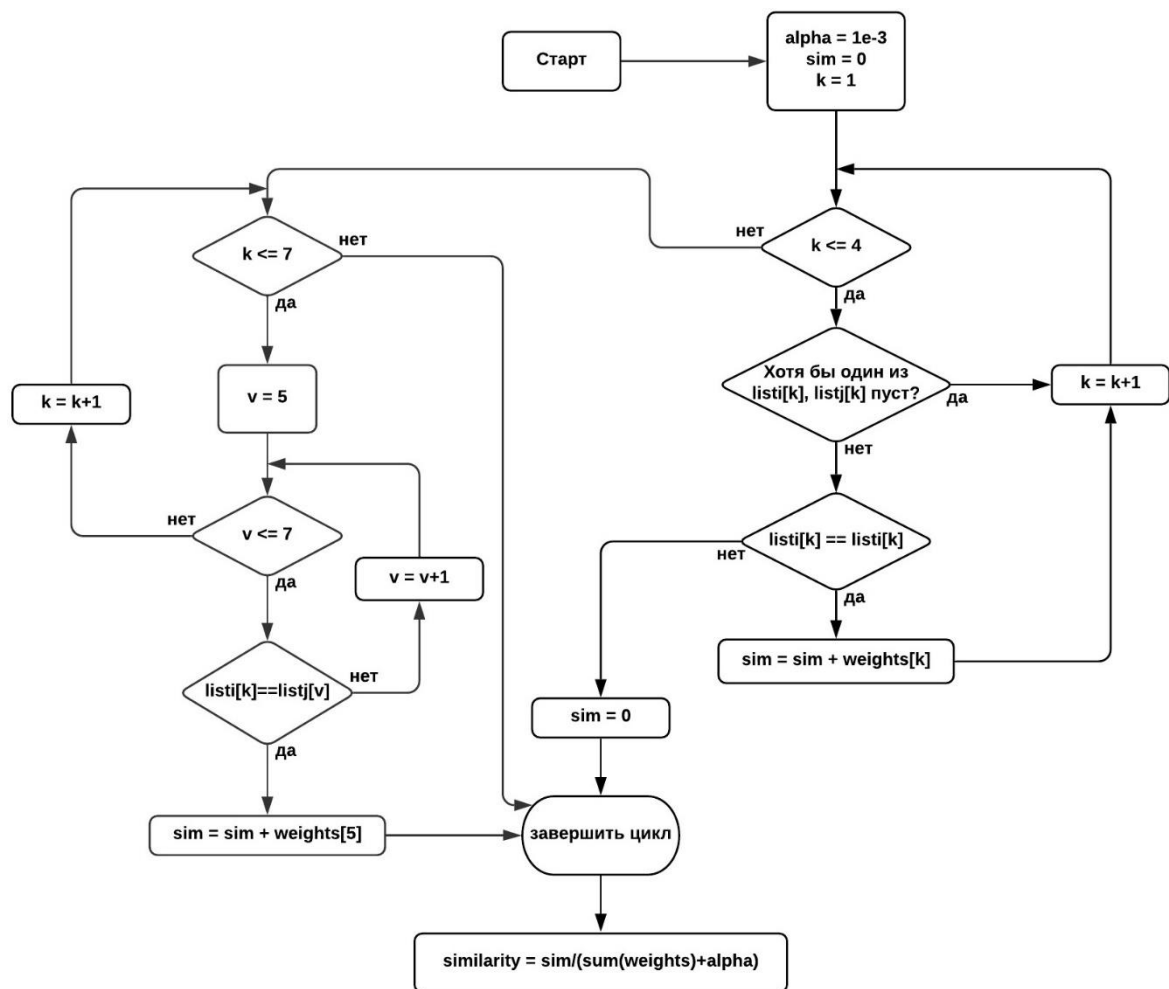


Рис. 3. Блок-схема основной части алгоритма поиска пересечения родоводов

Например, встретить разных людей с одним и тем же именем гораздо больше шансов, чем с одинаковой фамилией. Поэтому совпадение фамилии несет больший информационный вес.


Алгоритмом подсчитывается относительный информационный вес совпавших признаков. Если относительный вес превышает определенный порог, то это означает, что различные пользователи, вероятно, описали одного и того же прародителя. Далее алгоритм определяет, в каком родственном соответствии находятся данные пользователи, и приложение высылает им об этом сообщение.


Для установления родственных соответствий предлагается использовать матрицу (рис. 4). Если один и тот же прародитель первому пользователю приходится дедом (второй столбец), а второму – прадедом (третья строка), то первый пользователь по отношению ко второму является двоюродным дядей.


Для реализации задачи поиска родственников третьего и более кругов родства предлагается создание социальной сети «Родственники», которая кроме стандартных функций социальных сетей будет иметь специа-

лизированные функции: создание генеалогического древа, поиск пересечений генеалогических древ различных пользователей, рассылка пользователям сообщений о том, что они, вероятно, в  $n$ -ом круге родства друг с другом и в определенных родственных соотношениях.

	отец, мать	дед, бабушка	прадед, пра- бабушка	пра2дед, пра2бабка	пра3дед, пра3бабка
отец, мать	родные брат, сестра	родные племян- ники	двоюр. внуки	двоюр. пра- внуки	двоюр. пра2- внуки
дед, бабушка	родные дядя, тётка	двоюр. брат, сестра	двоюр. племян- ники	троюр. внуки	троюр. пра- внуки
прадед, пра- бабушка	двоюр. дядя, бабушка	двоюр. дядя, тётка	троюр. брат, сестра	троюр. племян- ники	4-юр. внуки
пра2дед, пра2бабка	двоюр. прадед, пра- бабушка	троюр. дед, бабушка	троюр. дядя, тётка	4-юр. брат, сестра	4-юр. племян- ники
пра3дед, пра3бабка	двоюр. пра2дед, пра2- бабушка	троюр. прадед, пра- бабушка	4-юр. дед, бабушка	4-юр. дядя, тётка	5-юр. брат, сестра

 первый  
родственный круг

 второй  
родственный круг

 третий  
родственный круг


 четвертый  
родственный круг

Рис. 4. Матрица родственных соответствий

Таким образом, в ходе работы над темой предложен способ оценки родства на основе матричного представления схемы Бусыгина. Также на схеме показано, какие именно ячейки входят в один и тот же круг родства. Предложена структура базы первичных данных для установления родственных соответствий между пользователями. Инновационным является указание места проживания прародителя не словесно-числовым адресом, а вводом области на карте. Предложен алгоритм для сравнения списков различных пользователей о своих прародителях и установления родственных соответствий между пользователями. На основании граф-схемы родственных связей В. Бусыгина нами составлена матрица родственных соответствий, по которой в алгоритме устанавливаются данные соответствия между пользователями. Предложена метрика, включающая информационные веса признаков, на основе которой алгоритм выдает сообщение пользователям о пересечении их родоводов.

#### Библиографические ссылки

1. Родословие: классификатор родственных связей [Электронный ресурс]. URL: <http://selvolostj.ru/ROD/rodstvo.html> (дата обращения: 24.04.2020).



# ТАРГЕТНЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

А. В. Синяков

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*AdmiralPike@mail.ru*

науч. рук. – В. В. Скакун, канд. физ.-мат. наук.

В данной работе рассмотрен таргетный анализ – метод анализа кривых затухания флуоресценции, позволяющий исследователю напрямую получать оценки кинетических скоростей и спектров флуоресценции, в отличие от классического анализа, в котором мы находим чисто математические косвенные параметры. Для проведения таргетного анализа кривых затухания флуоресценции был разработан алгоритм анализа и проведена его программная реализация в среде MATLAB. Проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют работоспособность разработанного алгоритма. Данный алгоритм прост для понимания, может быть легко модифицирован и может применяться в анализе данных, полученных путем флуоресцентной спектроскопии.

**Ключевые слова:** таргетный анализ; кривые затухания флуоресценции; спектры излучения; константы скорости флуоресценции.

В настоящее время флуоресцентные методы используются практически во всех областях науки. Наиболее важными параметрами флуоресцентных экспериментов являются спектры флуоресценции и кинетические скорости переходов атомов из одного состояния в другое. Для их определения производится измерение кривых затухания флуоресценции.

Рассмотрим интенсивность флуоресценции в зависимости от времени при определённой длине волны регистрации  $\lambda_i$  и возбуждения на длине волны  $\lambda_{exe}$ . Если система многокомпонентная, то измеренный сигнал представляет собой свертку функции отклика оборудования и многоэкспоненциального закона затухания:

$$I_{изм.} = I(t, \lambda_{exe}, \lambda_i) * IRF,$$

$$I(t, \lambda_{exe}, \lambda_i) = \sum_{j=1}^n A_j(\lambda_{exe}, \lambda_i) \cdot \exp(-t / \tau_j), \quad (1)$$

где *IRF* – отклик оборудования

В классическом раздельном способе анализа кривых затухания мы получаем набор  $2n$  параметров,  $n$  амплитуд  $A_j$  и  $n$  времен жизни  $\tau_j$  для каждой длины волны  $\lambda_j$ . В глобальном (иначе, совместном) анализе производится связывание параметров, принимающих одинаковые значения на всех длинах волн. Уменьшение количества оцениваемых параметров значительно увеличивает эффективность их оптимизации.

К сожалению, выражение (1) содержит не физические параметры системы (константы скоростей перехода и спектры флуоресценции), а параметры, являющиеся функциями от скоростей перехода и спектров. Более предпочтительным является метод таргетного (целевого) анализа, когда выражение (1) преобразовано к виду, содержащему непосредственно параметры физической системы. Преимущества метода весьма существенны. Во-первых, мы извлекаем только минимально необходимый набор параметров, которые представляют реальный интерес для понимания функционирования системы. Можно зафиксировать в известные значения отдельные скорости перехода и значения спектра. Второе преимущество – это радикальное изменение принципа анализа данных, где решение обратной задачи математики с целью получения косвенных параметров заменяется реальным тестированием физических или химических моделей.

Физическими параметрами, представляющими интерес, являются спектры излучения, которые фактически являются реальными спектрами излучения (SAES – species-associated emission spectrum) и константы скорости флуоресценции  $k_{ij}$ . Дадим определение матрицы переходов

$$T = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$$

где  $T_{ij}$  – константы перехода  $k_{ij}$ , такие что

$$T_{ii} = T_{li} + \sum_{j=2; (j \neq i)}^N T_{ji}$$

$n$  – число компонент системы. Выражение для интенсивности  $I(t, \lambda_{exc}, \lambda_i)$  можно записать следующим образом:

$$I(t, \lambda_{exc}, \lambda_i) = \sum_{j=1}^n \exp^{\gamma_j t} \cdot \sum_{k=1}^n S_k(\lambda_i) (U^{-1} \cdot \mathbf{r}(\lambda_{exc}))_j \cdot U_{jk} \quad (2)$$

где  $U$  – матрица собственных векторов матрицы  $T$ ,  $\gamma_j$  –  $j$ -ое собственное значение матрицы  $T$ ,  $S_k(\lambda_i)$  – вектор SAES для каждой компоненты.

Система уравнений (2) полностью описывает взаимосвязь между измеряемой интенсивностью флуоресценции в зависимости от длин волн возбуждения и испускания и константами скоростей переходов системы с одной стороны, и SAES с другой. Связь между собственными значениями матрицы  $T$  и временами затухания задается простым выражением

$$\gamma = -1 / \tau$$

Для проведения таргетного анализа кривых затухания флуоресценции был разработан алгоритм глобального анализа данных, реализующий модель, определяемую выражением (2). Затем была проведена программная реализация разработанного алгоритма в пакете прикладных программ MATLAB с использованием встроенных функций на основе нелинейного метода наименьших квадратов и алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта. Для решения задачи оптимизации использовалась функция `lsqcurvefit`, в которой реализованы ограничения на параметры модели. Для нахождения собственных векторов и собственных значений использовалась функция `eig`, а для нахождения обратной матрицы использовалась функция `inv`. Целевым критерием для минимизации была выбрана сумма квадратов разностей между реальными значениями и полученными по формуле (2).

Для тестирования разработанного алгоритма использовалась имитационная модель кривых затухания флуоресценции, предоставленная лабораторией фотосинтеза Независимого университета Амстердама. Для проверки работы алгоритма были смоделированы 6 кривых на длинах волн возбуждения 669, 673, 677, 681, 685, 689 нм. Матрица констант переходов представлена в табл. 1. Кривая отклика оборудования моделировалась на основе распределения Гаусса. Свертка кривой отклика с кривой затухания производилась встроенной функцией `conv`.

Таблица 1

Матрица начальных приближений констант переходов

0,3	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
0,0	2,0	0,9	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,3	10	0,0
0,0	0,0	0	20	0,0	50
0,0	0,0	0,0	0,0	40	60

Нижние границы параметров были установлены в 0, так как с точки зрения физики отрицательные константы переходов и константы излучения смысла не имеют. Верхние границы установлены в  $10^6$ . Начальные приближения для констант переходов и векторов SAES выбирались случайным образом, но с соблюдением порядка величины. Начальное значение целевого критерия составило 370,8760. После работы алгоритма значение целевого критерия составило  $1,6214 \cdot 10^{-4}$ . Результаты анализа сведены в табл. 2 и 3. На рисунке представлены полученные кривые на длинах волн возбуждения 669, 677, 689 нм и соответствующие им графики остатков.

Представленные графики остатков и значение целевого критерия оптимизации подтверждают корректность разработанного алгоритма.

Таблица 2

## Оптимизированные SAES

Длина волны возбуждения	SAES для каждой компоненты					
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я
669 нм	0,6504	0	0	0,0010	0,2162	0
673 нм	0,8375	0	0	0,0012	0,367	0
677 нм	0,9623	0	0	0,0019	0,556	0
681 нм	0,997	0	0	0,0042	0,7598	0
685 нм	0,917	0	0	0,0099	0,9218	0
689 нм	0,7556	0	0	0,0218	1,0017	0

Таблица 3

## Матрица оптимизированных констант скоростей переходов

0,2974	1,9988	0,0001	0	0,0246	0
4,4943	0,0011	1,0002	0	0	0
0,0027	1,9995	0,9	0	0	0
0	0	0,0001	0,2997	9,8555	0
0	0	0	19,9698	0,093	50,5212
0	0	0	0	39,9664	59,6298

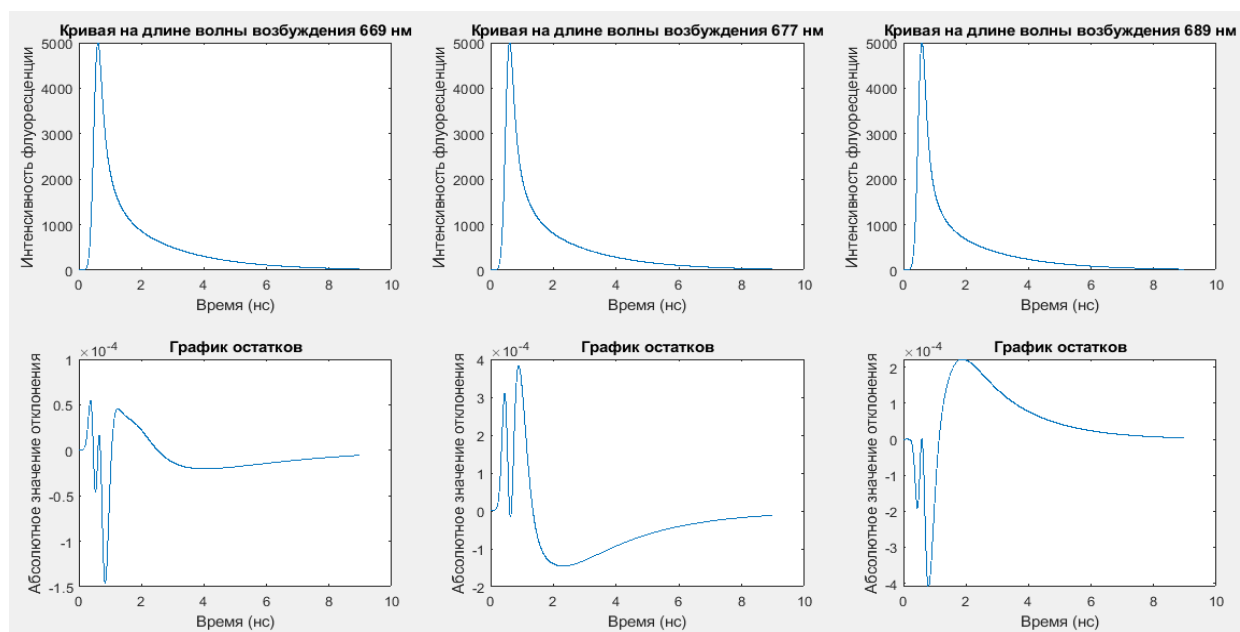


Рис. 1 Кривые затухания и соответствующие им графики остатков

## Библиографические ссылки

1. Holzwarth A.R. Data Analysis of Time-Resolved Measurements. Biophysical Techniques in Photosynthesis. Vol 3. Springer, Dordrecht. 1996. P. 2-12.
2. Beechem JM, Ameloot M, Brand L Global analysis of fluorescence decay surfaces: Excited-state reactions. Chem Phys Lett. 1985. P. 466-472.
3. Beechem JM, Ameloot M, and Brand L (1985b) Global and target analysis of complex decay phenomena. Anal Instrum. P. 379-402.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА С 3R-РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

А. И. Смягликова

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

*alya.styaglikova@mail.ru*

*науч. рук. – А. В. Поляков, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Разработана математическая модель для исследования характеристик волоконно-оптических динамических запоминающих устройств с 3R-регенерацией. Получены зависимости времени хранения информации от различных параметров для скорости поступления информации 10 Гбит/с. Исследована зависимость информационной емкости устройства от скорости поступления информации.

**Ключевые слова:** спутниковая лазерная связь, волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство, 3R-регенерация, информационные параметры.

## ВВЕДЕНИЕ

При высокоскоростной передаче информации необходимо использовать специализированные быстродействующие буферные запоминающие устройства, позволяющие избежать потерь оптической информации при ее доставке конечному потребителю. Одним из перспективных направлений решения подобных задач является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств (ВОДЗУ) с использованием DWDM-технологии. Для увеличения времени хранения информации при заданной вероятности ошибки применяется технология восстановления оптических импульсов по амплитуде, длительности и временному положению, что называется 3R-регенерацией.

## ПАРАМЕТРЫ ВОДЗУ С 3R-РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

Время хранения информации рассчитывали по следующей формуле:

$$t_{xp} = T \cdot N + T_R N_R, \quad T = nL/c, \quad T_R = nL_R/c,$$

где  $T$  – период рециркуляции,  $T_R$  – период регенерации,  $N$  – количество циклов рециркуляции,  $N_R$  – количество регенераций,  $L$  – длина волоконно-оптического контура хранения информации,  $L_R$  – оптоволоконное нелинейное оптическое кольцевое зеркало (НОКЗ). Из [1] следует, что нет необходимости восстанавливать длительность импульсов на каждом цикле рециркуляции, достаточно осуществлять регенерацию только то-

гда, когда длительность циркулирующих импульсов достигает величины 0,6 длительности тактового интервала.

Количество циклов рециркуляции  $N$  определялось из следующих условий:

1) значение вероятности ошибки при приеме информационных сигналов в битовом формате ( $BER$  – bit error rate) должно удовлетворять условию  $BER \leq BER_0 = 10^{-9}$ ;

2) длительность циркулирующих импульсов  $\tau$  не должны превышать величины тактового интервала  $T_i$ , а точнее  $\tau < 0,6T_i$ .

Величина  $BER$  определяется величиной  $\xi$  отношения сигнал/шум:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\xi}}{2\sqrt{2}} \right).$$

Формула для расчета отношения сигнал/шум включала дробовые шумы лавинного фотодиода  $N_{др}$ , флуктуации интенсивности излучения инжекционного лазера  $N_{лаз}$ , тепловые шумы нагрузочного сопротивления фотоприемника  $N_{теп}$ , шумы на выходе линейного эрбиевого оптического усилителя EDFA<sub>1</sub>  $N_{ус1}$ , усилителя мощности EDFA<sub>2</sub>  $N_{ус2}$ , усилителя НОКЗ EDFA<sub>3</sub>  $N_{ус3}$ , а также шумы, связанные с флуктуациями фототока, вызванными биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением  $N_{с-ASE}$ . Считая эти источники шумов независимыми случайными величинами, выражение для расчета отношения сигнал/шум представили в следующем виде:

$$\xi = \frac{(P'_{вых} S_{\lambda} M)^2 \cdot R_{нагр}}{N_{др} + N_{лаз} + N_{теп} + N_{ус1} + N_{ус2} + N_{ус3} + N_{с-ASE}},$$

где  $P'_{вых}$  – мощность излучения на входе фотодетектора;  $S_{\lambda}$  – спектральная чувствительность фотоприемника (для InGaAs-фотодиодов  $S_{\lambda} \approx 0,9$  А/Вт);  $M$  – коэффициент лавинного умножения фотодиода;  $R_{нагр}$  – величина нагрузочного сопротивления (для наилучшего согласования распространения сигналов в электрическом тракте, как правило,  $R_{нагр} = 50$  Ом).

Коэффициент усиления линейного волоконного эрбиевого усилителя  $G_1$  должен компенсировать потери мощности излучения в волоконно-оптической петле на каждом цикле рециркуляции.

На рис. 1 представлен график зависимости времени хранения информации от длины оптоволоконной петли для скорости передачи 10 Гбит/с. Наибольшее время хранения наблюдается при длине волоконно-оптического контура, равной 83 км. Дальше время хранения достаточно резко падает. Наличие максимума на графиках объясняется тем, что коэффициент усиления EDFA<sub>1</sub>, как правило, не превышает 30 дБ и при

увеличении длины волокна усилитель уже не полностью компенсирует потери оптической мощности в петле.

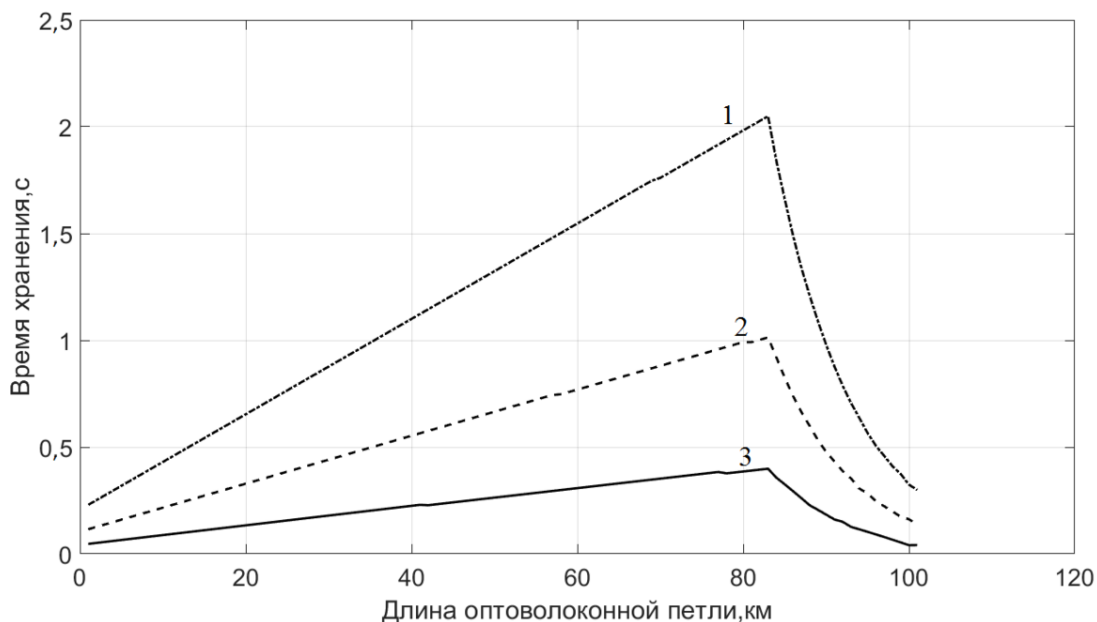


Рис. 1. Зависимость времени хранения информации от длины оптоволоконной петли при скорости поступления информации 10 Гбит/с, пиковая мощность излучения лазера равна: 1 – 2 мВт, 2 – 5 мВт, 3 – 10 мВт

Зафиксировав длину оптоволоконной петли на 83 км, на рис. 2 представили рассчитанную зависимость времени хранения информации от коэффициента усиления усилителя мощности для пиковой мощности лазера 14 мВт. Из графика следует, что при  $G_2 > 15$  дБ коэффициент усиления уже практически не влияет на время хранения, поскольку рост мощности полезного сигнала начинает компенсироваться суммарным ростом шумовых источников.

Проблема увеличения времени динамического хранения информации в контуре ВОДЗУ находится в неразрывной связи с вопросом информационной емкости этого контура, которая описывается формулой:

$$W = kBLn / c ,$$

где  $k$  – число спектральных информационных каналов.

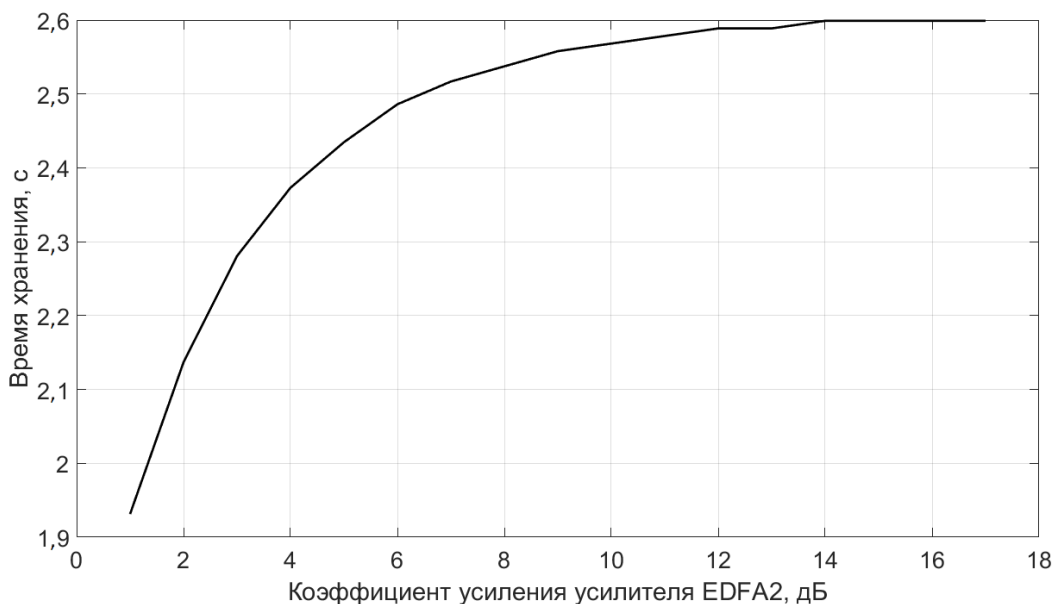


Рис. 2. Зависимость времени хранения информации от коэффициента усиления усилителя мощности; длина оптоволокна  $L = 83$  км

Из проведенных расчетов следует, что информационная емкость линейно растет с увеличением скорости и достигает  $W=15$  Мбайт при  $B = 10$  Гбит/с,  $L = 83$  км и  $k = 32$ , однако при этом время хранения информации при заданной вероятности ошибки уменьшается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанной математической модели проведен многопараметрический анализ процесса рециркуляции информационного потока в волоконно-оптическом динамическом запоминающем устройстве с 3R-регенерацией.

Полученные зависимости влияния элементов контура на предельно достижимые информационные характеристики при заданной вероятности ошибки позволяют выбрать оптимальные параметры конструируемого устройства и улучшить работу ВОДЗУ.

### Библиографические ссылки

1. Смягликова, А. И. Влияние нелинейных эффектов на информационные параметры оптоволоконных рециркуляционных запоминающих устройств на основе DWDM-технологии / А. В. Поляков, А. И. Смягликова // Квантовая электроника: Материалы XII межд. научн.-техн. конф., Минск, 18–22 ноября 2019г. / БГУ, НИИПФП им. А. Н. Севченко. Минск, 2019. С. 171–173.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЧАСТИЧНЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

**Р. И. Хомюк, В. В. Милошевский**

*Белорусский Государственный Университет, г. Минск;*

*romakhoty@mail.it@mail.ru;*

*науч. рук. – В. М. Борздов, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Разработаны алгоритм и программа численного моделирования дрейфовой скорости электронов в GaAs в сильных электрических полях многочастичным методом Монте-Карло с использованием пакета MATLAB. Разработанные алгоритм и программа позволили рассчитать зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности приложенного электрического поля с учетом основных механизмов рассеяния носителей заряда в полупроводниковом материале.

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло; GaAs; перенос электронов; рассеяние.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одним из наиболее эффективных методов исследования кинетических явлений в объёмных полупроводниках и полупроводниковых приборных структурах является численный метод Монте-Карло [1, 2]. Целью данной работы была разработка алгоритма и программы для расчета многочастичным методом Монте-Карло дрейфовой скорости электронов в GaAs в сильных электрических полях.

## МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО

Метод Монте-Карло – статистический метод численного моделирования, позволяющий численно, непрямым методом решать уравнение Больцмана, характеризующее перенос носителей заряда с учётом точного описания зонной структуры полупроводников.

При моделировании переноса ансамбля носителей заряда вероятностным образом определяется начальное состояние каждого носителя, после чего в определенные моменты времени фиксируется состояние носителя заряда в материале полупроводника в процессе переноса. Механизм рассеяния для каждого акта выбирается также статистически, исходя из вероятностей для каждого механизма и суммарной вероятности рассеяния носителя.

В случае модели с несколькими доминирующими механизмами рассеяния  $N$  для каждого механизма априори рассчитывается интенсивность рассеяния  $W$  (вероятность рассеяния в единицу времени) носителя

заряда по данному механизму. Далее все интенсивности суммируются и выбирается некоторое значение частоты рассеяния  $\Gamma$ , которое соответствует максимальной суммарной интенсивности для всего диапазона рассматриваемых энергий. Зная величину  $\Gamma$ , легко определить время свободного пробега носителя  $t$ . В конце свободного пробега случайным образом на отрезке от 0 до  $\Gamma$  разыгрывается механизм для текущего акта рассеяния и определяется новый волновой вектор и соответствующие углы после рассеяния. В случае попадания в диапазон от  $W_N$  до  $\Gamma$  полагается, что произошло саморассеяние, при котором кинетические параметры частицы не изменяются. В общем же случае генерируется равномерно распределенная на интервале  $[0, 1]$  величина  $r$ , и если  $W_i(E)$  – интенсивность рассеяния для  $i$ -го механизма, то согласно неравенству

$$\sum_{i=1}^j W_i \leq r * \Gamma < \sum_{i=1}^{j-1} W_i$$

выбирается механизм рассеяния с индексом  $j$ . При этом важно отметить, что в случае использования многочастичного метода Монте-Карло, в котором, в отличие от одночастичного, рассматривается модель достаточно большого числа крупных частиц (не менее 5000 электронов), усреднение ведётся не по времени, как в одночастичном методе, а по ансамблю в определенные моменты времени. Также следует иметь в виду, что в многочастичном методе состояния носителей статистически накапливаются как через равные промежутки времени, так и перед каждым рассеянием. Таким образом, в связи с тем, что многочастичный метод требует решения большего числа уравнений движения, он является более ресурсоемким и сложным в реализации, чем одночастичный метод.

## РАСЧЕТ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ

Как было сказано выше, рассеяние носителей происходит с учётом определенных, наиболее значимых механизмов. В данной работе в алгоритм были включены следующие механизмы рассеяния: рассеяние на акустических и полярных оптических фононах, междолинное рассеяние, рассеяние на ионах примеси и ударная ионизация. Формулы для расчета интенсивностей рассеяния в арсениде галлия взяты из [2, 3, 4]. Наиболее значимые приближения, сделанные в построенной модели, были следующие:

- Так как энергия акустических фононов крайне мала, то рассеяние можно считать упругим, поэтому угловое распределение для данного механизма можно считать равновероятным.

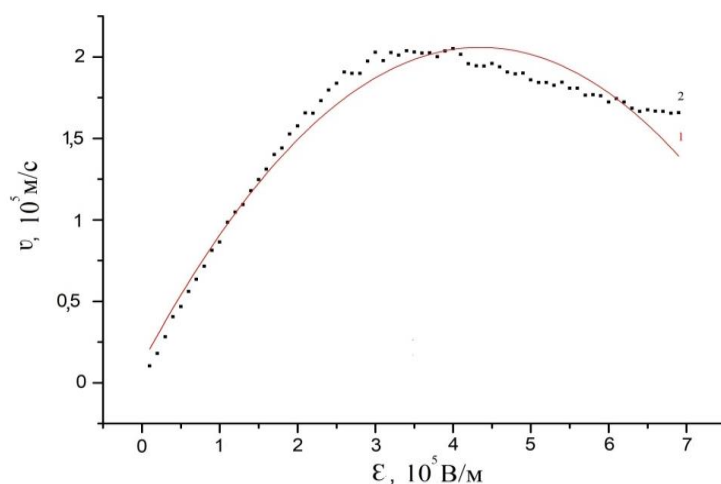
- Для междолинного рассеяния рассматривалась не строгая трехмерная модель зонной структуры GaAs, состоящая из центральной  $\Gamma$ -долины и шести сателлитных  $L$ -долин, а упрощенная одномерная модель, в которой одна зона (зона I) соответствует центральному минимуму, а другая зона (зона II) составляет в совокупности шесть объединенных сателлитных минимумов. Также учтено, что электрическое поле может сообщать электронам энергию, большую, чем 0,36 эВ, и они могут рассеиваться в одну из  $L$ -долин (зону II) с большей эффективной массой.

- Для расчета интенсивности рассеяния на ионах примеси было использовано приближение Брукса-Херринга [2].

- Интенсивность ударной ионизации была рассчитана в соответствии с формулой (моделью) Келдыша [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработанные в данной работе алгоритм и реализующая его программа для расчета дрейфовой скорости электронов в GaAs методом Монте-Карло показали хорошее согласие полученных нами результатов с экспериментальными результатами, взятыми из [4]. На рисунке в качестве примера приведена рассчитанная зависимость дрейфовой скорости электронов  $v$  в нелегированном GaAs от величины напряженности электрического поля  $\mathcal{E}$  в диапазоне от 0 до  $7 \cdot 10^5$  В/м при температуре 300 К.



*Рис. 1.* Зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в нелегированном GaAs при температуре 300 К: кривая 1 показывает экспериментальные результаты, взятые из [4]; точками 2 представлены результаты моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий анализ полученных в работе результатов позволяет сделать следующие выводы:

- При температуре 300 К переходы из центральной в  $L$ -долины в легированном GaAs наблюдаются при напряженности электрического поля, равной приближённо 0,3 МВ/м, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными для GaAs [4].

- Разработанные алгоритм и программа позволяют помимо дрейфовой скорости рассчитывать и другие кинетические параметры (среднюю энергию, подвижность и др.), описывающие перенос носителей заряда в GaAs в сильных электрических полях при различных температурах и концентрации легирующей примеси.

### Библиографические ссылки

1. Борздов В. М., Жевняк О. Г., Комаров Ф. Ф., Галенчик В. О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. Минск: БГУ 2007.
2. Иващенко В. М., Митин В. В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло. Киев: Наукова думка, 1990.
3. Ридли Б. К. Квантовые процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1986.
4. Шур М. Физика полупроводниковых приборов, Т1. М.: Мир, 1992.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е. Л. Цалко

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*katrin.tsalko@gmail.com;*

*науч. рук. – В. С. Садов, канд. техн. наук, доц.*

Уже достаточно давно существует потребность в создании автоматизированных систем распознавания эмоций. И на сегодняшний день такие технологии уже применяются во многих сферах жизни. Целью данной работы было провести анализ уже существующих систем распознавания эмоций с помощью методов машинного обучения, выявить их достоинства, а также предложить решение по устранению недостатков. Также в рамках данной работы были описаны модели классификации эмоций, выявлен общий алгоритм работы систем распознавания эмоций и предложен собственный алгоритм по распознаванию эмоций на основе сиамской нейронной сети. Данный алгоритм решает проблему больших обучающих выборок, поскольку обучается всего на нескольких изображениях.

**Ключевые слова:** сиамская нейронная сеть; методы машинного обучения; распознавание эмоций; модель классификации эмоций; система кодирования лицевых движений.

Среди существующих методов классификации эмоций наиболее распространенными являются три подхода: дискретный, многомерный и гибридный. Дискретный подход формирует семантическое поле с определенным набором значений для каждой эмоции в отдельности («Атлас эмоций» Пола Экмана [2], 5 базовых эмоций). Многомерный: описывает эмоции в многомерном пространстве с помощью набора значений выбранных параметров («Двумерное пространство модели эмоций Дж. Рассела», параметры: сила и знак эмоции). Гибридный метод представляет собой слияние многомерного и дискретного подходов. В нем любая эмоция может быть рассмотрена как отдельное состояние, так и как часть многомерного пространства. Как пример можно привести модель «Песочных часов эмоций». На основе дискретного метода и теории профайлинга была создана «Система кодирования лицевых движений», которая представлена в виде таблицы. Данная система позволяет закодировать конкретное выражение лица путем создания его модели из так называемых единиц действия. Также была создана «Эмоциональная система кодирования лицевых движений». Где каждой эмоции ставится в соответствие уже целая формула, а не числовое значение.

Анализ современных продуктовых решений показал, что описанные системы кодирования успешно применяются в уже существующих си-

стемах распознавания эмоций. В табл. 1 представлены основные сведения о рассматриваемых программах.

Таблица 1

**Системы распознавания эмоций**

Название ПО	Информация о компании	Возможности ПО	Преимущества	Недостатки
Face Reader	Компания: Noldus Information Technology (Нидерланды)	Используя видеосъёмку лиц, программа умеет распознавать базовые эмоции, пол, возраст и этническую принадлежность.	Средний процент распознавания основных эмоций – 89%; воспринимает любой наклон лица в плоскости изображения; есть возможность определять эмоции в реальном времени; хорошая визуализация (диаграммы и гистограммы эмоций)	Программа не распознает людей в очках; программа по-разному воспринимает людей с разным цветом кожи; повернутое лицо не детектируется.
EMotion Software GladOrSad	Компания – разработчик: Visual Recognition (Нидерланды)	Система создает 3D модель лица с выявлением 12 ключевых областей, таких как уголки глаза и уголки рта.	Распознает гнев, печаль, страх, удивление, отвращение и счастье. ПО не требовательно к вычислительной машине.	Неизвестны детали алгоритма реализации (недостатков не выявлено)
FaceSecurity	Компания – разработчик: Cognitec (Германия) Текущая версия: 4.6	Разработка предназначена для обработки уникальных баз и банков данных какой-либо категории людей, к примеру, сотрудников по работе. Система воплощает биометрическую идентификацию по эталону образцов из базы.	Кластерная конфигурация; сортировка списка изображений людей; доступны поисковые выборки	Не распознают плохо освещенные лица; распознавание только фронтально расположенных лиц

Помимо этого, удалось выявить общий алгоритм работы данных систем. Он состоит из четырех этапов: поиск лица на фотографии. (Наиболее популярный и эффективный алгоритм – это «Метод Виолы-Джонса»); создание 2D/3D-модели лица (контрольные точки, шаблон/деформируемая маска); выявление признаков с помощью алгоритма глубокого обучения; классификация признаков.

Больше всего внимания привлекает программа FaceReader [3], потому что она соответствует множеству критериев качества: имеет достаточно высокую скорость обнаружения признаков, базу данных, распознает лица при наклоне или повороте головы и других изменяющихся условиях.

Также компания-разработчик этого продукта не так давно выпустила программу, которая распознает эмоции детей от шести до двадцати четырех месяцев. Программа называется Baby FaceReader. Распознавание эмоций у детей, а тем более у младенцев – достаточно сложная задача.

Baby FaceReader была разработана как современная система автоматического определения выражений лица у младенцев, чтобы помочь решить вопросы психологии развития, связанные с аффективными расстройствами и расстройствами развития, такими как расстройство аутистического спектра и синдром дефицита внимания и гиперактивности [3]. Эта технология может помочь выявить данные нарушения еще в раннем возрасте.

На основе изученного материала мною был предложен собственный алгоритм распознавания эмоций. Схема алгоритма показана на рис. 1.

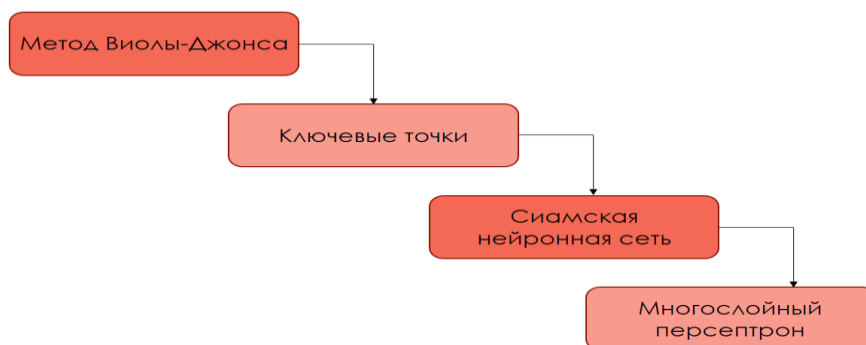


Рис.1. Блок-схема алгоритма

Основная его особенность заключается в том, что объектом глубокого обучения является сямская нейронная сеть, которая ранее не использовалась для решения задачи распознавания эмоций.

Использование данной сети позволит: сократить обучающую выборку, ускорить процесс обучения и сократить количество потребляемых ресурсов.

Принцип работы сямской нейросети достаточно простой. Создаются две одинаковые нейронные сети. На входе каждая подсеть принимает одно из двух сравниваемых изображений. За входным слоем следует последовательность свёрточных слоев, они выявляют характерные признаки каждого из изображений. На выходе каждой из подсетей формируется вектор параметров (признаков), и в самом конце сеть сравнивает два выходных вектора, определяя, похожи два изображения или нет.

Предположим, что изначально данный алгоритм сможет распознавать только эмоцию радости на лице. Тогда для обучения потребуется три изображения: якорное изображение – шаблонный эталон эмоции радости, позитивное изображение, также показывающее радость и негативное изображение, но максимально похожее на эмоцию радости, в данном случае это нейтральное лицо. Далее алгоритм полностью повторяет работу, как и при распознавании лиц.

Триплет потерь минимизирует расстояние между якорным и позитивным изображениями, которые иллюстрируют одинаковую

эмоцию (эмоцию радости), а расстояние между якорным и негативным изображениями, наоборот, максимизирует (рис. 2). Подобным образом можно обучить интеллектуальную систему распознавать все семь базовых эмоций.



Рис.2. Обучение сямской нейросети

Основные преимущества и недостатки алгоритма и дальнейшая перспектива развития представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные сведения об алгоритме**

Преимущества	Недостатки	Перспектива развития
Небольшая обучающая выборка	Менее точный	Приложения для бизнес-компаний количеством сотрудников до 600 человек
	Сложная структура сети затрудняет анализ	
Распознавание эмоций индивидуально для каждого человека	Невозможность переобучения	Приложения для детей, страдающих расстройствами аутистического спектра
	Ограничение на количество распознаваемых лиц	

Разработка алгоритмов по распознаванию эмоций требует не только большого количества знаний в области эмоциональных вычислений, но и относительно продолжительного промежутка времени. Необходимо провести детальный анализ, чтобы учесть всевозможные особенности данного вида сетей и в дальнейшем избежать непредвиденных ситуаций.

**Библиографические ссылки**

1. The official web site «Atlas of Emotions». URL: <http://atlasofemotions.org/#continents/> (date of access: 19.05.2020)
2. The official web site of Noldus Information Technology. URL: <https://www.noldus.com/facereader> (date of access: 19.05.2020)



# МОБИЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА С КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

А. Д. Шиманская

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anastasia.shymanskaya@gmail.com;*

*науч. рук. – И. О. Митрахович, ст. преп.*

Статья описывает процесс создания и тестирования роботизированной платформы с комплексной программой управления движением самоходным транспортным средством, включающей в себя различные приёмы, алгоритмы и средства обеспечения выполнения платформой текущих задач, поставленных пользователем, как в условиях присутствия, так и отсутствия управляющих сигналов, а также взаимодействие нескольких платформ между собой в рамках выполнения одного задания пользователя.

**Ключевые слова:** инерциальная навигация; алгоритм обхода препятствий; мультиагентная система; самодвижущийся наземный аппарат; управление движением.

Под навигацией в широком смысле слова будем понимать теорию и технику вождения движущегося объекта по заданной траектории. Под первичной информацией понимается информация о поступательном движении центра масс и об угловом движении, получаемую с помощью датчиков и измерительных приборов [1, с. 9]. Среди навигационных систем большое место занимают инерциальные. В системах такого рода текущая первичная информация получается от инерциальных датчиков. Инерциальные датчики измеряют тем или иным образом ускорение и вращение той системы координат, в которой они установлены [1, с. 10-11]. Недостатком инерциальной системы навигации, кроме высокой стоимости оборудования, являются ошибки, которые накапливаются с течением времени. Для их коррекции создаются интегрированные навигационные системы, где данные, получаемые от инерциальной навигационной системы, дополняются данными, поступающими от неавтономных систем, например спутниковой навигации. В данной работе планируется использование именно интегрированной системы, так как её основными достоинствами являются довольно высокая точность и глобальность действия, а также высокие темпы и перспективы развития.

Для реализации проекта воспользуемся общим алгоритмом, представленным схемой на рисунке.

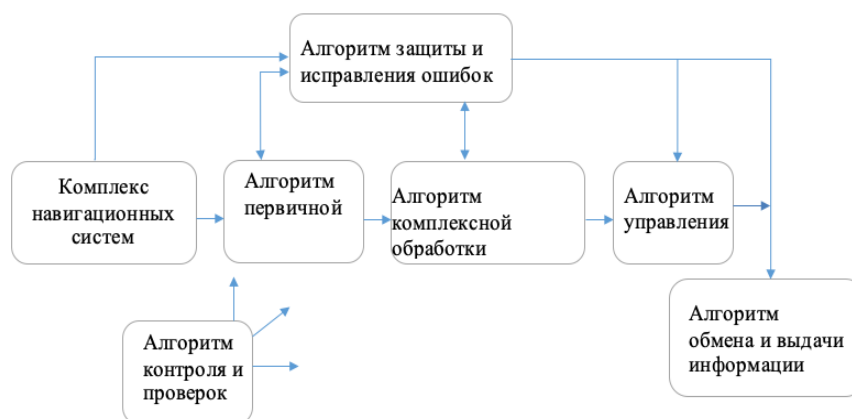


Рис. 1. Структурная схема общего алгоритма

Каждая из перечисленных групп алгоритмов имеет свои чётко определённые функции. Рассмотрим подробнее некоторые из них.

Алгоритмы первичной обработки и преобразования информации выполняют АЦП первичной информации, усреднение показаний однотипных или избыточных измерителей и сглаживание измерений, то есть усреднение по времени. Алгоритмы комплексной обработки информации предназначены для повышения точности и надёжности определения пилотажных и навигационных параметров, выдаваемых комплексом ориентации и навигации при заданном составе измерителей с учётом конкретной навигационной обстановки. Алгоритмы обмена и выдачи информации осуществляют связь с внешними устройствами – индикаторами, управляющими устройствами [2, с. 53-54].

В условиях отсутствия основного внешнего управляющего сигнала движение прототипа будет осуществляться под управлением внутреннего алгоритма, вычисляющего вектор направления к целевой точке исходя из данных о геолокации, получаемых от ГНСС-модуля, а в случае их отсутствия – с помощью алгоритма инерциального управления, вычисляющего вектор направления на целевую точку исходя из последнего известного местоположения прототипа на местности. Данные алгоритмы будут включать блок фильтрации некорректных данных о геолокации для предотвращения ошибок вычисления вектора направления в условиях неустойчивого приема ГНСС-сигнала и блок корректировки направления и продолжительности движения в зависимости от поступившей информации от датчиков и данных о геолокации.

## **АЛГОРИТМ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ, ПОДКЛЮЧЕНИЕ ШИРОКОГО СПЕКТРА ДАТЧИКОВ**

Для обеспечения устойчивого безопасного движения прототипа при отсутствии прямого внешнего управления, предусмотрен модуль обхода

препятствий, исполненный на отдельном микроконтроллере и имеющий приоритет исполнения в условиях инерциального движения перед основным алгоритмом и оператором. Таким образом, модуль обхода препятствий будет включаться в управление движением прототипа по критическим значениям сигналов датчиков и выключаться после прихода этих значений к установленным нормам, передавая управление движением прототипа основному алгоритму или оператору.

В целях своевременного информирования прототипа о препятствии необходимо укомплектовать его набором различных датчиков, а для обеспечения автономности необходимо оборудовать прототип солнечными панелями, которые накапливают заряд, если показания датчика освещённости находятся в нормальных пределах. При разрядке аккумулятора прототипа до определённого уровня, используется заряд, накопленный заранее. Для реализации алгоритма обхода препятствий будет использоваться метод гипотезы и теста в совокупности с нечёткой логикой, руководствуясь таблицей нечётких правил.

*Таблица*

**Нечеткие правила**

Направление	Дистанция			
	очень близко	близко	далеко	очень далеко
лево	резко вправо	резко влево	влево	прямо
прямо	резко влево	влево	влево	прямо
право	резко влево	резко влево	влево	прямо

Таким образом, прототип будет работать по следующему принципу: данные от сенсоров о расстоянии до препятствия и направление к нему фазифицируются, обрабатываются согласно табличным правилам, дефазифицируются, и полученные данные, в виде управляющих сигналов, поступают на приводы робота.

В дополнение к вышеописанным алгоритмам, в прототипе будет реализован процесс взаимодействия с подобными устройствами через wi-fi модуль. В качестве модели взаимодействия будет использоваться «пчелиный рой». Цель использования этого метода – добиться следующего поведения: при подаче управляющего сигнала на главенствующий прототип, все агенты системы должны начать движение на базовую станцию; при выполнении сценария «разведка» прототипы должны иметь возможность обмениваться результатами поиска и устремляться в зону повышенной концентрации интересующих нас объектов (веществ, явле-

ний), либо, напротив, исключить из своего маршрута области, уже исследованные или выбранные к исследованию другими прототипами, входящими в «рой».

Для расширения спектра применимости данной разработки, необходимо минимизировать неблагоприятные воздействия на датчики. Для этого надо соблюсти два условия: минимизация металлических, экранирующих деталей и деталей, обладающих электромагнитными свойствами, а также максимальное разнесение принимающих датчиков и источников помех. Так как, имеющиеся в продаже платформы подходящих размеров, в своей конструкции используют значительное количество металлических деталей, либо не обладают достаточной проходимостью на местности, было принято решение создать платформу самостоятельно.

Платформа была смоделирована при помощи программ SketchUp и 3ds Max. Крайне важно было выбрать достаточно прочный и лёгкий материал, который максимально не подвержен воздействию окружающей среды и ультрафиолетовому излучению. В результате прототип представляет из себя платформу на гусеничном ходу, напечатанную в основном из пластика PETG, функциональные же части, требующие большей прочности, напечатаны из Nylon. Использование такой комбинации на текущий момент показало себя наилучшим образом при подключении моторов и проверке платформы на прочность.

Итогом работы стало изучение принципов инерциальной навигации, особенностей работы различных датчиков по-отдельности и в составе интегрированной инерциальной системы. Проведён подбор необходимых для работы измерителей, для последующего создания алгоритма обхода препятствий. Разработан и создан прототип-демонстратор платформы для наземного дрона на гусеничном ходу с минимизацией использования металлических деталей. Проанализированы и выбраны материалы для 3D-печати, которые удовлетворяют эксплуатационным запросам прототипа. Кроме того, описаны и изучены возможности кооперации нескольких прототипов в мультиагентные системы с использованием метода «пчелиный рой».

#### **Библиографические ссылки**

1. *В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский.* Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1992.
2. *Б.С. Алёшин, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморский.* Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2006.

## ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

### КВАЗИ-ФРАКТАЛЬНАЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА СОЛИТОНОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ САМОДУАЛЬНОЙ ТЕОРИИ $\phi^4$

А. А. Горина

*Белорусский государственный университет*

*nasya.gorina.2931@gmail.com*

*науч. рук. – Я.М. Шнир, д-р физ.-мат. наук, проф.*

Исследуются две различные нелинейные теории скалярного поля в 1+1 измерении. Первая из них представляет собой однопараметрическую модель, включающую в качестве частных случаев при двух предельных значениях параметров модели классические нелинейные теории поля, имеющие решениями простейшие топологические солитоны – кинки – теории синус-Гордона и  $\phi^4$ . В данной смешанной модели также обнаружены топологические солитоны при произвольном значении параметра; детально изучены особенности рассеяния солитонов. Вторая модель – двухпараметрическая самодуальная теория  $\phi^4$ . В данной модели были обнаружены решения в виде кинка в одном секторе и нетопологического солитона по втором.

**Ключевые слова:** солитоны; кинки; интегрируемость.

#### ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о характере взаимодействия солитонов при столкновении естественным образом возникает в любой модели, допускающей эти решения. В случае интегрируемых теорий, например теории синус-Гордона, солитоны проходят друг сквозь друга без изменения своей формы. В неинтегрируемых же теориях столкновения отличаются своей хаотичностью. При это в таких моделях солитоны часто обладают так называемой внутренней модой, которая играет важную роль при передаче энергии солитона континууму. Взаимодействие кинка и антикинка в модели  $\phi^4$  примечательно наличием резонансных окон - интервалов начальной скорости солитонов, для которых окончательное отражение сопровождается несколькими столкновениями [1].

В классе топологических солитонов особую роль играют решения с насыщенным нижним пределом энергии из-за своей стабильности. В некоторых специальных теориях эти решения имеют и другие интересные свойства. Например, они удовлетворяют более простым дифференциальным уравнениям, обычно первого порядка, которые заключают в себе уравнения движения, обычно второго порядка. Эти решения называются *самодуальными*. Самодуальные решения

возникают в теориях, в которых топологический заряд имеет интегральное представление, то есть могут быть представлены в виде интеграла плотности топологического заряда. Из того факта, что топологический заряд инвариантен относительно гладких деформаций полевых конфигураций, следует, что соответствующая плотность топологического заряда удовлетворяет тождествам, имеющим форму дифференциальных уравнений, которые вместе с самодуальными уравнениями первого порядка составляют полную систему уравнений.

В данной работе исследуется столкновительная динамика кинков в модели синус-Гордона- $\phi^4$  и свойства статических солитонов в самодуальной двухкомпонентной теории  $\phi^4$ .

### МОДЕЛЬ СИНУС-ГОРДОНА- $\phi^4$

Для анализа столкновительной динамики солитонов при переходе от интегрируемой к неинтегрируемой теории будем рассматривать обычную (1+1)-мерную модель скалярного поля, задаваемую плотностью лагранжиана

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \phi_t^2 - \frac{1}{2} \phi_x^2 + U(\phi) \quad (1)$$

с потенциалом

$$U(\phi) = (1 - \epsilon)(1 - \cos \phi) + \frac{\epsilon \phi^2}{8\pi} (\phi - 2\pi)^2. \quad (2)$$

Параметр  $\epsilon$  — безразмерный параметр модели, задающий степень отклонения потенциала от периодического потенциала синус-Гордона. Соответствующее уравнение поля для (1) имеет вид:

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + (1 - \sin \phi) + \frac{\epsilon \phi}{2\pi^2} (\phi - 2\pi)(\phi - \pi) = 0 \quad (3)$$

### СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА СОЛИТОНОВ В МОДЕЛИ СИНУС-ГОРДОНА- $\phi^4$

Проанализируем процесс столкновения кинка и антикинка в модели синус-Гордона- $\phi^4$  с параметром  $\epsilon$ .

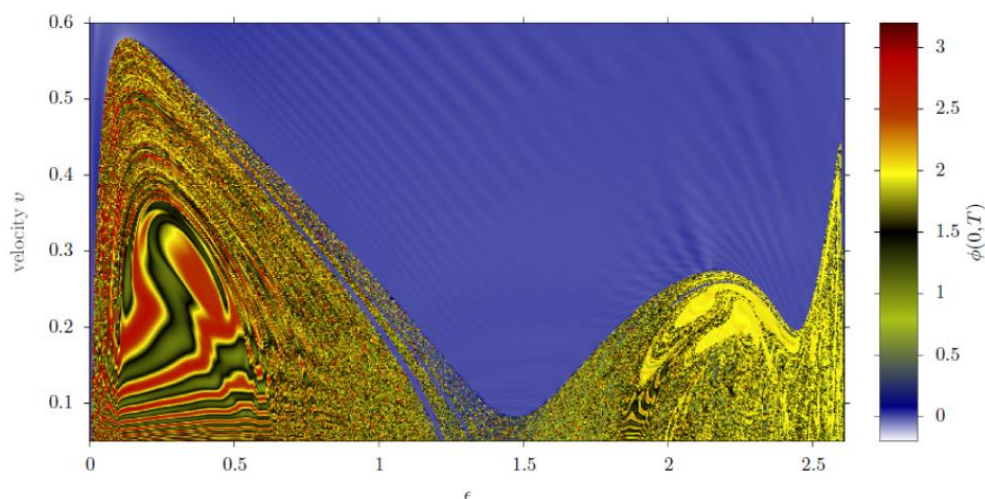


Рис. 1. Процесс столкновения кинка и антикинка для небольших скоростей. Значение поля в центре столкновения солитонов как функция скорости и параметра деформации  $\epsilon$ .

Во-первых заметим, что по мере уменьшения  $\epsilon$  увеличивается соответствующая критическая скорость  $v_{cr}$  — минимальная скорость, при которой отражение кинка и антикинка происходит без образования промежуточного связанного состояния. Ее максимум приходится на значение  $\epsilon = 0.13$ . По мере дальнейшего уменьшения параметра  $\epsilon$  критическая скорость начинает резко уменьшаться, приближаясь к нулю.

Во-вторых, резонансные окна взаимодействия кинка и антикинка меняются при изменении параметра модели: по мере уменьшения  $\epsilon$ , начиная с  $\epsilon = 1$ , окна становятся уже и смещаются в сторону изменения соответствующей критической скорости.

Далее, оказалось, что в случае резонансного взаимодействия с двумя столкновениями линейная зависимость между промежутком времени от первого до второго столкновения и количеством внутренних осцилляций характерна не только для  $\epsilon = 1$ , но и для других значений этого параметра.

Далее было установлено, что также как и в модели  $\phi^4$  для кинка и антикинка в рассматриваемой модели существует возможность столкнуться более двух раз перед тем, как окончательно разойтись. При этом резонансная структура столкновений кинка и антикинка нарушается по мере уменьшения параметра  $\epsilon$ . В картине столкновений появляются так называемые «фальшивые окна». Другими словами, при  $\epsilon \ll 1$  в процессе столкновения доминирующими становятся эффекты, связанные с излучением.

Интересный эффект возникает для случаев  $\epsilon < 0.05$ , когда в потенциале модели существуют два ложных вакуумных значения, наличие которых существенно влияет на динамику солитонов [2], например в рассматриваемой модели появляется новый канал

столкновений. Отметим, что малые значения параметра деформации  $\epsilon$  соответствуют тонкостенному приближению в задаче о распаде ложного вакуума [3].

## САМОДУАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим самодуальную теорию с потенциалом

$$V = \frac{1}{2}(\phi_1^2 - a^2)^2 + \frac{1}{2}(\phi_2^2 - b^2)^2 - \lambda\phi_1^2\phi_2^2 + \frac{2\lambda}{1-\lambda^2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — константа связи. Уравнения самодуальности для данной двухпараметрической модели имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1}{dx} &= \pm \frac{1}{\sqrt{1-\lambda^2}} (-c_1 + \phi_1^2 - \lambda(-c_2 + \phi_2^2)), \\ \frac{d\phi_2}{dx} &= \pm \frac{1}{\sqrt{1-\lambda^2}} (-c_1 + \phi_2^2 - \lambda(-c_2 + \phi_1^2)) \end{aligned} \quad (5)$$

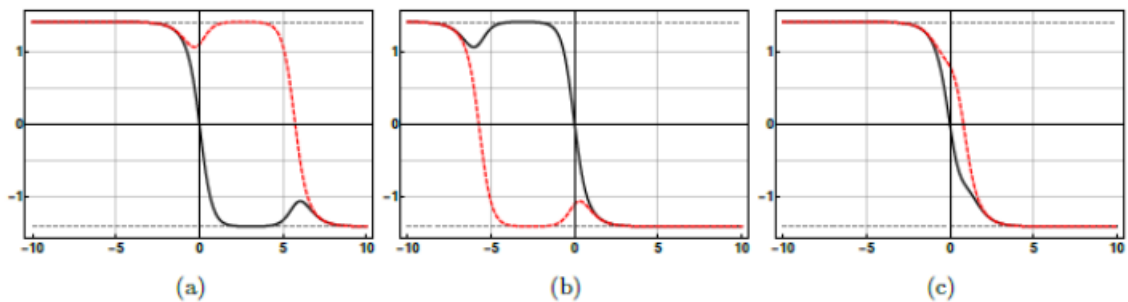


Рис. 2. Решения уравнений (5) для различных  $c_1, c_2$ .

Как можно заметить, в модели в одном из секторов могут существовать конфигурации из нетопологических солитонов, которые часто называют lump.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была построена нелинейная теория скалярного поля в 1+1 пространственно-временном измерении. Данная теория представляет собой однопараметрическую модель, включающую в качестве частных случаев при двух предельных значениях параметров модели классические нелинейные теории поля, имеющие решениями простейшие топологические солитоны – кинки – теории синус-Гордона и  $\phi^4$ . В данной смешанной модели были также обнаружены топологические солитоны при произвольном значении параметра; были детально изучены особенности рассеяния солитонов. Также была построена двухпараметрическая самодуальная теория  $\phi^4$ . В данной



модели были обнаружены решения в виде кинка в одном секторе и нетопологического солитона по второму. В дальнейшем представляет интерес подробнее рассмотреть самодуальную модель и сравнить динамику солитонов в ней с динамикой рассмотренной однопараметрической моделью и с несамодуальной двухпараметрической моделью [4].

#### Библиографические ссылки

1. *R. H. R. H. Goodman*, «Kink-Antikink Collisions in the  $\phi^4$  Equation: The n-Bounce Resonance and the Separatrix Map,» *SIAM J. Applied Dynamical System*, vol. 4, no. 4, p. pp. 1195–122.
2. *M. E. M. H. J. Ashcroft*, «Head butting sheep: kink collisions in the presence of false vacua,» *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, т. 49, № 36, 2016.
3. *S. R. Coleman*, «Fate of the false vacuum: Semiclassical theory,» *Phys. Rev. D*, т. 15, p. 2929, 1977.
4. *T. R. a. Y. S. A. Halavanau*, «Resonance structures in coupled two-component  $\phi^4$  model» *Physical review D: Particles and fields*, т. 86, p. 085027, 2012.

# МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОСТАНЦИЕЙ

**П. Е. Гулевич,**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*misterall.p@yandex.ru*

*науч. рук. – И. А. Карпович, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Исследованы методы подключения различных видов датчиков и обработки информации с них к микроконтроллеру ATmega328, а также изучены возможности передачи данных с микроконтроллера через Wi-Fi связь. На основе компонентов разработана аппаратная и программная части прибора для сбора метеоданных. Проведен анализ получаемых значений с датчиков и сенсоров. Реализованы алгоритмы оптимизации программного обеспечения для повышения достоверности данных. Исследованы и предложены алгоритмы реализации метеостанции с использованием спящего режима с возможностью работы от аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** сбор метеоданных, wi-fi связь, WI-FI модуль ESP-01, обмен данными через uart-протокол, цифровые датчики DHT11 и BMP280, LCD-дисплей, достоверность данных, энергопотребление платы arduino uno.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существующие аналоги домашних бытовых метеостанций не решают проблему мобильности и доступности с сохранением многофункциональности и достоверности данных. Согласно собранным данным, существующие метеостанции не могут обеспечить передачу данных через сеть Wi-Fi, подключаясь к общей точке доступа. Беспроводная передача данных осуществляется подключением к метеостанции, но передача данных в таком режиме ограничена в зоне доступа действия Wi-Fi связи устройства. Данные, которые собираются с датчиков, опрашиваются почти сразу, после опроса предыдущего. Как будет показано далее, это приводит к потере достоверности данных. Исследованные методы подключения различных видов датчиков к микроконтроллеру ATmega328, а также изученные возможности передачи данных с микроконтроллера через Wi-Fi связь, позволяют реализовать доступную многофункциональную метеостанцию с сохранением достоверности данных и многофункциональности. Передача данных на веб-страницу позволяет просматривать данные используя любой браузер. Данные, которые отображаются на веб-странице, визуализируются в виде графиков и численных данных. Актуальность заключается в том, что реализованный способ опроса датчиков позволяет избежать помех при получении информации с датчиков, а также просмотреть метеоданные с

любой точки планеты, где есть выход в интернет. На основе полученных данных, составлен анализ метеоданных с реализованного устройства без и с предложенным методом. А исследованные режимы энергопотребления для продолжительной безаварийной работы метеостанции позволили разработать концепцию реализации метеостанции в дистанционном исполнении с возможностью работы от внешнего источника питания (аккумулятор).

#### **ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА, ДАТЧИКОВ И МОДУЛЕЙ**

Конечный итог – прибор, собирающий метеоданные. Данная метеостанция реализуется на базе платы Arduino UNO. Преимущества платы Arduino UNO заключается в том, что программирование осуществляется в среде с открытым исходным кодом Arduino IDE. Плата UNO построена на базе микроконтроллера ATmega32 [11]. Данная плата оснащена 14 цифровыми и 6 аналоговыми портами, которые позволяют обрабатывать цифровые и аналоговые сигналы. Плата может работать при внешнем питании от 6 В до 20 В. Рекомендуемое значение напряжение от 7 до 12 В. Работать плата может через аккумуляторную батарею (выход AC/DC) или через USB-порт [17]. Основные метеорологические параметры, которые должна будет обрабатывать метеостанция – влажность, температура, атмосферное давление. Метеостанция должна быть способной отображать данные на LCD дисплей и на веб-страницу через Wi-Fi связь. Дополнительно к метеостанции подключается модуль реального времени. Для реализации Wi-Fi связи используется модуль ESP-01, который позволяет организовать необходимую передачу данных. [25]. К плате Arduino Uno подключаются датчики DHT11 и BMP280, которые позволяют снимать данные о влажности, температуре, атмосферного давления, а также высоту над уровнем моря [6, 18, 22]. В качестве LCD дисплея используется LCD1602 I2C. Подключение датчиков осуществляется непосредственно к портам платы. Разрабатывая программный код, подключается библиотека для работы с нужным датчиком. Указывается номер порта(ов) подключения датчиков к плате Arduino Uno. [11]

Датчик DHT11 состоит из двух частей – емкостного датчика температуры и гигрометра [3]. Рабочее напряжение датчика составляет или 3.3 В или 5 В. Потребляемый ток датчика до 2,5 мА. Погрешность может составлять до +5%. Датчик питается через один цифровой порт. [22] Управлением опроса датчиков осуществляется через библиотеку производителя «DHT», в которой предусмотрена работа с DHT11. [9, 11]

BMP280 - это цифровой датчик атмосферного давления (барометр). Точность датчика  $\pm 1$  гПа и температуры с точностью  $\pm 1$  °С. Модуль может использоваться и как высотомер с точностью измерения  $\pm 1$  м. Датчик имеет интерфейсы I2C и SPI, так что без проблем подключается к платформе Arduino UNO. Напряжение питания: 3.3 В. Для реализации подключения к плате UNO используется интерфейс SPI. Для управлением - библиотека «Adafruit\_BMP280». [4, 11, 18]

Для отображения данных используется LCD-дисплей 1602ПС. Поскольку дисплей 1602 использует 16 выводов (6 цифровых выходов обязательных), что является не эффективным его в работе с микроконтроллером, поэтому используется 1602ПС, использующий подключение через I2C. В таком случае, подключение к микроконтроллеру осуществляется через два порта [11, 22, 24]. Технические характеристики дисплея следующие: символьный тип отображения, есть возможность загрузки символов; светодиодная подсветка; напряжение питания 5В; формат 16x2 символов; угол обзора 180 градусов [23]. Для управлением LCD-дисплея присутствует внутренняя библиотека «Wire» и библиотека производителя «LiquidCrystal\_I2C». [23]

Модуль Wi-Fi ESP-01 построен на базе чипсета ESP8626. Данная плата оснащена собственным микроконтроллером, который позволяет запрограммировать модуль под свои задачи. Также модуль оснащен двумя светодиодами, Flash-памятью объемом 2 МБ. Модуль оснащен миниатюрной антенной на верхнем слое печатной платы. Модуль оснащен Wi-Fi протоколом 802.11 b/g/n 2.4 ГГц, с поддержкой WPA/WPA2. Входное напряжение 3.3 В. Максимально потребляемый ток модулем в пике - 300 мА [18]. Wi-Fi модуль имеет поддержку следующих интерфейсов обмена данными: UART/HSPI/I2C/I2S. Поскольку шина I2C будет занята LCD дисплеем, самый выгодный способ организовать передачу данных между ними – использовать UART [16 24]. Для этого обеспечим подключение нужных портов RX и TX с модуля Wi-Fi на плату Arduino. RX – принимающая линия, TX – передающая линия. Для управлением UART- протокола необходима встроенная в среду разработки библиотека «SoftwareSerial». [16, 17]

## **РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ И ПРОГРАМНОЙ ЧАСТИ МЕТЕОСТАНЦИИ**

Реализация метеостанции разделяется на два этапа: сборка аппаратной части, вторая - разработка программного обеспечения. Подключение BMP280 осуществляется через SPI-интерфейс; DHT11 требует один

цифровой порт для передачи данных; LCD-дисплей подключается через I2C интерфейс; обмен данными между микроконтроллером ATmega328 и Wi-Fi модулем ESP-01 осуществляется через UART-протокол. Кроме того, модуль ESP-01 обладает встроенной FLASH-памятью для инициализации ПО. Поскольку микроконтроллер ATmega328 имеет собственные выходы на 5 В и на 3.3 В Модуль ESP-01 запрограммирован на AT-прошивки (набор запрограммированных команд). Разработка ПО представляет из себя написание программного кода. Подключая соответствующие узлы к портам платы Arduino UNO, и подключая к программному коду библиотеки для опроса датчиков, возможна реализация опросов датчиков. Структура опроса датчиков выглядит следующим образом [11, 16]:

```
Float humidity = dht.getHumidity(); (1)
```

```
Float tem = int(bmp.readTemperature()); (2)
```

```
Float Temproc = int(dht.getTemperature()); (3)
```

```
Float Pressure = bmp.readPressure(); (4)
```

```
Float Altitude = bmp.readAltitude(1013.25); (5)
```

Как мы видим из строк (1-5), данные из датчиков записываются сразу в переменную. Выполнив операцию (1), сразу же начинается выполнение строки (2) и т. д. до конца. Стоит отметить, что функции опроса определяются подключаемыми библиотеками [16]. Если мы введем задержку между опросом датчиков, то снизим разброс получаемых значений.

Структура отправки данных осуществляется следующим образом: при запуске платы и инициализации ПО, модуль ESP-01 пытается подключиться к точке доступа, к которой был подключен в последний раз [25]. Если такой точки доступа нет в зоне действия – вводится новая точка доступа с паролем от нее через последовательный интерфейс. Затем, передавая через UART-протокол данные с микроконтроллера ATmega328, модуль ESP-01 отправляет данные на веб-сервис, в котором уже хранятся данные [16, 25].

На рисунке 1 представлена зависимость значения показания абсолютной влажности от числа измерений. Обработка данных с датчиков осуществлялось с передачей данных через Wi-Fi связь на веб-страницу. Интервал опроса между датчиками составляет 50 мс. Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что разброс получаемых значений меньше, чем в случае с осуществляемой задержкой. Несмотря на то, что погрешность работы датчиков имеет

место [7], тем не менее, используя метод задержки между опросом датчиков, позволяет уменьшить разброс получаемых данных [1, 3, 4].

Точность датчика зависит прежде всего от работы АЦП [2, 9, 14]. В зависимости от АЦП на выходе получается конечный результат. Опрашивая датчики, в любом случае потребовалось некоторое время для обработки АЦП аналогового сигнала в цифровой [2]. Предположим, что аналоговая величина находится в диапазоне от 14 до 15, например, на

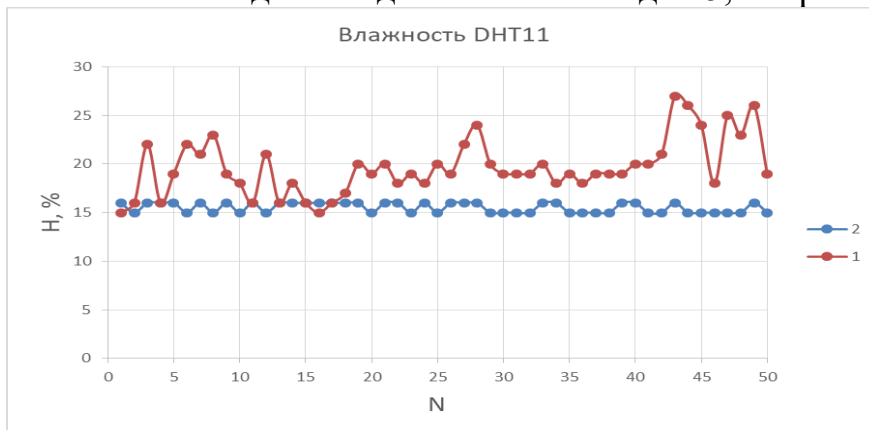


Рис 1. Зависимость абсолютной влажности датчика DHT11 от числа измерений. Опрос датчика без задержки (1) и с задержкой (2)

14,3. АЦП округлит до ближайшего значения, в нашем случае 14. Затем преобразует 14 в цифровой сигнал. В случае скачка напряжения, может возникнуть число 14,5. Что даст в итоге число 15. АЦП преобразует эту величину в цифровой вид. И в итоге, мы имеем разные показания измерения [2, 4, 9]. Добавляя опрос между датчиками, снижается энергопотребление и, как следствие, повышается эффективность обработки данных.

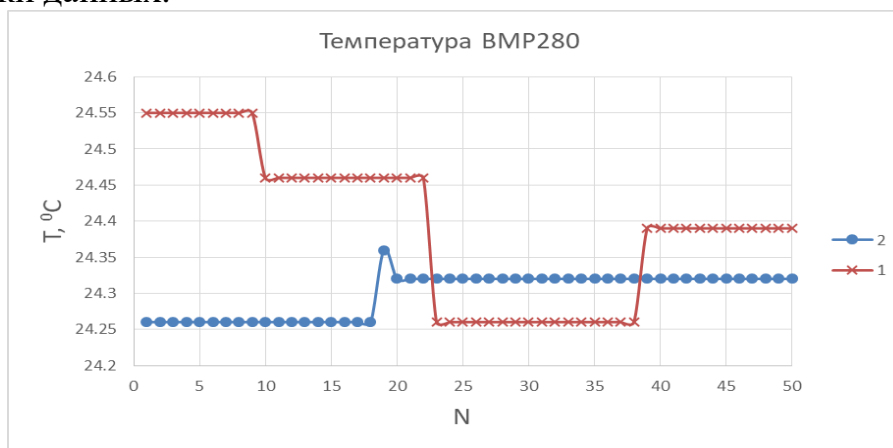


Рис 2. Зависимость температуры датчика BMP280 от числа измерений. Опрос датчика без задержки (1) и с задержкой (2)

В случае наиболее точного датчика BMP280 – разброс значений не наблюдается. Только через определенное количества измерений,

показание температуры меняет свою величину. Здесь следует сослаться на изменение окружающей среды, так как помещение во время эксперимента, проводимого при опросе датчиков, не имело возможности автоматического контроля. В связи с этим были предприняты исключительно искусственные способы поддержания условий. Таким образом, можно сказать, что опрашивая датчики без задержки между опросами, возникают помехи, которые приводят к потере достоверности данных. Объяснить причину появления шумов и снижение достоверности данных можно несколькими пунктами. Один из этих пунктов – снижение производительности канала, за счет этого, возникают ошибочный ответ АЦП датчика на запрос получаемых данных. Другое объяснение – проблема с питанием датчиков, за счет чего питание платы падает, и присутствует нестабильное напряжение на плате. [1, 2, 10, 12]

Кроме того, микроконтроллер ATmega328 обладает спящими режимами. Существуют несколько режимов работы. Один из самых экономных – Power-Down mode. В этом режиме снижаются частоты и отключаются все узлы микроконтроллера, за счет чего снижается энергопотребление. Используя модуль времени как «будильник» через модуль времени, возможно «пробуждать» разработанную метеостанцию, которая с определенным интервалом отправляет данные. Тем самым есть возможность работы в дистанционном исполнении от аккумуляторной батареи. [17]

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Реализованная метеостанция на основе датчиков влажности и температуры DHT11, атмосферного давления GY-BMP280, модуля времени DS1302 Module, LCD-дисплея 1602I2C и микроконтроллера ATmega328, модуля ESP-01 на базе чипа ESP8266, не уступает по многофункциональности другим видам мобильных метеостанций. Реализованный способ Wi-Fi связи позволяет просматривать данные с любой точки планеты при условии, что есть доступ в интернет. А также введенный режим энергосбережения позволяет некоторое время работать от аккумуляторной батареи, благодаря которому метеостанция сможет работать без электрической сети помещения. Проанализировав принимаемые данные, определен лучший способ опроса датчиков и обработки их, добавляя задержку между опросом датчиков. Реализованы несколько режимов метеостанции, позволяющие отображать информацию, используя LCD-дисплей или используя модуль Wi-Fi.

## Библиографические ссылки

1. *А. Н. Катков* Алгоритмы коррекции погрешностей тензометрических датчиков давления цифровыми вторичными преобразователями // Молодой ученый. — 2011. № 8 (31). Т. 1. С. 58-60.
2. *Никамин В.А.* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, 2003., 224 с.
3. *Берлинер М. А.* Измерения влажности - изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1973 г., 400 стр.
4. *Андрей Каишаров.* Датчики в электронных схемах: от простого к сложному, 2013 г. 196 стр.
5. *Ревич Юрий.* Занимательная электроника, 2015 г, 510 стр.
6. *Хоровиц П., Хилл У.*, в 3-х томах: Т. 2. Пер. с англ. Искусство схемотехники - 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Мир, 1993.—371 с.
7. *А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова.* Методы и средства измерений, испытаний и контроля, часть 2, издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012 г., 109 стр.
8. *Додека.* Микросхемы АЦП и ЦАП. Справочник, 2005 г., 432 стр.
9. *О. Е. Аверченков.* Основы схемотехники аналого-цифровых устройств -, 2012 г., 79 стр.
10. *Сергей Алексеевич.* Повышение точности цифровых датчиков температуры ds18b20 — Казанцев, 2015 г., 3 стр.
11. *Улли Соммер.* Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino -, изд. “БХБ-Петербург”, 2012 г.
12. *Замалетдинова Э.Ю., Егорычев А.И.* Сравнительный анализ методов измерения давления - 2014 г., 4 стр.
13. *Сообщество EasyElectronics.ru* – электронный ресурс. “Датчики и АЦП”, 3. Стр.
14. *Кестер У.* Техносфера – Аналого-цифровые преобразование, 1. Глава,
15. *Платт Чарльз.* Электроника: логические микросхемы и датчики, изд. Санкт-Петербург “БЗБ-Петербург”, 2015 г., - 397 стр.
16. *Jonathan Osher, Hugh Blemings.* Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware –, 2009, - 405 p.
17. Интернет-адрес: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> [Электронный ресурс, документация платы Arduino Uno].
18. Интернет-адрес: [http://www.mantech.co.za/datasheets/products/GY-BMP280-3.3\\_VG.pdf](http://www.mantech.co.za/datasheets/products/GY-BMP280-3.3_VG.pdf) [Электронный ресурс, документация датчика BУ-BMP280].
19. Интернет-адрес: <http://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf> [Электронный ресурс, документация для модуля ESP-01]
20. Интернет-адрес: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1302.pdf> [Электронный ресурс, документация модуля DS1302-Moudle].
21. Интернет-адрес: <https://opencircuit.nl/ProductInfo/1000061/I2C-LCD-interface.pdf> [Электронный ресурс, документация модуля для LCD i2C 1602].
22. Интернет-адрес: <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf> [Электронный ресурс, документация датчика DHT11].
23. Интернет-адрес: <https://www.openhacks.com/uploadsproductos/eone-1602a1.pdf> [Электронный ресурс, документация LCD-дисплея].
24. Интернет-адрес: [http://altor1.narod.ru/Articles/I2C\\_RP.pdf](http://altor1.narod.ru/Articles/I2C_RP.pdf) [Электронный ресурс, Шина I2C]
25. Интернет-адрес: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266x/overview> [Электронный ресурс, сайт производителя чипов ESP8266 и модулей на его основе]



# ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

А. А. Гулицкий

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*antongoulitski@gmail.com*

*науч. рук. – Э. А. Чернявская, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В работе рассматриваются вопросы, связанные с задачей обнаружения объектов в реальном времени. Проведен сравнительный анализ современных нейросетевых методов, используемых для обнаружения объектов. С помощью пользовательского набора данных была обучена модель на основе архитектуры YOLOv3, способная осуществлять детектирование объектов дорожного трафика в реальном времени. Для повышения показателей точности модели был применен алгоритм, способный улучшить распознавание краев объектов нейронной сетью.

**Ключевые слова:** обнаружение объектов, глубокое обучение, YOLOv3, SSD, Faster R-CNN, сверточные нейронные сети.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача обнаружения объектов – одна из фундаментальных проблем в области компьютерного зрения и обработки изображений. Данная задача состоит в обнаружении экземпляров объектов определенного класса в цифровых изображениях и видео с помощью определенных признаков данного класса. Быстрый рост производительности вычислительных средств активно стимулирует развитие методов детектирования объектов [1], которые используются в системах обнаружения и сопровождения объектов, охранных системах [2], системах машинного зрения, медицинской диагностики [3], промышленности и т.п.

В последнее время обнаружение объектов в режиме реального времени становится актуальным направлением в сфере наблюдения за автотранспортным движением, особенно в областях связанных с автопилотированием автомобилей [4] и контролем трафика [5]. Разнообразие методов и скорость их обновления требует анализа возможности их адаптации и усовершенствования для решения задач идентификации объектов в режиме реального времени. Цель работы состоит в оценке актуальных методов детектирования и создании на их основе модели, способной обнаруживать объекты в видеопотоке с высокими показателями скорости и точности.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЗАДАЧЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Методы, используемые в задаче обнаружения объектов, обычно относятся к двум подходам: методы машинного обучения, в которых сначала определяются признаки объектов, а затем применяется алгоритм классификации, и методы глубокого обучения, которые способны выполнять обнаружение объектов без конкретного набора характеристик и базируются на сверточных нейронных сетях. Так как в задаче детектирования трафика особенно важна точность обнаружения, методами, использованными в работе, являются наиболее актуальные алгоритмы, использующие глубокое обучение: Faster R-CNN, YOLOv3, SSD. Для данного набора архитектур на основе коллекции данных Google Open Images V6 был создан пользовательский датасет, содержащий свыше 2000 изображений, относящихся к характерным для задачи детектирования трафика классам: автомобиль, светофор, автобус. Использование пользовательской коллекции данных является принципиальным в данной работе, так как помогает оценить масштабируемость и возможность использования алгоритма в других областях. Обучение было проведено на графическом процессоре с использованием *CUDA*, количество эпох равнялось 130 с *batch size* 16. Результаты оценивались с помощью датасета *MS COCO*:

Табл. 1

Результаты сравнения моделей по mAP и быстродействию

Модель	mAP	FPS
SSD	70,97%	9
YOLOv3	64,12%	17
Faster R-CNN	74,38%	2

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ YOLOV3

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что YOLOv3 сильно выигрывает в производительности, но имеет проблемы с точностью детектирования. Данная архитектура была выбрана для дальнейшей доработки, так как значение FPS является определяющим в задаче детектирования. Для улучшения показателей сети были произведены оценки различных функций активации на тестовом наборе данных:

Результаты сравнения функций активации для YOLOv3

Функция активации	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>
<i>ReLU</i>	56,24%	60,32%
<i>Swish</i>	69,11%	84,12%
<i>Leaky ReLU</i>	68,57%	76,98%
<i>PReLU</i>	66,49%	72,44%

По результатам оценки выбраны следующие функции активации Leaky ReLU и Swish. Однако последняя сильно понижает производительность (требуется почти на 50% больше видеопамати), хотя может обладать большей точностью. В задаче детектирования объектов в реальном времени вопрос о минимизации затрачиваемых ресурсов стоит крайне остро, поэтому окончательный выбор был сделан в пользу Leaky ReLU.

Для улучшения точности выделения объектов был использован алгоритм, применяемый для улучшения распознавания краев объектов [6]. Предложенный алгоритм является дополнительным слоем модели и принимает на вход тензор 416x416, к которому применяется фильтрация, помогающая определить пороговые значения для 4 сторон ограничивающих прямоугольников. После этого строится новая ограничивающая область. Стадия препроцессинга изображения состоит из 4 этапов:

1. Формирование области анализа. Часть изображения, в которой работает алгоритм, ограничивается той областью, в которой YOLOv3 обнаруживает объект.

2. Размытие. Для сглаживания цветовых переходов и удаления шума изображение сначала представляется в оттенках серого, а затем к нему применяется размытие по Гауссу с ядром 3x3.

3. Детектирование краев. Для определения границ объектов используется детектор границ Кэнни [7].

4. Разбиение изображения. После определения краев объектов изображение разбивается на 4 части, в каждой из которых определяется соответствующая сторона ограничивающего прямоугольника.

Использованный в работе алгоритм позволил увеличить показатель IoU в среднем на 6%. При этом производительность понижается на 1-2 FPS. Такое понижение производительности является незначительным по сравнению с существенным увеличением точности выделения объектов.

Резюмируя все вышесказанное, можно прийти к заключению, что задача детектирования объектов в видеопотоке может быть решена методами глубокого обучения без использования большого количества

данных, но с помощью хорошо подобранного датасета для обучения и оптимизации параметров сети.

В результате данной работы был создан и обучен алгоритм, способный определять объекты в видеопотоке со скоростью 16 кадров в секунду и имеющий высокие показатели точности (до 75% mAP при тестировании на выборке собранной в дневное время).

Из полученных результатов виден большой потенциал использования нейронных сетей для обнаружения объектов. Многие задачи могут быть решены с использованием сравнительно небольшого набора данных. Однако даже самые актуальные на сегодняшний день модели могут быть улучшены с помощью применения дополнительных алгоритмов, подобранных для конкретной задачи.

Основным улучшением для рассматриваемой в работе модели является увеличение количества классов и используемого для обучения набора данных, который должен содержать объекты в более разнообразных условиях видимости и освещения.

#### Библиографические ссылки

1. *Jifeng Dai, Yi Li, Kaiming He, Jian Sun* // R-FCN: Object Detection via Region-based Fully Convolutional Networks [Электронный ресурс]. URL: <http://papers.nips.cc/paper/6465-r-fcn-object-detection-via-region-based-fully-convolutional-networks> (дата обращения: 17.05.2020).
2. *Samet Akcay, Mikolaj E. Kundegorski, Chris G. Willcocks, Toby P. Breckon* // Using Deep Convolutional Neural Network Architectures for Object Classification and Detection Within X-Ray Baggage Security Imagery [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cv-foundation.org/openaccess/content\\_cvpr\\_2016/html/Redmon\\_You\\_Only\\_Look\\_CVPR\\_2016\\_paper.html](https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/html/Redmon_You_Only_Look_CVPR_2016_paper.html) (дата обращения 17.05.2020).
3. *Naji Khosravan, Ulas Bagci* // S4ND: Single-Shot Single-Scale Lung Nodule Detection <https://arxiv.org/abs/1805.02279> [Электронный ресурс]. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-03000934-2\\_88](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-03000934-2_88) (дата обращения 17.05.2020).
4. *Bilel Benjdira, Taha Khursheed, Anis Koubaa et al.* // Car Detection using Unmanned Aerial Vehicles: Comparison between Faster R-CNN and YOLOv3 [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8658300> (дата обращения 17.03.2020).
5. *Md. Rokebul Islam, Nafis ibn Shahid, Dewan Tanzim ul Karim et al.* // An efficient algorithm for detecting traffic congestion and a framework for smart traffic control system [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7423566> (дата обращения 15.03.2020).
6. *Shaji Thorn Blue, M. Brindhya* // Edge detection based boundary box construction algorithm for improving the precision of object detection in YOLOv3 [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8944852> (дата обращения 15.05.2020).
7. *John Canny* // A Computational Approach to Edge Detection [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4767851> (дата обращения 17.05.2020) (дата обращения 16.05.2020)

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ СРЕЗА ГИППОКАМПА КРЫСЫ

**А. В. Никифоров**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*sky92033@live.com;*

*науч. рук. – А. А. Денисов, канд. биол. наук.*

Большинство исследований механизмов функционирования мозга в наше время тесно связано с разработкой высокотехнологичных методов и инструментов. Развитие микроэлектроники позволяет создавать эффективные системы для работы с нейронными сетями. В связи с этим была разработана система, предназначенная для анализа и визуализации электрической активности нейронов гиппокампа крысы. Основными составляющими данной системы стали одноплатные компьютеры Raspberry Pi 4 и Pocket Beagle, в качестве программной среды выступил пакет открытого ПО Jupyter Lab. Также был разработан ряд алгоритмов передачи и обработки получаемых данных.

**Ключевые слова:** гиппокамп; нейронная сеть; синаптическая пластичность; Jupyter; RaspberryPi.

## ВВЕДЕНИЕ

Синаптическая пластичность представляет собой одно из важнейших явлений, лежащих в основе многих психических функций мозга человека. Яркими примерами нейропластичности мозга являются процессы, происходящие в гиппокампе. Гиппокамп, участвующий в формировании и работе обучения и памяти, очень чувствителен к сенсорной, социальной и пространственной сложности окружения [1]. Изучение электрической активности нейронных сетей гиппокампа, в том числе под воздействием внешних факторов, позволяет узнать биофизические механизмы, лежащие в основе функций мозга, которые связаны с работой гиппокампа. Визуализация и анализ динамики нейронных сетей также позволяет получить информацию о механизмах развития нейродегенеративных заболеваний и воздействии ноотропных веществ на работу мозга. В связи с этим было предложено разработать программный модуль, предназначенный для визуализации и анализа электрической активности нейронных сетей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными объектами для проверки работы системы были нейронные сети срезов гиппокампа крысы. Активность

регистровалась в собственно гиппокампе, в отделе CA1. В качестве инструментов измерения использовались стандартные вольфрамовые электроды в стеклянной изоляции, наполнителем которых выступала спинномозговая жидкость.

Основными компонентами разработанной системы, представленной на рис. 1, являются одноплатные компьютеры Raspberry Pi 4 и Pocket Beagle, а также микроконтроллер NodeMCU32-S:

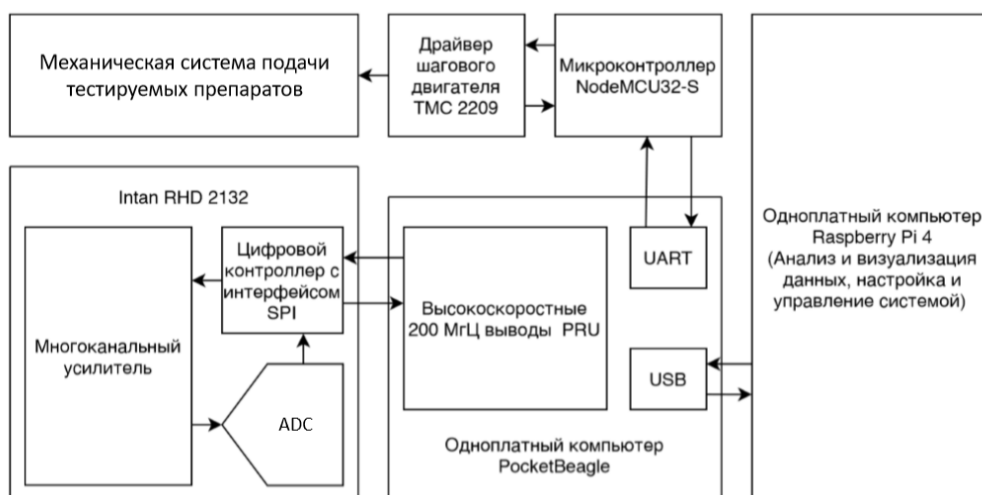


Рис. 1. Схема разработанной системы

Для разработки алгоритмов регистрации, обработки, анализа и визуализации были использованы языки программирования Python, C. Средой для разработки программной реализации визуализации и анализа данных, а также создания графического интерфейса пользователя был выбран Jupyter Lab.

Фильтром оцифрованных данных является фильтр Савицкого-Голея [2] с размером окна равным 5 и степенью полинома равной 3. Запись электрической активности производится на протяжении от 20 до 50 мс после акта стимуляции. Актом стимуляции является возбуждение в виде импульса тока длительностью 250 мкс и амплитудой 25 мкА.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Более подробно рассмотрим основные компоненты системы. Intan RHD 2132 представляет из себя микрочип, предназначенный для регистрации слабых электрических сигналов живых тканей. Основной причиной использования компьютера Pocket Beagle является его высокоскоростные выходы, которые по сути являются отдельными программируемыми процессорами с частотой работы 200 МГц. Был разработан алгоритм высокопроизводительного обмена данными

высокоскоростных выводов с главным процессором, основанный на технологии прямого доступа к памяти (Direct Memory Access– DMA). Через Pocket Beagle также происходит управление механической системы подачи тестируемых препаратов на основе NodeMCU32-S. Основным вычислительным центром, в который передаются данные, полученные Pocket Beagle, является Raspberry Pi 4. В качестве объектов визуализации нейронных сетей гиппокампа выступают кривые популяционных спайков (ПС) и полевые постсинаптические возбуждающие потенциалы (пВПСП). Рассчитываемые характеристики ПС и пВПСП: амплитуда, задержка пика, полуширина пика, наклон кривой и асимметрия. Разработанный интерфейс, основная часть которого представлена на рис. 2, позволяет проводить визуализацию и анализ как полного массив полученных данных, так и отдельных событий. Отдельным событием являются измеренные кривые ПС и пВПСП в ответ на выбранный акт стимуляции. Помимо анализа и визуализации данных, интерфейс позволяет производить гибкую настройку системы, представленной на рис. 1.

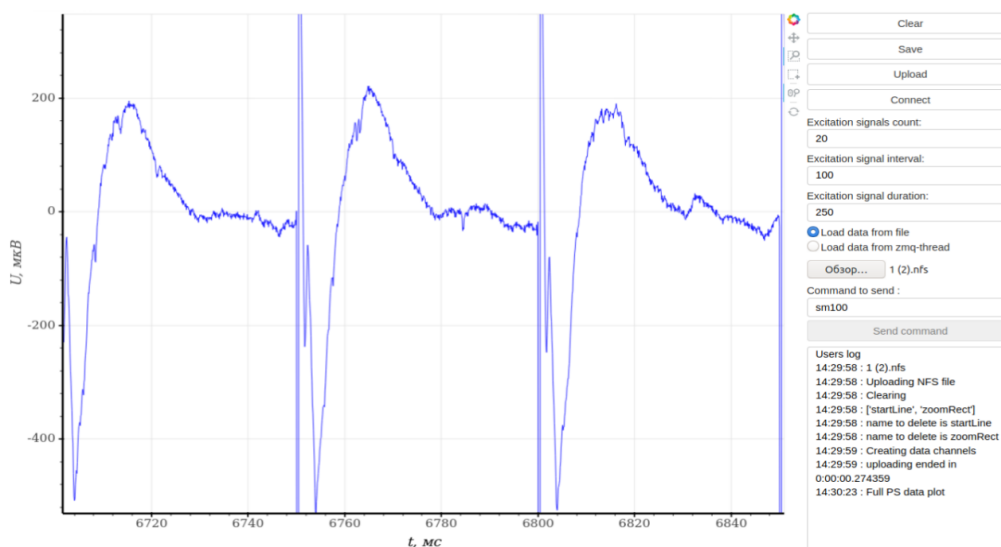


Рис. 2. Интерфейс для визуализации и анализа электрической активности срезов гиппокампа крысы

Для описания и анализа явления синаптической пластичности гиппокампа важно следить за динамикой перечисленных выше характеристик измеряемых кривых. Так, на рис. 3 представлена динамика амплитуды в эксперименте с добавлением агониста (происходит на 20 и на 40 минутах):

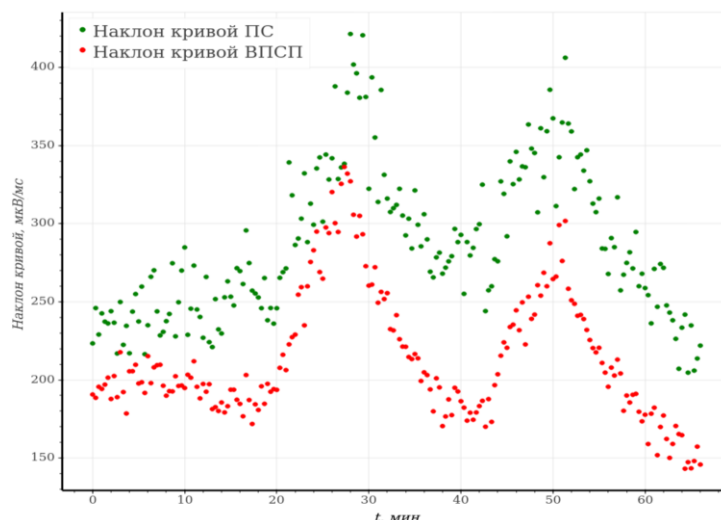


Рис. 3. Изменение наклона кривых популяционного спайка и полевого возбуждающего постсинаптического потенциала

В ходе разработки также было проведено сравнение скорости обработки и визуализации данных Raspberry Pi 4 с ПК. Время на последовательное считывание, обработку и визуализацию данных из файлов (5 файлов, около 85000 точек в каждом) представлено в таблице:

Таблица

#### Сравнение скорости работы с данными

Устройство	Обработка, сек	Обработка + Визуализация, сек
Raspberry Pi 4 (Broadcom BCM2711B0 quad-core A72, 4 GB LDDR4)	$4.9 \pm 0.3$	$7.5 \pm 0.3$
ПК (Intel Core i5 - 6300HQ, 8 GB DDR4, GTX 950M)	$1.3 \pm 0.2$	$2.1 \pm 0.2$

Не смотря на то, что Raspberry Pi 4 проигрывает ПК, его скорости все равно хватает для визуализации данных, в том числе в режиме реального времени. Разработанный программный пакет может запускаться, как на ПК, так и на микрокомпьютерах. Более того, архитектура программы позволяет включать в систему дополнительные модули для проведения расчетов без полной переработки системы.

#### Библиографические ссылки

1. *Eckert M. J., Abraham W.C.* Effects of environmental enrichment exposure on synaptic transmission and plasticity in the hippocampus // *Curr. Top. Behav. Neurosci.* 2013. V. 15. P.165 – 187
2. *Savitzky A., Golay M. J.* Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Analytical Chemistry* 1964. V. 36. №. 8. P. 1627



# ОСВОЕНИЕ МОНТЕ-КАРЛО ПРОГРАММЫ OPENMC И РАСЧЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО БЕНЧМАРКА WWER MOX

**А. В. Николайчик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*nikolaychik.nastenka@gmail.com;*

*науч. рук. – Р. Б. Богданович*

В работе освоена Монте-Карло программа OpenMC, рассчитан международный бенчмарк WWER MOX, рассчитан тестовый пример моделирования эквивалентной ячейки. Получены результаты  $k_{\text{eff}}$  для прямоугольной ячейки, которые согласуются с результатами представленными на официальном сайте OpenMC. Полученные результаты согласуются с точностью до статистической ошибки. Получены результаты  $k_{\text{inf}}$  для шестиугольной ячейки международного бенчмарка WWER MOX. Проведен анализ полученных результатов расчета бесконечного коэффициента размножения для шестиугольной ячейки варианта V1 в трех состояниях (S1, S5, S6). Полученные результаты согласуются с результатами бенчмарка.

**Ключевые слова:** OpenMC; Монте-Карло; международный бенчмарк WWER MOX.

## ВВЕДЕНИЕ

Моделирование является важной составляющей современной науки.

Особую роль оно играет в ядерной энергетике. С помощью моделирования можно обосновывать безопасность объектов использования атомной энергии на всех стадиях жизненного цикла, можно моделировать ядерные установки. Одним из самых точных методов для моделирования ядерных реакторов является метод Монте-Карло. Сегодня в мире существуют десятки программ, основанных на данном методе, однако большинство из них распространяется за немалые деньги. Код OpenMC [1] является бесплатным и открыт для каждого, поэтому его легко можно использовать в БГУ для научных исследований. OpenMC является довольно популярным кодом, существует огромное количество публикаций с его использованием. Также актуальность работы заключается в том, что программу OpenMC можно использовать с целью расчета реактора, строящегося в Беларуси.

Целью моей работы является освоение Монте-Карло программы.

OpenMC и расчет международного бенчмарка WWER MOX [2], а также показать, что полученные результаты по моделированию реактора типа ВВЭР согласуются с результатами, полученными по другим программам.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЯЧЕЙКИ PIN-CELL

В работе создавалась модель Pin-Cell, которая эквивалентна моделированию бесконечного массива топливных элементов. Моделирование эквивалентной ячейки произведено с использованием среды программирования Jupyter Notebook, с целью освоения различных функций OpenMC, используя API Python.

В работе получены значения коэффициента размножения нейтронов для прямоугольной ячейки, которые согласуются с результатами представленными на официальном сайте OpenMC [3] (рассчитанное в работе  $k\text{-effective} = 1.40396 \pm 0.00268$ , представленное в тестовом примере  $k\text{-effective} = 1.39719 \pm 0.00286$ ). Полученные результаты согласуются с точностью до статистической ошибки.

## РАСЧЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО БЕНЧМАРКА WWER MOX

В бенчмарке смоделированы восемь различных топливных композиций (вариантов топлива) V1-V4 и V7-V10, с конкретным набором условий эксплуатации реактора (состояний S1 - S6), представляющих штатные и нештатные ситуации, включая заданные значения температуры топлива, температуры и плотности замедлителя, концентрации продуктов деления, содержания борного поглотителя.

В реальных тепловыделяющих сборках реактора ВВЭР-1000 топливные элементы имеют центральное отверстие, а топливо расположено на шестигранном (треугольном) шаге в шестигранных тепловыделяющих сборках. В данной работе используется шестигранный шаг 1,275 см. Диаметр цилиндрической топливной области равен 0,772 см. Для простоты моделирования центральное отверстие в топливной таблетке не учитывается. Наружный диаметр оболочки равен 0,9164 см, при толщине оболочки 0,0772 см.

Для расчета бенчмарка разработана модель шестиугольной ячейки (рис. 1). Технические характеристики для свежего топлива и других материалов варианта V1 представлены в таблице 1. В работе использовался метод интерполяции температурной зависимости микросечений взаимодействия, чтобы получить более достоверные результаты. Проведено сравнение результатов с интерполяцией и без интерполяции. В таблице 2 и на рисунке 2 представлены полученные результаты в сравнении с результатами, полученными по другим программам. Вариант V1 рассчитан в трех состояниях: S1 (при температуре топлива 1027 К с учетом  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{149}\text{Sm}$ , температуры других материалов 579 К), S5 (температура всех материалов 579 К), S6 (температура всех материалов 300 К).



Рис. 1. Модель эквивалентной ячейки Pin-Cell

Табл. 1

**Технические характеристики для свежего топлива и других материалов варианта V1**

Материал	Комментарий	Нуклид	Концентрация (а/б-см)	Высота ячейки(см)
FU1	Свежее урановое топливо с добавлением поглотителей	$^{235}\text{U}$ $^{238}\text{U}$ $^{16}\text{O}$ $^{135}\text{Xe}$ $^{149}\text{Sm}$	$8.7370 \times 10^{-4}$ $1.8744 \times 10^{-2}$ $3.9235 \times 10^{-2}$ $9.4581 \times 10^{-9}$ $7.3667 \times 10^{-8}$	275.643
CL1	Оболочка	Zr	$4.2300 \times 10^{-2}$	—
MOD1	Горячий замедлитель с борной кислотой	H $^{16}\text{O}$ $^{10}\text{B}$ $^{11}\text{B}$	$4.783 \times 10^{-2}$ $2.391 \times 10^{-2}$ $4.7344 \times 10^{-6}$ $1.9177 \times 10^{-5}$	—

Табл. 2

**Сравнение полученных результатов для шестиугольной эквивалентной ячейки с результатами, полученными по другим программам**

		S1		S5		S6	
		$k_{\text{inf}}$		$k_{\text{inf}}$		$k_{\text{inf}}$	
V1	SAS2H	1.2589		1.3245		1.3669	
	HELIOS	1.2750		1.3393		1.3754	
	MCU	1.2743		1.3382		1.3739	
	OpenMC	без интер-поляции	с интер-поляцией	без интер-поляции	с интер-поляцией	без интер-поляции	с интер-поляцией
1.276		1.276	1.341	1.342	1.359	1.359	

Чтобы добиться желаемой точности, был проведен прикидочный расчет с небольшим числом нейтронных историй. Далее используя формулу для зависимости статистической погрешности от числа историй, было рассчитано число историй, необходимое для достижения

точности 0,0004 в значении коэффициента размножения. Время расчета одного состояния модели составило 22 минуты.

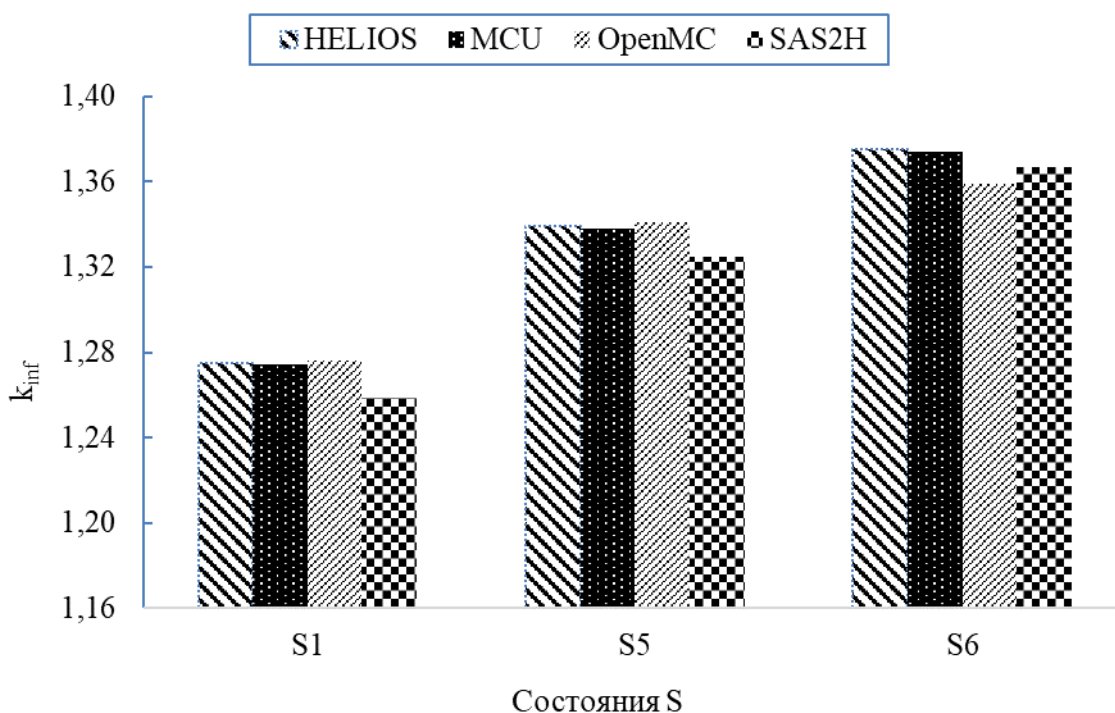


Рис. 2. Сравнение результатов  $k_{inf}$  для различных программ варианта V1

Анализируя полученные результаты расчета бесконечного коэффициента размножения нейтронов для шестиугольной ячейки, можно сделать вывод, что результаты варианта V1 согласуются с результатами бенчмарка, с точностью до 1 % (значение OpenMC  $k_{inf} = 1,359$ , среднее значение других программ  $k_{inf} = 1,372$ ). Небольшое отклонение полученных результатов может быть обусловлена различием в библиотеках сечений, использованных при расчете бенчмарка и OpenMC.

#### Библиографические ссылки

1. Интернет-адрес: <https://docs.openmc.org/en/stable/index.html>.
2. Ellis R. J. Analyses of Weapons-Grade MOX VVER-1000 Neutronics Benchmarks: Pin-Cell Calculations with SCALE/SAS2H // 2000. P. 42.
3. Интернет-адрес: <https://docs.openmc.org/en/stable/examples/pincell.html>.

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА АМИНО-ПРОИЗВОДНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО $\beta$ – ТРИКЕТОНА В РАСТВОРАХ И ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ

А.С. Пилипович

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*hanpasilipovich@gmail.com;*

науч. рук. – С. Л. Бондарев, канд. физ-мат. наук, доц.

Проведено исследование внутримолекулярного переноса протона в полярных и неполярных растворах *транс*-2-(4'-диметиламинбензилиденацетил)-5,5-диметилциклогексан-1,3-дион (ДМД) методами ЯМР спектроскопии и люминесценции, а также проведена оценка частоты колебаний протона в водородной связи между карбонильной и гидроксильной группами. Выявлены три формы вещества, которые могут переходить друг в друга при изменении физико-химических характеристик окружения. Рассмотрены также спектрально-люминесцентные свойства ДМД в полимерных пленках.

**Ключевые слова:** водородная связь; перенос протона; полимерные пленки.

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы переноса заряда и переноса протона являются фундаментальными процессами в физике и химии возбужденных состояний органических молекул [1, 2]. Они играют ключевую роль в фотосинтезе и зрении [3]. Органические соединения с переносом заряда и переносом протона находят широкое применение в науке, технике и медицине в качестве люминофоров [4], перспективных материалов для создания элементов молекулярной электроники [5] и лекарственных препаратов [6], органических магнитов и электролюминесцентных органических светодиодов.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовался *транс*-2-(4' - диметиламинбензилиденацетил)-5,5-диметилциклогексан-1,3-дион (ДМД), который был синтезирован канд. хим. наук Пырко А.Н.

Использованные в работе растворители подвергались осушке и перегонке с последующим контролем путем регистрации их спектров поглощения. Полимерные пленки с ДМД в поливиниловом спирте формировали из 6 %-ных растворов ПВС марки Moviol 28-99 (Hoëchest, Германия), растворением в нем хромофора с последующим отливом на кварцевую подложку и высушиванием на воздухе в течение двух суток.

Растворы ДМД с различным значением  $pH$  готовились с помощью универсальной буферной смеси, состоящей из смеси уксусной, фосфорной и борной кислот.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для ЯМР в жидкостях характерны большие времена релаксации. Для протонов, например, они лежат в диапазоне 0,1 – 10,0 с. Это обуславливает одно из самых важных достоинств метода ЯМР спектроскопии. В нашем случае время релаксации составляет приблизительно 0,5 мс. Таким образом, обнаруженный в  $^1H$  ЯМР спектре уширенный сигнал в области слабого поля принадлежит протону, который, колеблется с частотой  $\sim 1$ кГц. Эти результаты подтверждают тот факт, что между двумя атомами кислорода существует водородная связь, которая указывает на *енольный* характер ДМД в жидком растворе.

Рассмотрим спектрально-люминесцентные свойства ДМД в ДМФ. В этом случае, как следует из Рис. 1, наблюдается сильная зависимость формы и положения спектров флуоресценции от длины волны возбуждения. При ступенчатом изменении  $\lambda_{\text{возб.}}$  с шагом 20 нм можно выделить 3 люминесцирующих формы с максимумами при 450, 515 и 580 нм. При регистрации в этих максимумах наблюдались спектры возбуждения флуоресценции соответственно с максимумами при 335, 380 и 470 нм.

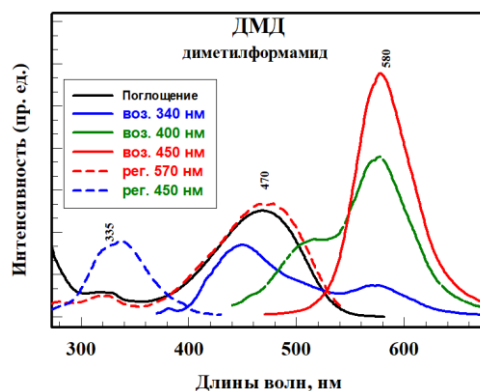


Рис 1. Спектры поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции ДМД в ДМФ

Первая форма – *енольная*, с водородной связью между атомами гидроксильного и карбонильного кислорода, соответствуют спектры поглощения и флуоресценции в ДМФ с максимумами при 470 и 580 нм (Рис. 1). При этом вся сопряженная система молекулы включает в себя и малое кольцо с водородной связью.

Следующая форма молекулы ДМД в ДМФ характеризуется спектром поглощения с максимумом при  $\lambda_{\text{погл.}} = 380$  нм и спектром флуоресценции с максимумом при  $\lambda_{\text{ф.л.}} = 515$  нм. При установлении молекулярной структуры этой спектральной формы необходимо учитывать тот факт, что в сильно полярной среде, к которой принадлежит ДМФ, может происходить переход из *енольной* формы в *катионную* форму. При этом промежуточной формой между *енольной* и *катионной* формами будет ионная форма в виде аниона ДМД-.

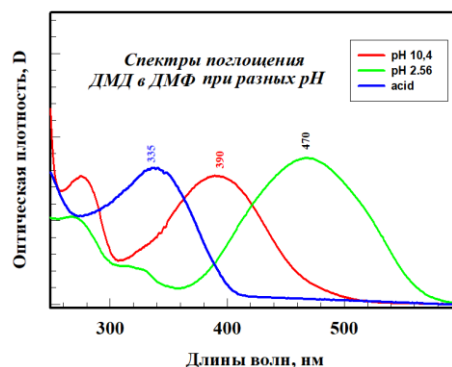


Рис 2. Спектры поглощения ДМД в ДМФ при изменении pH среды

Мы предполагаем, что анионная форма ДМД соответствует форме со спектром флуоресценции с максимумом при  $\lambda_{\text{ф.л.}} = 515$  нм. И наконец, третья коротковолновая спектральная форма с максимумами полос поглощения и флуоресценции при 335 нм и 450 нм может быть обусловлена катионной формой.

Как видно из Рис. 2 при переходе от кислых сред к щелочным ДМД проходит все три формы. Этот результат позволяет использовать ДМД в качестве индикатора кислотно-щелочного равновесия среды.

Спектры поглощения и флуоресценции ДМД в полимерных пленках поливинилового спирта (ПВС) и полистирола (ПСТ), показанные на Рис. 3, указывают на различие в полуширинах их спектров поглощения ( $3994$  и  $2821$   $\text{см}^{-1}$ ). Этот экспериментальный факт можно объяснить различием в неоднородном распределении молекул ДМД в полимерных матрицах ПСТ и ПВС.

Проведя сравнение спектров ДМД в растворах и пленках, можно предполагать более сильные межмолекулярные взаимодействия в пленках.

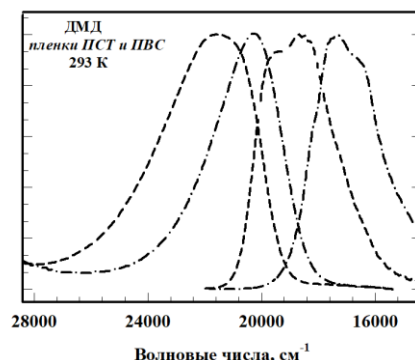


Рис 3. Спектры поглощения и люминесценции ДМД в полимерных пленках ПСТ и ПВС.

Данные, полученные для пленок, носят предварительный характер. Предполагается более детально исследовать их структурные особенности, а также возможности их практического применения в качестве нелинейно-оптических элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами люминесценции и ЯМР-спектроскопии показано, что молекула аминопроизводного циклического -трикетона в зависимости от кислотно-основных свойств среды может находиться в виде трех различных структурных форм. Данное свойство исследованного хромофора может быть использовано в химическом анализе, например, для индикации кислотно-щелочного равновесия среды.

Обнаружены значительные изменения спектрально-люминесцентных свойств ДМД при переходе от растворов к полимерным пленкам. Эти результаты могут быть использованы для получения информации о структурных внутримолекулярных особенностях строения полимеров.

## Библиографические ссылки

1. А.Н. Теренин. Фотоника молекул красителей. Изд. Наука. Л. 1967.
2. М.А. Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия. ИФМЛ, 1962
3. А.Л. Толстик. Многоволновые взаимодействия в растворах сложных органических соединений. // Мн.: БГУ, 2002, 159 с.
4. И.М. Гулис, А.И. Комяк. Люминесценция. Мн., БГУ, 2009.
5. А.Н. Пырко, С.Л. Бондарев, И.И. Калоша. 2003. Патент РБ. № 8132.
6. С.Л. Бондарев, А.С. Ляхов, А.Н. Пырко. Кристалл. 2005. № 2. Т. 50. С. 254.



# ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА МЕДИ (I)

**А. И. Сикорский**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*mr.a.i.sikorski@gmail.com;*

*науч. рук. – Н. С. Магонь, ассист.*

В работе исследуются тонкие плёнки оксида меди (I), полученные методом электрохимического осаждения из щелочно-тарtratного электролита, с добавлением различных анионов солей  $\text{Cu}^{2+}$ , при повышенной температуре и различных потенциале и заряде осаждения. На основании данных, полученных с помощью рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии, спектров пропускания, комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции, установлен оптимальный потенциал осаждения, который составил 300 мВ относительно медного электрода сравнения.

**Ключевые слова:** оксид меди (I), электрохимическое осаждение, тарtrat.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Оксид меди (I) является перспективным и активно изучаемым материалом, который уже нашёл применение в различных областях науки и техники: в качестве компонента антикоррозийных и влагостойких покрытий, фильтров для очистки воды и солнечных элементов [1-3]. Главными преимуществами  $\text{Cu}_2\text{O}$  являются невысокая стоимость производства и низкая токсичность входящих в него химических элементов.

Наиболее простым и доступным способом получения  $\text{Cu}_2\text{O}$  является метод электрохимического осаждения. Однако используемые на сегодняшний день электролиты характеризуются низкой стабильностью при длительном хранении и повышенных температурах [4].

Таким образом, основной целью работы являлось усовершенствование метода электрохимического осаждения тонких плёнок оксида меди (I) из щелочно-тарtratного электролита. Для этого коллабораторами с кафедры электрохимии БГУ были разработаны улучшенные щелочно-тарtratные электролиты, на основе различных солей меди:  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ . Полученные электролиты характеризовались стабильностью при высоких температурах (до 90 °C) и длительном хранении (несколько месяцев). Это позволило сократить время синтеза плёнок толщиной 1 мкм с нескольких часов до получаса за счет повышения температуры электролита, а также уменьшить себестоимость синтеза за счёт повторного использования раствора. Тем

не менее, при электрохимическом осаждении  $\text{Cu}_2\text{O}$  возможно формирование других фаз, таких как  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}$ . Поэтому основной задачей являлось экспериментальное определение оптимальных значений потенциала и заряда осаждения оксида меди (I), а также влияния анионов солей  $\text{Cu}^{2+}$  на фазовый состав, морфологию поверхности и оптические свойства данных пленок.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки оксида меди (I) были получены методом электрохимического осаждения в потенциостатическом режиме на ИТО подложки размером 0,8 x 1,2 см при температуре 60 °С с использованием медного электрода сравнения. В качестве электролита использовался водный раствор соли  $\text{Cu}^{2+}$  и тартрата натрия с  $\text{pH} \geq 9$ . В ходе эксперимента изменялись значения потенциала осаждения (300, 400, 500 мВ), а также величина осаждаемого заряда (556, 1113, 2225 мКл), которая определяла толщину плёнок. Полученные пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  исследовались с помощью методов рентгеноструктурного анализа (XRD), сканирующей электронной микроскопии (SEM), спектральной фотометрии (спектров пропускания), комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1*a-в* представлены SEM поверхности образцов, полученные в присутствии  $\text{SO}_4^{2-}$  при зарядах осаждения 2225 мКл (1I), 1116 мКл (2I), 553 мКл (3I) соответственно, и постоянном потенциале 500 мВ. Для всех образцов наблюдается равномерное покрытие подложки слоем с типичной структурой  $\text{Cu}_2\text{O}$ , а также образование полусфер на ее поверхности (рис. 1*г*). Оцененная по спектрам пропускания ширина запрещённой зоны полученных пленок (рис. 1*д*) составила 2.2, 2.3 и 2.5 эВ. Спектры КРС (рис. 1*е*) поверхности плёнок свободных от полусфер соответствуют  $\text{Cu}_2\text{O}$ , а в области полусфер наблюдается ФЛ характерная для  $\text{Cu}$  (рис. 1*ж*). Таким образом, при любом заряде осаждения на поверхности образцов образуются полусферы, содержащие  $\text{Cu}$ . Поэтому следующим этапом работы было определение потенциала осаждения, при котором на поверхности пленки не будут формироваться медные полусферы.

На рис. 2*a-в* представлены SEM поверхности образцов, полученных при потенциалах осаждения 400 мВ (1U), 500 мВ (2U) и 300 мВ (3U) соответственно в присутствии  $\text{SO}_4^{2-}$ . По полученным фотографиями видно, что оптимальный потенциал осаждения  $\text{Cu}_2\text{O}$ , при котором не

образуются медные полусферы, составил 300 мВ. Оцененная по спектрам пропускания (рис.2д) ширина запрещённой зоны полученных плёнок составила 2.1, 2.4 и 2.5 эВ. Спектры КРС (рис.2е) поверхности плёнки свободной от полусфер соответствуют  $\text{Cu}_2\text{O}$  и наблюдается характерная длинноволновая ФЛ, обусловленная кислородными вакансиями (рис.2ж). В области полусфер наблюдается ФЛ характерная для Cu.

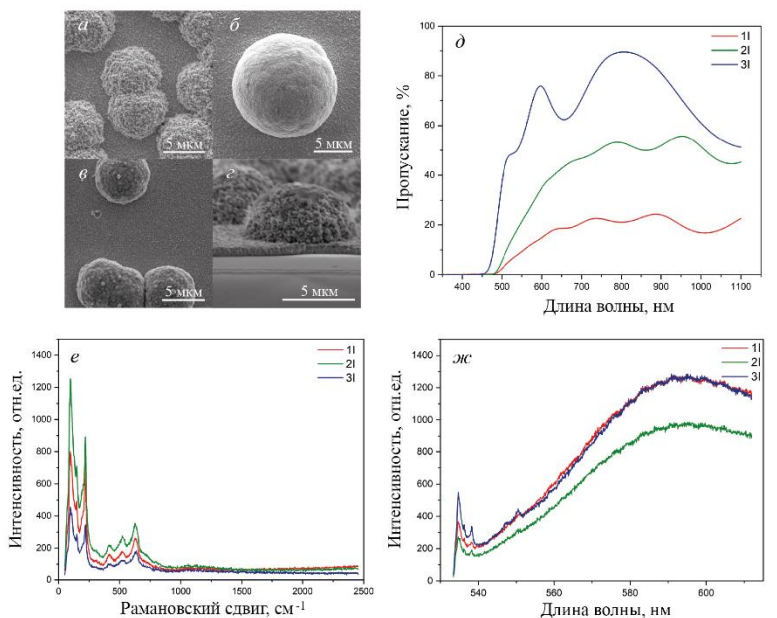


Рис 1. а-в) SEM поверхности и г) скола образцов 1I, 2I, 3I соответственно; д) спектры пропускания, е) спектры КРС и ж) спектры ФЛ на «полусферах».

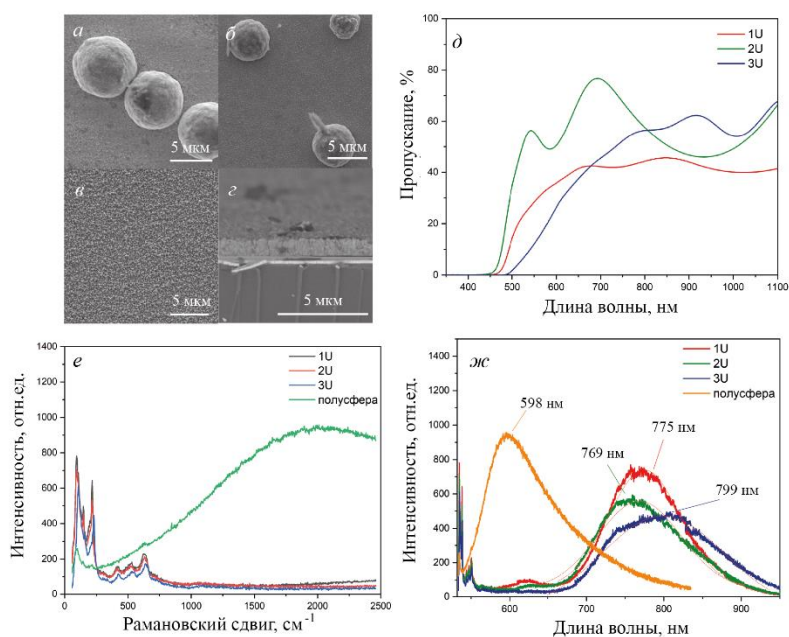


Рис 2. а-в) SEM поверхности и г) скола образцов 1U, 2U, 3U соответственно; д) спектры пропускания, е) спектры КРС и ж) спектры ФЛ.

На рис. 3 представлены данные исследования пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$ , полученных из нитратного и хлоридного электролитов при потенциале 300 мВ. Использование ионов  $\text{NO}_3^-$  слабо влияет на морфологию пленок, в то время как добавление  $\text{Cl}^-$  приводит к образованию крупных кристаллов (рис. 3а-г). Низкое пропускание пленок (рис. 3д), осажденных из раствора с ионами  $\text{Cl}^-$ , вероятно связано с их морфологией, а отсутствие ярко выраженного края полосы собственного поглощения делает невозможным оценить ширину запрещенной зоны образцов. Спектры КРС обоих образцов соответствуют  $\text{Cu}_2\text{O}$ , однако для «хлоридных» пленок наблюдаются пики ФЛ соответствующие  $\text{Cu}$  (рис. 3е). Также стоит отметить, что для «нитратных» пленок интенсивность ФЛ, обусловленная кислородными вакансиями, выше, чем для хлоридных.

Сравнивая отношение интенсивностей пиков в спектрах XRD (рис. 3ж), полученных для исследуемых пленок, можно утверждать, что структура кристаллов «хлоридных» пленок преимущественно октаэдрическая, в то время как «нитратным» и «сульфатным» пленкам соответствует кубический тип кристаллической решетки.

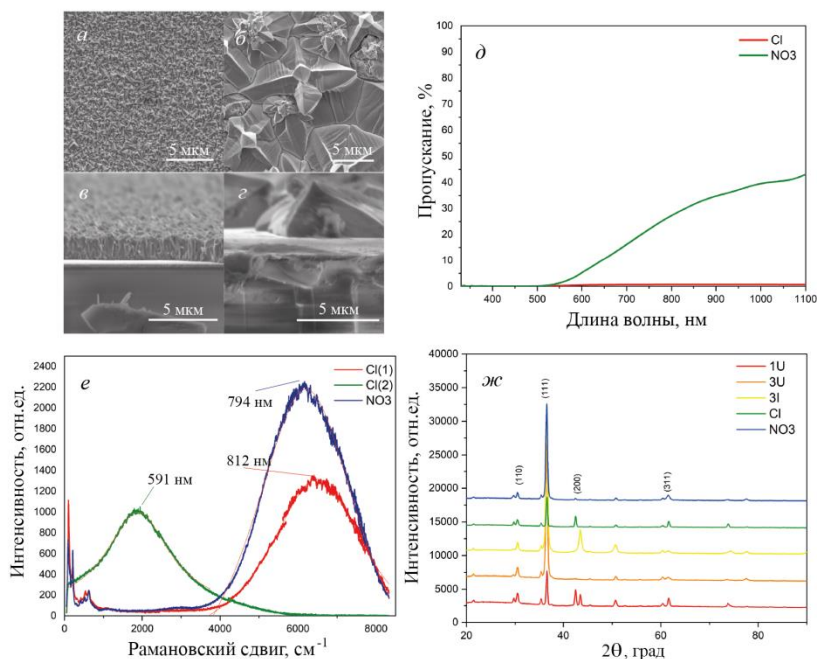


Рис 3. а-б) SEM поверхности и в-г) скола пленок, полученных с добавлением  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{Cl}^-$  соответственно, и их д) спектры пропускания, е) КРС и ФЛ; а также ж) XRD всех полученных образцов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате серии экспериментов с более чем 15 образцами были определены оптимальные условия электроосаждения тонких (1 мкм) пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$  из щелочно-тарtratного электролита улучшенного состава, содержащего сульфат-, нитрат- или хлорид-анионы. Так, для синтеза при температуре электролита 60 °С оптимальный потенциал осаждения  $\text{Cu}_2\text{O}$  на ИТО подложки размером 0,8 x 1,2 см составляет 300 мВ относительно медного электрода сравнения. Заряд осаждения для каждого образца необходимо рассчитывать отдельно, и он зависит от требуемой толщины пленок (Первый закон Фарадея).

Стоит отметить, что изменение химического состава электролита (использование других солей меди) не влияет на его стабильность. Однако данные анионы ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) оказывают значительное влияние на морфологию поверхности и оптические свойства электроосажденных тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Так, присутствие хлорид-анионов в растворе электролита приводит к формированию крупных октаэдрических кристаллов  $\text{Cu}_2\text{O}$  размером от 5 до 10 мкм, неравномерно расположенных на поверхности подложки ИТО. Данные плёнки имеют низкий коэффициент пропускания в видимой области, вероятно обусловленный сильным рассеянием света на гранях полученных кристаллов. Присутствие нитрат-анионов приводит к значительному увеличению интенсивности фотолюминесценции, обусловленной наличием кислородных вакансий. Наилучшие структурные и оптические свойства наблюдаются при использовании сульфат-анионов.

### Библиографические ссылки

1. Интернет-адрес: [nordox.no/industrial-applications/antifouling/](http://nordox.no/industrial-applications/antifouling/).
2. *K.Domagala, C.Jacquin*, Efficiency and stability evaluation of  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MWCNTs}$  filters for virus removal from water, *Water Research* Volume 179, (2020) 115879.
3. *Samah Boudour, Idris Bouchama*, Optimization of defected  $\text{ZnO}/\text{Si}/\text{Cu}_2\text{O}$  heterostructure solar cell, *Optical Materials* Volume 98 (2019) 109433.
4. *P.E. de Jongh, D. Vanmaekelbergh, J.J. Kelly*,  $\text{Cu}_2\text{O}$ : Electrodeposition and Characterization, *Chem. Mater.* 11 (1999) 3512–3517.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ БЕНАРА-РЭЛЕЯ МЕТОДОМ ТРАССИРОВКИ ЧАСТИЦ

**Я. Д. Титовец**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*yoscrimmer@gmail.com;*

*науч. рук. – А. С. Федотов, канд. физ.-мат. наук*

В работе рассматривается метод трассировки частиц для системы с конвекцией Бенара-Рэлея, заключающийся в отслеживании идеальных безмассовых частиц (контрольных объемов текучей среды) в потоке. Скорость каждой частицы при этом считается совпадающей со скоростью жидкости. Рассматриваемый метод позволяет получить фазовые портреты области решения уравнений Навье-Стокса. В полученных в работе фазовых портретах установлено наличие стабильной огибающей в регулярном режиме, а в распределении частиц по энергиям обнаружено наличие трех максимумов, обусловленных упорядоченным характером течения в системе с конвекцией Бенара-Рэлея.

**Ключевые слова:** конвекция Бенара-Рэлея; метод трассировки частиц; уравнения Навье-Стокса; фазовый портрет.

## ВВЕДЕНИЕ

Конвективная неустойчивость в тонком слое жидкости наблюдается во многих технических системах, а также представляет интерес с точки зрения теории самоорганизации. Одним из самых распространенных видов течений жидкости и газа в природе является конвекция, связанная с неоднородным нагревом. Конвекция в плоском горизонтальном слое жидкости, нагретом снизу и охлажденном сверху, или конвекция Бенара-Рэлея, является одним из наиболее распространенных видов конвективного течения, исследуемым на сегодняшний день.

Конвекция Бенара-Рэлея играет важную роль в геофизике, астрофизике, метеорологии, океанографии и инженерии, иными словами, представляет собой феномен, который наблюдается на различных пространственных и временных масштабах [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках приближения Буссинеска жидкость предполагается слабо сжимаемой и зависимость плотности от температуры учитывается в виде:

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta\theta), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\rho_0$  – плотность жидкости при равновесной температуре,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения,  $\theta$  – отклонение температуры от равновесного состояния.

На расчетной области была поставлена начально-краевая задача для системы уравнений для термогравитационной конвекции несжимаемой жидкости в приближения Буссинеска [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}\nabla)\bar{v} &= -\frac{1}{\rho_0}\nabla P + \nu\Delta\bar{v} + \bar{g}\beta\theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\bar{v}\nabla)\theta &= \chi\Delta\theta \\ \operatorname{div}\bar{v} &= 0 \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

где  $\bar{v}$  – скорость течения,  $P$  – давление,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\bar{g}$  – ускорение свободного падения,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности.

Для задачи были поставлены следующие граничные и начальные условия:

$$\begin{cases} T = T_{hot}, y = 0, x \in \Gamma \\ T = T_{cold}, y = y_{max}, x \in \Gamma \\ -\bar{n} \cdot \lambda \nabla T = 0, x = 0, y \in \Gamma \\ -\bar{n} \cdot \lambda \nabla T = 0, x = x_{max}, y \in \Gamma \\ \bar{v} = 0, (x, y) \in \Gamma \\ \bar{v}|_{t=0} = 0, (x, y) \in \Omega \\ T|_{t=0} = T_0, (x, y) \in \Omega \end{cases} \quad , \quad (2)$$

где  $\Omega$  – расчетная область,  $\Gamma$  – граница расчетной области,  $x_{max}$  – максимальное значение координаты  $x$  в расчетной области,  $y_{max}$  – максимальное значение координаты  $y$  в расчетной области,  $\bar{n}$  – нормаль к границе области,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

Решение задачи с помощью COMSOL Multiphysics базируется на численном решении уравнений в частных производных методом конечных элементов, основанным на проекционных методах решения уравнений или вариационных методах минимизации функционалов.

В данной работе была выбрана дискретизация, под которой понимают представление истинного решения задачи на элементе в виде приближенной функции, с использованием базисных функций «P2 + P1» в COMSOL Multiphysics, позволяющая рассчитать скорость с ошибкой не хуже  $O(h^2)$  и давление с ошибкой не хуже  $O(h)$ . Для температуры

была выбрана линейная дискретизация, которая позволяет рассчитать температуру с ошибкой не хуже  $O(h)$ .

Сетка, построенная для данной задачи, включает 2646 треугольных элементов, из которых 172 элемента являются граничными (рис.1).

У границ расчетной области сетка сгущается для того, чтобы лучше разрешить течение приграничного слоя. Поскольку на границах жидкость считается неподвижной, нужно большее количество элементов для корректного разрешения перехода от неподвижной жидкости на границах расчетной области к подвижной внутри нее.

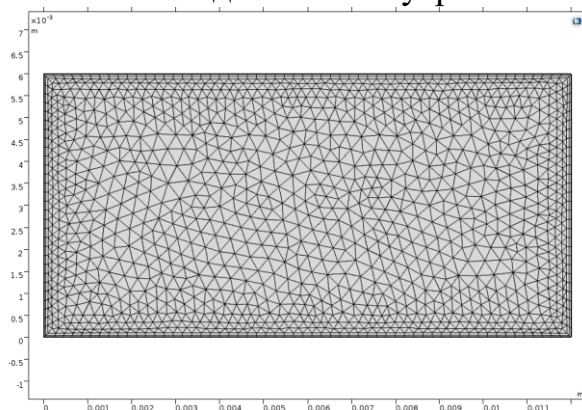


Рис. 1. Расчетная сетка для задачи о конвекции Бенара-Рэля

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Путем моделирования в COMSOL Multiphysics была получена классическая картина конвекции Бенара-Рэля. На рис.2 представлены поле температуры и поле скорости в стационарном режиме. Число Рэля при этом составляет  $2,2 \cdot 10^5$ .

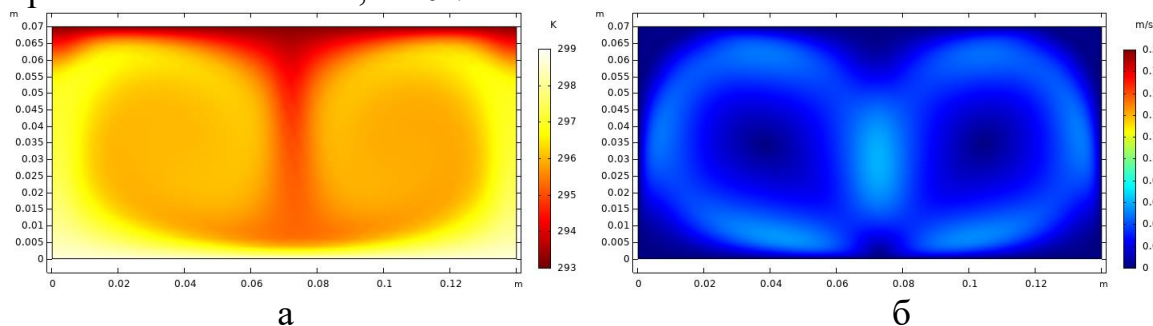


Рис. 2. Поле температуры (а) и поле скорости (б) для конвекции Бенара-Рэля

На рис.3 изображены линии тока для движения жидкости.



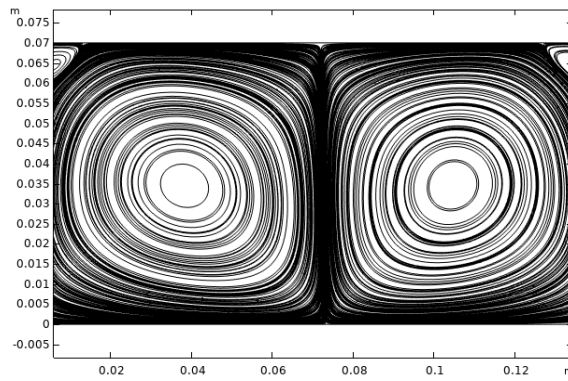


Рис. 3. Линии тока для конвекции Бенара-Рэлея

Скорость введенных в ламинарный поток безмассовых частиц в любой точке пространства совпадает со скоростью, полученной из уравнений Навье-Стокса. Для расчетов был использован метод обобщенных минимальных невязок (GMRES). GMRES – итерационный метод решения очень больших систем линейных уравнений. Ключевая идея GMRES основана на решении задачи наименьших квадратов на каждом итерационном шаге. В расчетах использовалось 80 000 частиц (рис.4).

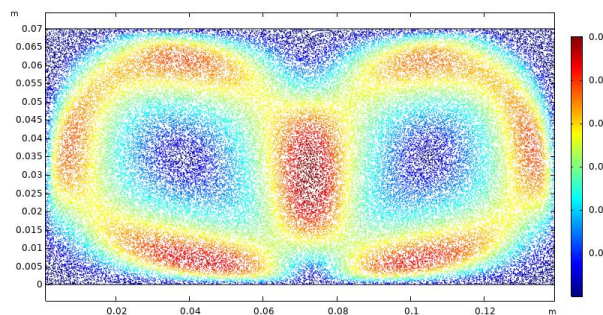


Рис. 4. Положение частиц в устойчивом вихре

В результате расчетов были получены фазовые портреты (рис.5).

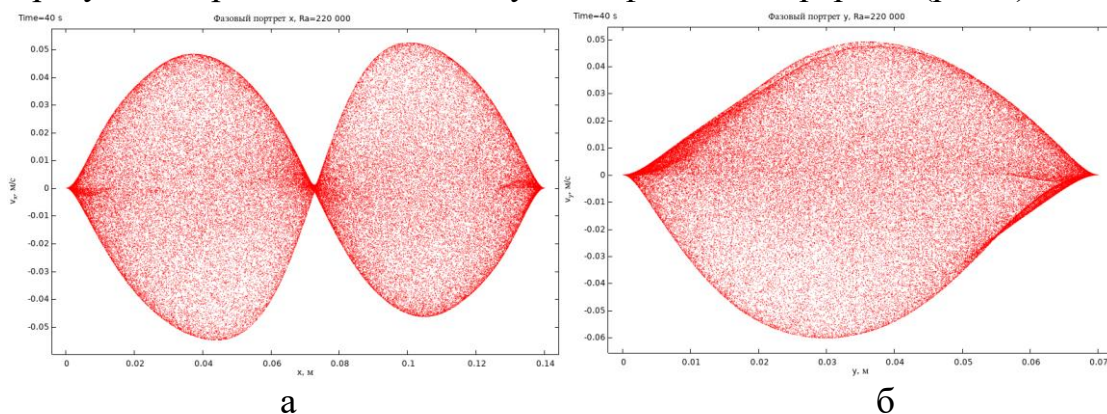


Рис. 5. Фазовый портрет  $x$  (а) и  $y$  (б)

Также было построено распределение введенных в поток безмассовых частиц по энергии, исключая частицы со скоростью,

близкую к нулевой, которая была присуща частицам вблизи стенок. На рис.6 представлены гистограммы распределения частиц по энергии и по нормированной энергии для различных чисел Рэлея.

На гистограммах можно заметить 3 максимума, первый и самый явный из которых соответствует почти неподвижным частицам у стенок. Положение второго максимума, соответствующего частицам на границе вихрей, сдвигается в сторону меньших нормированных энергий и в сторону больших абсолютных энергий с ростом числа Рэлея. Так же можно заметить, что высота второго и третьего максимумов с ростом числа Рэлея падает относительно фона.

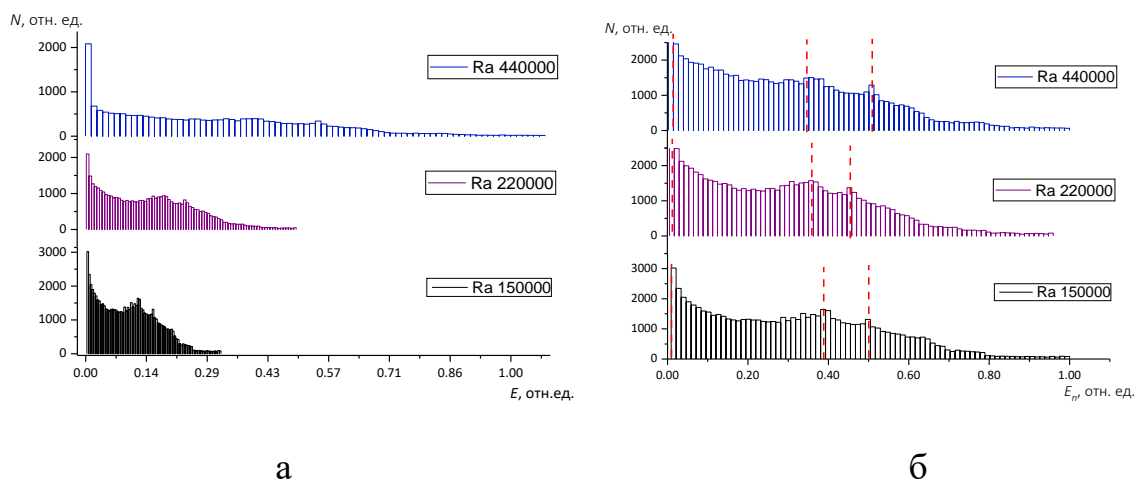


Рис. 6. Гистограммы распределения частиц по энергии (а) и по нормированной энергии (б)

Таким образом, исходя из полученных фазовых портретов установлено, что вся исследуемая область характеризуется устойчивыми фазовыми портретами со стабильной огибающей. Также методом трассировки частиц установлено, что распределение потока по локальной энергии демонстрирует наличие трех характерных максимумов, первый из которых соответствует почти неподвижным частицам у границы области, второй указывает на характерную энергию течения на границах устойчивых ячеек, третий - на характерную энергию течения в точках контакта между соседними ячейками, а также между ячейкой и стенкой.

### Библиографические ссылки

1. Григорьев В.В., Захаров П.Е. Численное моделирование двумерной конвекции Рэлея-Бенара // Математические заметки СВФУ, 2017, том 24, выпуск 1, с.87–98 с
2. Фрик П.Г. Турбулентность - подходы и модели. Москва: Институт компьютерных исследований, 2003. 292 с.

# ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКИСЛЕНИЕ ЦИРКОНИЯ

**В.В. Шевелёва, С.А. Прилуцкий,**

*Белорусский государственный университет, г.Минск;  
vikulya-sheveleva@mail.ru; 375298418315@yandex.ru;  
науч. рук. – В. И. Шиманский, канд. физ-мат наук, доц.;  
Н. Н. Черенда, канд. физ-мат. наук, доц.*

Целью данной работы является изучение фазового состава циркония, подверженного влиянию высокоэнергетического плазменного воздействия, при его окислении в атмосфере воздуха при температурах 500, 700°С ( $\alpha$ -Zr) и 900°С ( $\beta$ -Zr). Полученные результаты необходимы для рассмотрения, какие структурные изменения происходят в материале при воздействии на него импульсным высокоэнергетическим потоком, установления зависимости проникновения кислорода в образец, скорости возникновения оксида на всей поверхности и охрупчивании металла при данном способе обработки.

**Ключевые слова:** цирконий, окисление, оксид, плазменные потоки, фазовый состав, модификация поверхности, диффузия, нитрид циркония, изменение массы, оксидная пленка.

## ВВЕДЕНИЕ

Цирконий – блестящий металл серебристо-серого цвета. Обладает высокой пластичностью, имеет высокую температуру плавления, устойчив к коррозии. Цирконий обладает небольшим сечением захвата тепловых нейтронов, поэтому металлический цирконий, не содержащий гафний, и его сплавы применяются в атомной энергетике для изготовления тепловыделяющих элементов, тепловыделяющих сборок и других конструкций ядерных реакторов [1].

Однако, не смотря на все эти свойства, цирконий очень сильно подвержен окислению. В пределах 200-400°С цирконий начинает медленно окисляться, покрываясь диоксидом циркония  $ZrO_2$ ; выше 800 С энергично взаимодействует с кислородом воздуха. Наличие растворенных в металле малых количеств кислорода, азота, водорода и углерода (или соединений этих элементов с цирконием) вызывает хрупкость циркония. Для снижения скорости окисления оболочек ТВЭЛов используются различные методы модифицирования поверхности, в частности, нанесение защитных покрытий, легирование дополнительными элементами, обработка концентрированными потоками энергии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования в данной работе являлись пластины технически чистого циркония с размерами  $10 \times 10$  мм и толщиной 2 мм. После модификации поверхности компрессионными плазменными потоками (КПП) образцы отжигались в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 500, 700 и 900°C при различных временах выдержки ( $t$ ). Фазовый состав исследовался на основе рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении ( $\lambda=0,154178$  нм) в геометрии Брэгга-Брентано. Измерение массы материала осуществлялось на электронных весах с точностью  $\pm 0,00001$  г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 1 представлена дифрактограмма обработанного КПП образца перед отжигом и в течение 4 часов отжига при температуре 500 °С. Как известно, воздействие КПП на материалы способствует диспергированию зеренной структуры с повышенной плотностью межзеренных границ, которые, в свою очередь, служат путями ускоренной диффузии кислорода. Однако воздействие КПП, осуществляющееся в атмосфере азота, приводит к формированию приповерхностного слоя нитрида циркония (ZrN) [2], служащего барьером для проникновения кислорода.

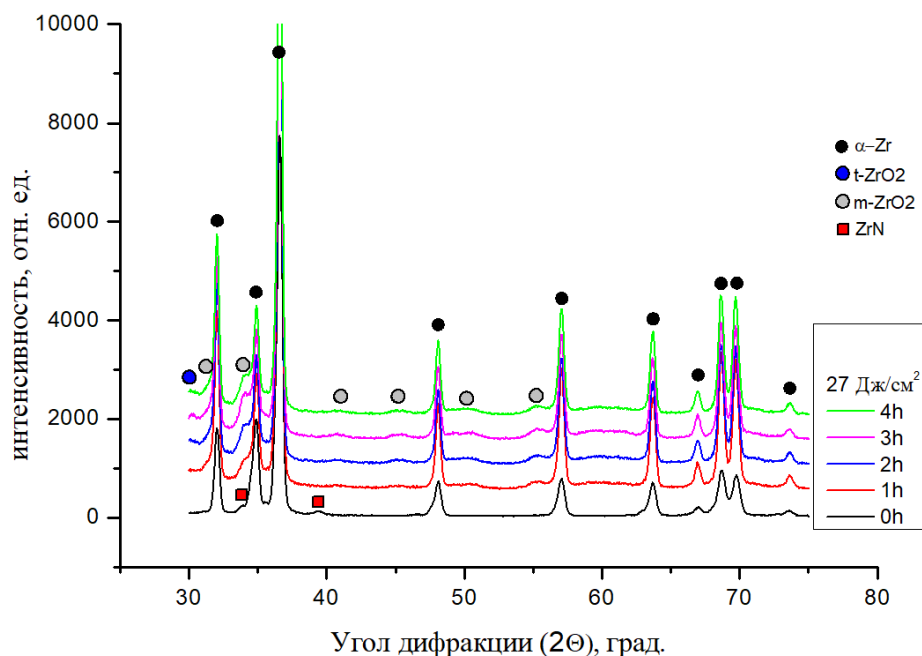


Рис. 1 Дифрактограмма образца, обработанного КПП с последующим отжигом.

Во время отжига кислород растворяется в поверхностном слое металла, и при достижении определенной его концентрации на поверхности образуется оксид  $ZrO_2$  [3]. Это подтверждается анализом дифрактограмм (рисунок 10), на которых наблюдается исчезновение пиков нитрида циркония и появление пиков моноклинной и тетрагональной фазы диоксида циркония.

Из литературных данных следует, что тетрагональная фаза не является стабильной при температуре образования оксидов, но к стабилизации этой фазы могут привести несколько факторов: легирующие элементы в твердом растворе, малый размер зерна и высокие сжимающие напряжения [4].

Также в работе измерялась масса необработанного и обработанных КПП образцов (рисунок 2) после каждого часа отжига.

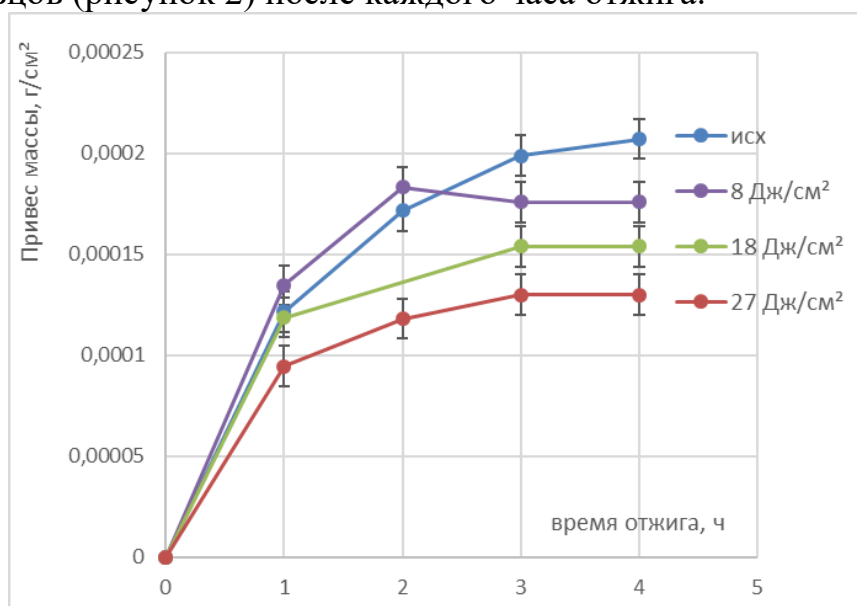
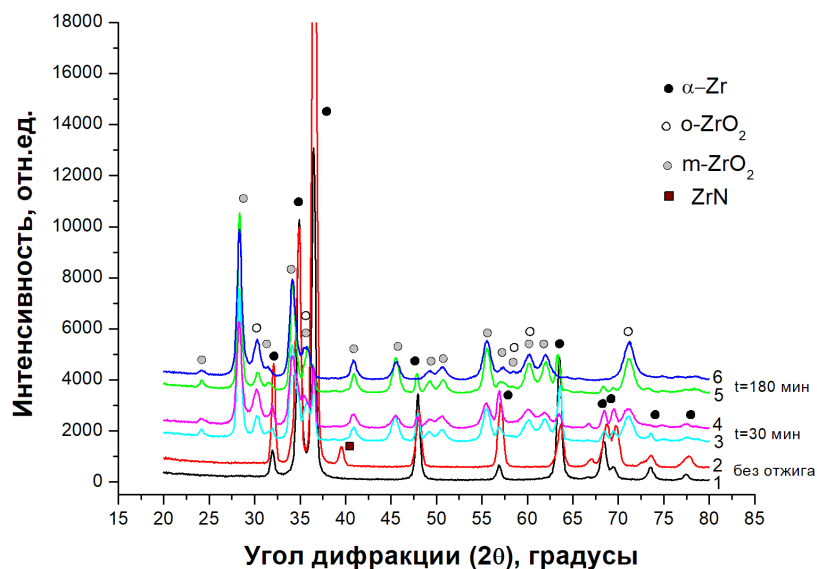


Рис. 2 Зависимость изменения массы исходного образца и образцов, обработанных КПП при различных режимах, от времени отжига.

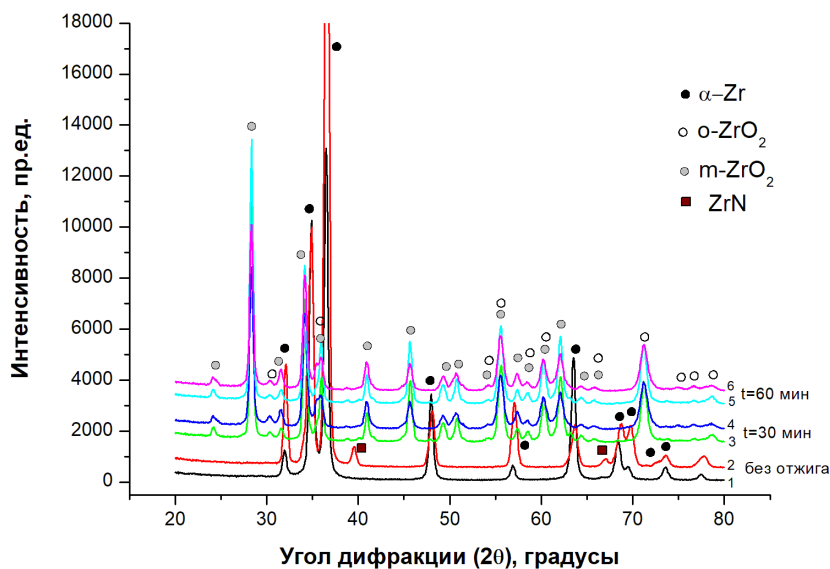
По полученной зависимости можно судить о степени коррозионного воздействия воздушной атмосферы на образцы при  $T = 500$  С. Как видно из графика, у обработанных компрессионными плазменными потоками образцов, коррозионный привес в 1,3-1,6 раза ниже, чем у необработанного.

На рисунке 3а представлены дифрактограммы образцов после отжига при температуре  $700^\circ\text{C}$ . Заметно, что, после 180 мин. отжига, у образца после воздействия КПП поверхностный слой, прослеживаемый рентгеноструктурным анализом, полностью покрыт оксидным слоем (1а-б), чего нельзя сказать об образце без воздействия плазмы, на котором еще прослеживаются максимумы циркония (1а-5). Наблюдаются оксиды двух модификаций: моноклинный ( $m-ZrO_2$ ) и орторомбический ( $o-ZrO_2$ ).

На рисунке 3б представлены дифрактограммы образцов после отжига при температуре 900°C. Видно, что с увеличением времени рентгеновские спектры не меняются, что свидетельствует о том, что данные образцы покрыты плотным слоем оксида, который превышает глубину проникновения рентгеновского излучения. Максимумы циркония не проявляются. Так же при различном времени отжига наблюдаются только две модификации оксидного слоя: моноклинный и орторомбический.



*a*



*б*

Рис. 3 – Дифрактограммы циркония после высокотемпературного окисления, где: *a* – при температуре 700°C, *б* – при температуре 900°C (1,3,5 – без предварительного воздействия КПП; 2,4,6 – после воздействия КПП)

Высокотемпературное окисления циркония приводит к увеличению массы образца, что объясняется диффузией кислорода в образец и образованием оксида. На рисунке 4а представлена зависимость прироста массы при отжиге при температуре 700°C. На начальном этапе отжига (до 120 минут) наблюдается влияние предварительной плазменной обработки на скорость увеличения массы образца. Образцы, обработанные КПП, характеризуются меньшей скоростью увеличения массы, что указывает на более низкую интенсивность диффузии кислорода.

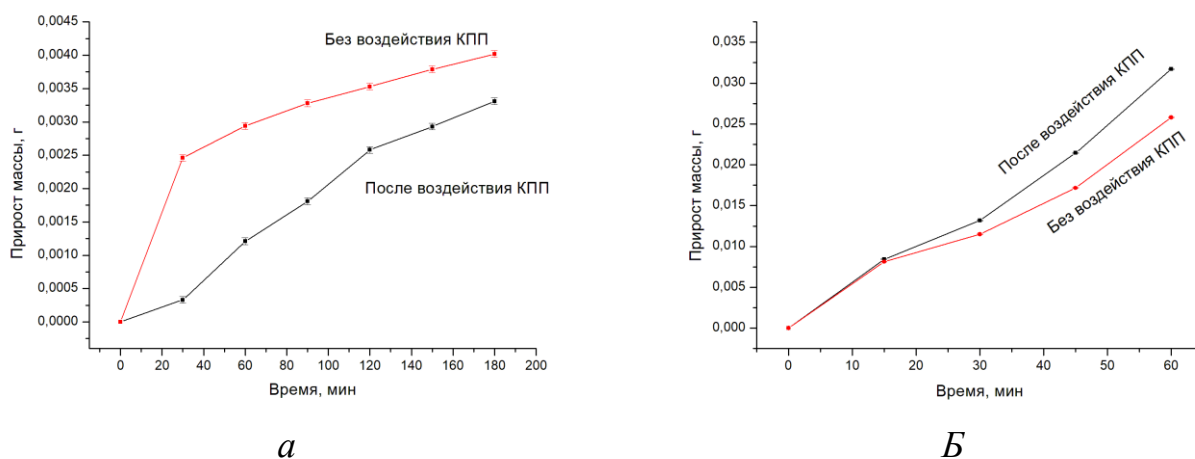


Рис. 4 – Зависимость прироста массы образцов от времени отжига, где: а – при температуре 700°C, б – при температуре 900°C

Однако на рисунке 4б наблюдается обратная ситуация. При отжиге при температуре 900°C образец, обработанный КПП, быстрее подвергается окислению и поэтому образец интенсивнее покрывается окалиной и прирост массы увеличивается, что возможно из-за наличия зернограницной диффузии, которая в образцах с измельченной зеренной структурой более активна.

В работе было исследовано влияние обработки образцов циркония компрессионными плазменными потоками и последующего отжига на фазовый состав и скорость окисления. При температуре 500 °C после отжига наблюдается наличие тетрагональной фазы оксида циркония, которая полностью превращается в моноклинную при увеличении температуры отжига. Также при увеличении температуры и времени отжига с дифрактограммы исчезают пики циркония, что свидетельствует об образовании сплошной оксидной пленки на поверхности. Также установлено, что после отжига при 500-700 °C привес массы у обработанных КПП образцов меньше, чем у необработанных; но при

дальнейшем увеличении температуры до 900 °С наблюдается обратная ситуация.

#### Библиографические ссылки

1. Дуглас, Д.А. Металловедение циркония / Д.А. Дуглас. – М.: Атомиздат, 1975. – 340 с.
2. Cherenda N.N., Uglov V.V., Kuleshov A.K., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M.. Surface nitriding and alloying of steels with Ti and Nb atoms by compression plasma flows treatment // Vacuum. 2016. Vol. 129. P. 170–177.
3. Khan, I.A. Nitridation of zirconium using energetic ions from plasma focus device / I.A. Khan, M. Hassan, R. Ahmad, A. Qayyum, G. Murtaza, M. Zakaullah, R.S. Rawat // Thin Solid Films 516. – 2008. – p. 8255–8263.
4. Fettle, D. Residual stresses in high temperature corrosion of pure zirconium using elasto-viscoplastic model: Application to the deflection test in monofacial oxidation / D. Fettle, S. Bouvier, J. Favergeon, L. Kurpaska // Applied Surface Science, 2015. – No. 357. – p. 777–786.



# БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

## СРАВНЕНИЕ УРОВНЯ КОРТИКОСТЕРОНА В МОЧЕ ЛАБОРАТОРНЫХ МЫШЕЙ, СОДЕРЖАВШИХСЯ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ

**К. П. Авимова**

*Белорусский государственный университет;*

*avimova@gmail.com;*

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

Условия содержания могут влиять на физиологические показатели лабораторных животных. Некоторые факторы среды способны вызывать стресс, его маркером у грызунов является свободный кортикостерон в моче. Мы сравнили этот показатель для двух групп мышей, содержащихся в различных условиях. У мышей, содержащихся попарно в небольших клетках, уровень кортикостерона был достоверно ниже, чем у мышей, содержащихся вместе с десятками разнополых сородичей в больших ящиках.

**Ключевые слова:** лабораторные животные, условия содержания, кортикостерон.

### ВВЕДЕНИЕ

На поведение и физиологические показатели лабораторных животных влияют различные факторы среды, в частности, содержание в малых и больших группах, размеры и структура жизненного пространства.

Так, ближайшие родственники лабораторных мышей *Mus musculus* в природе живут семьями (колониями). В естественной среде животные могут расселяться, дистанцироваться друг от друга и таким образом избегать слишком частых взаимодействий. При слишком тесном содержании в неволе между животными чаще возникают конфликты [1, 2], что может приводить к хроническому стрессу и сказываться на физиологическом и эмоциональном состоянии животных и влиять на их поведение. К примеру, формирование деспотических иерархий в группах лабораторных мышей сопряжено с проявлениями агрессии повышенной продукцией кортикостерона у субординантов [3].

С одной стороны, хронический стресс изменяет физиологические показатели (активность гипофизарно–надпочечниковой системы, размеры вилочковой железы и надпочечников); с другой – вызывает долговременные поведенческие эффекты [4]. Всё это может исказить результаты экспериментов, так как не даёт объективно оценить реакцию животных на экспериментальные воздействия.

Маркером хронического стресса у грызунов является уровень свободного кортикостерона, содержащегося в моче. Этот показатель позволяет оценить «базовый» уровень продукции кортикостерона (а не одномоментный, как при анализе крови) и сравнить животных из разных групп по этому параметру: чем выше этот показатель, тем активнее вырабатывается кортикостерон, что может свидетельствовать о хроническом стрессе.

В нашем эксперименте мы проверили, различается ли содержание кортикостерона в моче мышей, содержащихся в разных условиях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мы взяли две группы лабораторных мышей. Животные из первой группы в течение 4 месяцев содержались попарно в клетках 30x20 см. Вторую группу составили мыши, содержащиеся в стандартных ящиках размерами 95x40 либо 65x40 см в компании десятков сородичей.

Для эксперимента мы случайным образом отобрали по 8 самцов из каждой группы.

Сбор мочи осуществлялся по методике [5]. Мыши были одновременно помещены в пластиковые клетки по одному до мочеиспускания, но не более чем на 50 минут. За отведённое время помочилось 5 мышей из первой группы и 4 мыши из второй группы. Моча собиралась пластиковой пипеткой, переносилась в пробирки типа «Эппердорф» и была заморожена при сверхнизкой температуре.

Биохимический анализ был проведён спустя три недели. Сначала мы выделили из образцов кортикостерон по модифицированной методике Балашова [6], а затем определили его количественное содержание с помощью спектрофлуориметрии [6, 7]. Суть модификации метода Балашова: так как в моче кортикостероидов значительно меньше, чем в плазме, мы увеличили объём мочи в два раза, не изменив количества остальных реактивов. Это соответствует описанным в литературе приёмам работы с мочой (см., например, [8]).

Этапы работы с образцами:

1. К 0,2 мл мочи добавили 1,5 мл метиленхлорида, пробирки встряхивали на лабораторной качалке в течение 3 мин и заморозили на 20 мин. После этого слой метиленхлорида перенесли в чистую пробирку и добавили 0,5 мл свежеприготовленного флуоресцентного реактива (абсолютный этиловый спирт и концентрированная серная кислота, 3:7, приготовлен при охлаждении). После встряхивания на лабораторной качалке в течение 3 мин удалили органическую фазу, образцы оставили на 1,5 часа.

2. В подготовленных образцах измерили флуоресценцию ( $\lambda_{\text{погл.}}$  470 нм,  $\lambda_{\text{эмис.}}$  530 нм).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке указаны средние уровни интенсивности образцов в каждой из групп. Так, для мышей, содержащихся попарно, этот показатель (СО) составил 0,94 (0,221), а для мышей, содержащихся массово, – 1,62 (0,219). Разница является статистически значимой (критерий Манна–Уитни,  $\alpha=0,016$ ).

Интенсивность флуоресценции указывает на содержание вещества в образцах: в нашем случае чем она сильнее, тем больше кортикостерона в моче.

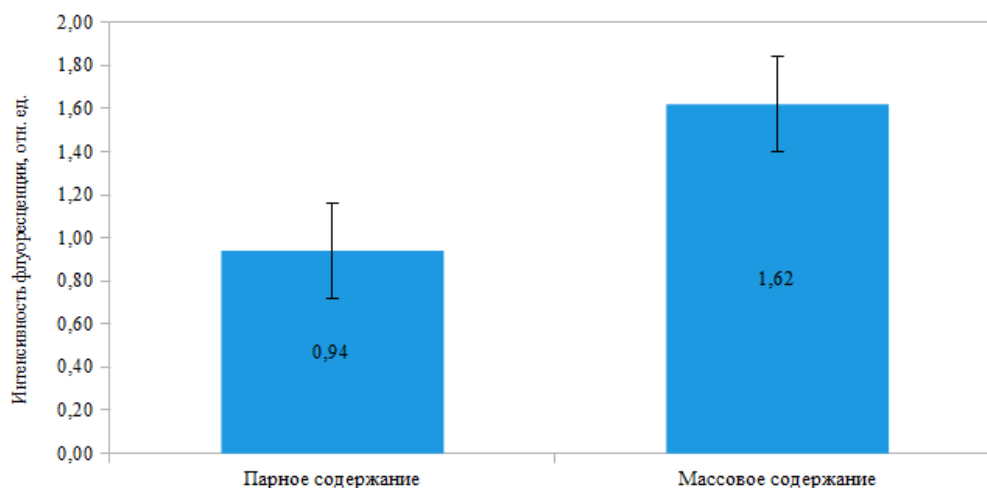


Рис. Уровень кортикостерона в моче мышей

Наш эксперимент показал, что у лабораторных мышей, содержащихся в разных условиях, есть разница в продукции кортикостерона. Так, у мышей, содержащихся попарно уровень кортикостерона ниже, чем у мышей, содержащихся вместе с десятками сородичей. Это может говорить о том, что при массовом содержании животные испытывают более сильный стресс чем при парном содержании.

### Библиографические ссылки

1. Bayne, K. The impact of environmental enrichment on the outcome variability and scientific validity of laboratory animal studies. / K. Bayne, H. Würbel // *Rev. Sci. Tech.* – 2014. – Vol. 33, № 1. – P. 273–80.
2. Girbovan, C. Environmental enrichment in female rodents: Considerations in the effects on behavior and biochemical markers / C. Girbovan, H. Plamondon // *Behav. Brain Res.* – 2013. – Vol. 253 – P. 178–190.
3. Social context-dependent relationships between mouse dominance rank and plasma hormone levels / C.M. Williamson [et al.] // *Physiol. Behav.* – 2017. – Vol. 171 – P. 110–119.
4. Long-term behavioral and neuroendocrine alterations following chronic social stress in mice: Implications for stress-related disorders / V. Sterlemann [et al.] // *Horm. Behav.* – 2008. – Vol. 53, № 2. – P. 386–394.
5. Nesting material as environmental enrichment has no adverse effects on behavior and physiology of laboratory mice / H.A. Van De Weerd [et al.] // *Physiol. Behav.* – 1997. – Vol. 62, № 5. – P. 1019–1028.
6. Балашов, Ю.Г. Способ определения кортикостероидов в плазме крови экспериментальных животных. / Ю.Г. Балашов. – 1991.
7. SILBER, R.H. Practical procedure for estimation of corticosterone or hydrocortisone. / R.H. SILBER, R.D. BUSCH, R. OSLAPAS // *Clin. Chem.* – 1958. – Vol. 4, № 4. – P. 278–285.
8. Martin, M.M. Simultaneous determination of cortisol and corticosterone in urine / M.M. Martin, A.L.A. Martin, M.E. McManus // *Clin. Chim. Acta.* – 1970. – Vol. 27, № 3. – P. 379–383.

## ПЕРЕНОС КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ CRISPR/CAS9 В КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА INVITRO

**Н. М. Боброва, С. А. Дубовик**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
librark@yandex.by; duboviksimon@gmail.com;  
науч. рук. – Т.В.Романовская, канд. биол. наук, доц.*

Получена линия клеток эмбриональной почки человека HEK293T, стабильно экспрессирующая ген гид РНК к 8 экзону гена RUNX1T1 и ген нуклеазы Cas9. Для достижения поставленной цели в два этапа была проведена котрансфекция клеток HEK293T векторами лентивирусной системы, несущими целевые гены, сбор полученных вирусных частиц и лентивирусная трансдукция линии HEK293Tc последующей селекцией трансдуктантов. Определены разведения вирусного супернатанта, с использованием которых возможно эффективное осуществление лентивирусной трансдукции (1:1, 10–1, 10–2). Результаты данной работы могут быть основой для проведения аналогичных исследований на культурах клеток ОМЛ.

**Ключевые слова:** острый миелоидный лейкоз; транслокация (8;21); гибридный онкоген RUNX1–RUNX1T1; система CRISPR/Cas9; котрансфекция векторами лентивирусной системы; лентивирусная трансдукция.

Острый миелоидный лейкоз (ОМЛ) является одним из наиболее распространенных лейкозов у взрослого населения: на его долю приходится около 80% случаев. Заболевание характеризуется клональной экспансией незрелых миелоидных предшественников в костном мозге и периферической крови, что, в свою очередь, приводит к дефектам эритропоэза. Наиболее распространенной абберацией при ОМЛ (встречается в 4–12% случаев) является транслокация между 8 и 21 хромосомами, что приводит к образованию гибридного гена RUNX1–RUNX1T1 [1]. Исследования на животных моделях свидетельствуют о том, что сама по себе эта мутация не способствует становлению лейкозного фенотипа [2], что, в свою очередь, показывает важность других мутаций, приобретаемых впоследствии. В связи с этим представляет интерес нокаут гибридного онкогена RUNX1–RUNX1T1 с помощью системы CRISPR/Cas9. Для решения поставленной задачи наша команда предложила нокаут 8–го экзона гена RUNX1T1 в линии ОМЛ Kasumi–1. Ввиду сложности манипуляций с данной культурой в настоящей работе были проведены испытания и оптимизация технологии на адгезионной культуре клеток эмбриональной почки человека HEK293T, что позволило получить линию со стабильной экспрессией гена гид РНК и Cas9. Работа включала несколько этапов, в ходе которых осуществлялось выделение препаратов плазмидной ДНК, получение псевдотипированного вирусного суперна-

танта и собственно лентивирусной трансдукции клеток НЕК293Т с последующей селекцией трансдуктантов.

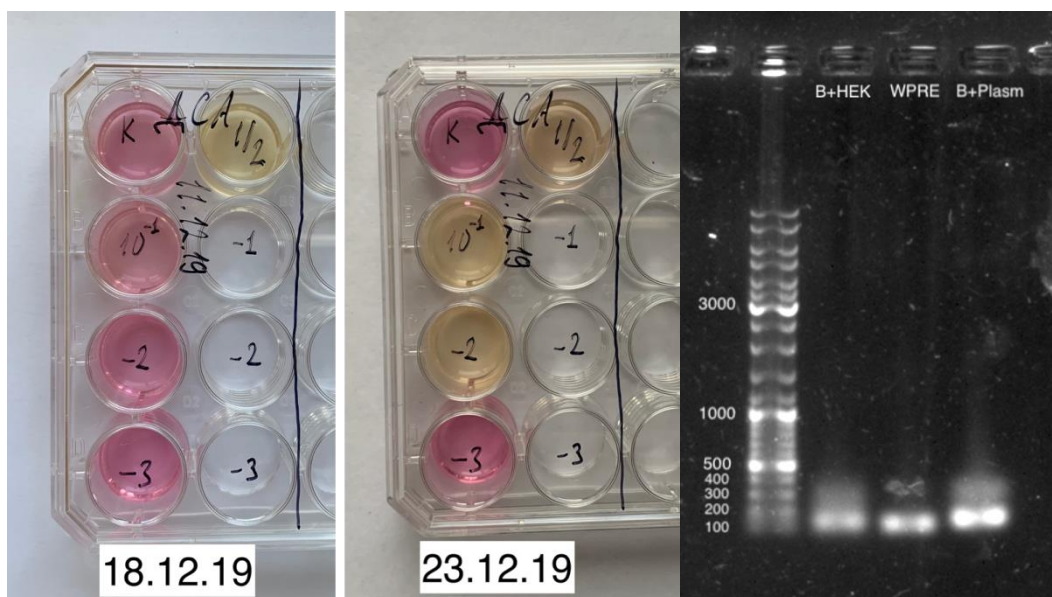
В данной работе была использована система из трёх плазмид [3, с. 44], которые при совместном попадании в клетку приводят к образованию псевдотипированных лентивирусных частиц. Получение лентивирусносупернатанта предполагает котрансфекцию клеток смесью плазмид рСМV + рMD + lenti-Cas9-blast или рU6sgRNA. В этой системе основная плазида (lenti-Cas9-blast или рU6sgRNA) имеет сигнал для упаковки в вирусную частицу. Остальные две плазмиды – вспомогательные и являются коммерческими препаратами. рMD содержит ген белковой части гликопротеина VSV-G, ответственный за неспецифическое связывание с цитоплазматической мембраной широкого круга клеток. рСМV кодирует полипротеин Gag-Pol, но не имеет 5'- и 3'-LTR и сигнала упаковки.

Препараты плазмидной ДНК векторов рU6sgRNA (с геном гидРНК) и lenti-Cas9-blast (с геном Cas9) были получены из ночной культуры *E. coli* путём щелочной экстракции с осаждением полиэтиленгликолем (ПЭГ), после чего они были растворены в стерильных условиях в ТЕ-буфере.

Для котрансфекции была приготовлена смесь, в которой соотношение полиэтиленимина (PEI) и ДНК составляло 4:1. Смесь ДНК включала плазмиды рСМV, рMD и lenti-Cas9-blast (или рU6sgRNA) в массовом соотношении 2:1:3. Котрансфекция НЕК293Т проводилась в минимальной среде DMEM по достижении конfluence 80–90 %. Через сутки минимальная среда была заменена на полноценную. По прошествии 72 часов было проведено отделение супернатанта и его очистка от дебриса путём центрифугирования на максимальных оборотах.

Лентивирусная трансдукция включала в себя добавление различных разведений вирусного супернатанта к клеткам линии НЕК293Т с последующей селекцией трансдуктантов с помощью антибиотика (бластицидина или пурамицина), так как на плазидах lenti-Cas9-blast и рU6sgRNA имеются гены антибиотикорезистентности к бластицидину и пурамицину соответственно.

В ходе выполнения данной работы сначала была проведена модификация клеток линии НЕК293Т плазмидой, содержащей ген гид РНК, а затем в клетки полученной линии был осуществлен перенос гена Cas9. Изменение окраски кислотно-основного индикатора в питательной среде DMEM свидетельствовало о наличии активно растущей культуры клеток. Как и предполагалось, при большей концентрации лентивирусных частиц закисание среды происходит раньше (рисунок 1а). Для проверки наличия гена гид РНК были проведены реакции ПЦР (рисунок 1б).



а б

Рис. 1. а) Изменение окраски кислотно–основного индикатора в питательной среде DMEM свидетельствует о наличии активно растущей культуры клеток, б) Проба WPRE – положительный контроль на фрагмент лентивирусного вектора). Проба B+Plasm – положительный контроль на на ген гидРНК в исходной плазмиде. Проба B+HEK – реакция на наличие гена гидРНК (его спейсерной части) в образце ДНК модифицированной линии HEK293T

Подсчет селективируемых клеток HEK293T, несущих оба гена – ген гидРНК и ген Cas9 – представлен в таблице.

Таблица

**Подсчет клеток HEK293T спустя два дня и пять дней с начала селекции**

Вариант опыта	Живых клеток ( $\times 10^3$ кл/мл)	Мертвых клеток ( $\times 10^3$ кл/мл)	ЖСП, %
Спустя 2 дня с начала селекции			
Контроль + БЦ (5 мкг/мл)	1135	10	99,1
Трансдуктанты 1:1 + БЦ (5 мкг/мл)	995	45	95,7
Трансдуктанты 1:10 + БЦ (5 мкг/мл)	1260	50	96,2
Спустя 5 дней с начала селекции			
Контроль + БЦ (5 мкг/мл)	5	25	16,6
Трансдуктанты 1:1 + БЦ (5 мкг/мл)	1080	80	93,1
Трансдуктанты 1:10 + БЦ (5 мкг/мл)	795	115	87,4

Примечание: БЦ – бластицидин; 1:1, 1:10 – разведения вирусного супернатанта

Следует отметить, что при изучении клеток в контрольной лунке под микроскопом на пятый день с начала селекции до трипсинизации и подсчета бóльшая часть клеток в контрольной лунке не была прикреплена к пластику. Эта основная масса неприкрепленных клеток, по-видимому, была удалена из лунки вместе со снимаемой перед трипсинизацией НЕК293Т средой. В целом результаты подсчета свидетельствуют о том, что для проведения успешной лентивирусной трансдукции НЕК293Т достаточно использовать разведение вирусного супернатанта 1:10, однако эффективность трансдукции в этом случае ниже, чем при использовании разведения 1:1. По всей видимости, это связано с тем, что не достигается необходимая множественность инфекции: в случае использования сильноразбавленного вирусного супернатанта, так как численность клеток значительно превышает численность вирусных частиц. Линии трансдуктантов были заморожены по методике для обычных НЕК293Т для дальнейших экспериментов.

Таким образом, в ходе данной работы была получена линия клеток НЕК293Т, несущих ген гидРНК к гену RUNX1T1 и ген нуклеазы Cas9. Установлено, что лентивирусная трансдукция эффективна при использовании разведений вирусного супернатанта 1:1,  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ . В дальнейшем планируется проверка работоспособности системы CRISPR/Cas9 в полученной клеточной линии НЕК293Т. Отработка системы в клетках НЕК293Т может стать основой нокаута гибридного онкогена RUNX1–RUNX1T1 в клетках ОМЛ линии Kasumi–1.

#### Библиографические ссылки

1. Müller A.M.S., Duque J., Shizuru J.A., Lübbert M. Complementing mutation in core binding factor leukemias: from mouse model to clinical applications // *Oncogene*. 2008. Vol. 27. № 44. P. 5759–5773. DOI:10.1038/onc.2008.196
2. Bäsecke J., Schwieger M., Griesinger F., Schiedlmeier B., Wulf G., Trümper L., Stocking C. AML1/ETO promotes the maintenance of early hematopoietic progenitors in NOD/SCID mice but does not abrogate their lineage-specific differentiation // *Leukemia & Lymphoma*. 2005. Vol. 46, № 2. P. 265–272. DOI:10.1080/10428190400010767
3. Гринев В. В., Посредник Д. В., Северин И. Н., Потапнев М. П. Генетическая модификация клеток человека с помощью лентивирусной трансдукции *in vitro* и *ex vivo* : метод. пособие для студентов, магистрантов и аспирантов биол. фак. Минск : БГУ, 2010.



# МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ХАРОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ В ОЗ. НАРОЧЬ

Н.В. Борейко

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

*boreyko.natali@mail.ru*

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

Определены такие морфофункциональные показатели харовых водорослей, как обводненность, зольность, удельная поверхность. Установлены закономерные изменения названных показателей в сезонном аспекте, а также в зависимости от глубины произрастания. Также определены и сопоставлены видовые различия морфофункциональных показателей *Charasp.* и *Nitellopsissp.*

**Ключевые слова:** макрофиты; харовые водоросли; обводненность; зольность; удельная поверхность; сезонная динамика.

Прибрежные макрофиты являются важным компонентом пресноводных экосистем, так как оказывают существенное влияние на биотический круговорот (являются продуцентами и поставщиками значительной части первичной продукции) [1], а также участвуют в процессах формирования качества воды (образуют естественный биофильтр между водосбором и водоемом, осаждая и накапливая загрязняющие вещества)[2].

Обычно роль макрофитов в водных экосистемах анализируют по величине биомассы, в настоящее время становится актуальной оценка площади поверхности. Жизненный процесс организма (а в нашем случае макрофита) отражается такими интегральными показателями, как линейный рост и рост массы [3].

Одним из показателей дисперсности живого вещества можно считать отношение живой поверхности к массе – величину удельной поверхности.

Известно, что интенсивность роста макрофита, связанная с поступлением питательных веществ, коррелирует с величиной его удельной поверхности [3]. Кроме этого, величина удельной поверхности, наряду с концентрацией в тканях питательных веществ, определяет трофический статус растения.

Площадь метаболической поверхности, а также удельная поверхность (соотношение площади поверхности к массе) относятся к наиболее важным морфофункциональным показателям, т.к. поверхность погруженных макрофитов выступает в качестве биоконтур, осуществляющего обменные процессы со средой[4].

Еще одной из причин, определяющей важность изучения морфологии макрофитов является то, что макрофиты служат основным субстратом для развития перифитона (касаемо озер умеренных широт). Суммарная поверхность растительных сообществ определяет размеры жизненного

пространства для прикрепленных сообществ. На основе этого оценивается роль перифитона в продукционном процессе.

Скорость и интенсивность включения биомассы макрофитов в биотический круговорот в значительной степени зависят от соотношения в ней между органической и минеральной фракциями, которое определяют по величине зольности[2]. Зольность является косвенным показателем, характеризующим энергетическую и трофическую ценность, биохимическую лабильность биомассы макрофитов [5].

**Материал и методы.** В нашем исследовании для расчета обводненности пробы были взвешены в сыром (предварительно обсушив на фильтровальной бумаге до исчезновения капельножидкой воды) и сухом виде (после естественного высыхания получили воздушно–сухую массу, после сушки в сушильном шкафу при температуре 70°C до постоянной массы –абсолютно сухую массу).

Площадь поверхности харовых водорослей определяли методом геометрического подобия.

Высушенные до постоянного веса образцы хары измельчалив фарфоровой ступке в порошкообразную массу. Из этой массы отбирали навески (по три параллельные для каждой пробы) для определения зольности харовых водорослей стандартным методом прокаливания в муфельной печи.

Результаты. Было выявлено, что обводненность харовых водорослей повышается к осени и максимального значения достигает к весне (таблица 1).

*Таблица 1*

**Морфофункциональные показатели харовых водорослей в различные сезоны года. Приведены средние значения ± стандартное отклонение. Пробы отобраны в озере Нарочь на глубине 0,5 м**

Дата	Обводненность, %	Зольность, %	Удельная поверхность относительно сырой массы, см <sup>2</sup> /г	Удельная поверхность относительно абсолютно сухой массы, см <sup>2</sup> /г
24.07.2018	71,2 ± 3,0	65,6 ± 2,6	62,7 ± 18,4	222,0 ± 8,5
25.09.2018	73,5 ± 0,2	70,0 ± 0,7	42,6 ± 3,6	161,0 ± 14,0
05.03.2019	80,8 ± 2,4	62,1 ± 1,1	39,1 ± 4,0	187,9 ± 14,2
22.04.2019	81,4 ± 2,6	64,4 ± 1,0	39,6 ± 2,1	243,0 ± 13,3
19.07.2019	75,6 ± 1,3	65,2 ± 2,0	52,3 ± 0,4	214,7 ± 11,6
26.09.2019	76,3 ± 2,5	68,9 ± 1,7	43,2 ± 0,7	182,4 ± 10,6
06.11.2019	76,3 ± 0,2	69,0 ± 2,2	40,8 ± 1,2	160,2 ± 4,9
25.03.2020	77,1 ± 1,0	63,0 ± 1,2	41,9 ± 0,4	182,9 ± 7,6

Возрастание доли влаги в талломах хары может быть обусловлено меньшей вегетацией талломов после завершения летнего сезона (в осен-

ний период), а в зимне–весенний период хара физиологически наиболее истощена, наблюдается частичное отмирание талломов. В это время фотосинтез либо крайне низкий, либо вообще не идет.

Со сменой сезонов года заметны существенные различия содержания минеральных веществ в биомассе талломов. Самые высокие показатели зольности зарегистрированы осенью –около 70%, самые низкие –весной –около 60%. Это объясняется тем, что в течение вегетационного периода идет осаждение и накопление карбонатов, сопряженное с процессом фотосинтеза. Накопившись за лето, концентрация карбонатов осенью достигает максимальной величины, а к весне теряется (частично растворяясь, а также при отмирании участков таллома) и величина зольности снижается.

Расчет удельной поверхности производился относительно не только сырой массы (живая поверхность), но и относительно абсолютно сухой массы (мертвая поверхность). Со сменой сезонов года удельная поверхность харовых водорослей относительно сырой массы изменяется в пределах от 39,15 см<sup>2</sup>/гдо 62,65 см<sup>2</sup>/г и абсолютно сухой массы от 160,16 см<sup>2</sup>/гдо 222,01 см<sup>2</sup>/г (см. таблицу 1).

Наибольшую удельную поверхность относительно сырой массы хара имеет в летний сезон, поскольку в это время хара активно вегетирует. Далее величина удельной поверхности снижается к осени (это объясняется ростом массы по причине накопления карбонатов) и наименьшей величины достигает в зимне–весенний период (в это время наблюдается наибольшая обводненность, следовательно, масса также возрастает). Изменение удельной поверхности относительно абсолютно сухой массы имеет похожий вид. Исключение составил подледный период (05.03.2019), когда не регистрировалось снижение удельной поверхности относительно абсолютно сухой массы. Причиной этого, как уже отмечалось, является высокая обводненность талломов в это время.

Рассмотрим изменение морфофункциональных показателей харовых в зависимости от глубины их произрастания (таблица 2). В диапазоне глубин 2–6 м обводненность закономерно возрастает с увеличением глубины. Величина обводненности у харовых водорослей в прибрежной зоне (0,5 м) существенно выше, чем на глубине 2 и 4 м. Мы предполагаем, что это связано с тем, что в прибрежной зоне харовые водоросли представлены одним видом *Charafragilis*, тогда как на других глубинах в исследуемых образцах присутствовали и другие виды харовых водорослей.

Зольность на глубине 0,5 м и 2 м держится практически на одном уровне: 65,2% и 65,6% соответственно. На глубине 4 м и 6 м наблюдается небольшой рост зольности: 69,9% и 70,2%. Таким образом, можно предположить, что с увеличением глубины зольность также возрастает.

Таблица 2

**Морфофункциональные показатели харовых водорослей на различных глубинах. Приведены средние значения  $\pm$  стандартное отклонение. Пробы отобраны 19.07.2019 с глубины 0,5 м, 13.07.2019 – с глубины 2, 4 и 6 м**

Глубина	Обводненность, %	Зольность, %	Удельная поверхность относительно сырой массы, см <sup>2</sup> /г	Удельная поверхность относительно абсолютно сухой массы, см <sup>2</sup> /г
0,5 м	75,6 $\pm$ 1,3	65,2 $\pm$ 2,0	52,32 $\pm$ 0,4	214,68 $\pm$ 11,6
2 м	71,6 $\pm$ 0,2	65,6 $\pm$ 2,0	53,91 $\pm$ 0,2	189,97 $\pm$ 0,9
4 м	73,3 $\pm$ 0,8	69,6 $\pm$ 1,2	61,62 $\pm$ 7,0	231,66 $\pm$ 29,0
6 м	77,6 $\pm$ 0,5	70,2 $\pm$ 0,7	78,58 $\pm$ 2,4	347,77 $\pm$ 12,0

С ростом глубины от 0,5 м до 6 м удельная поверхность возрастает с 52,3 см<sup>2</sup>/г до 78,6 см<sup>2</sup>/г сырой массы. Такая же динамика наблюдается относительно абсолютно сухой массы (189,9–231,7–347,8 см<sup>2</sup>/г) за исключением проб с прибрежной зоны (214,7 см<sup>2</sup>/г). Площадь поверхности может увеличиваться при уменьшении света, что связано с ростом глубины [6]. Также увеличение площади поверхности обратно связано с температурой воды [7], как известно, она понижается с ростом глубины.

*Nitellopsissp.* обладает близкой обводненностью, меньшей зольностью, чем *Charasp* (таблица 3). Также, исходя из полученных результатов, можно заключить, что *Nitellopsissp.* обладает меньшей удельной поверхностью относительно сырой и абсолютно сухой масс, чем *Charasp*. Вероятно, это следствие меньшей рассеченности таллома у *Nitellopsissp.*

Таблица 3

**Морфофункциональные показатели харовых водорослей. Приведены средние значения  $\pm$  стандартное отклонение. Пробы отобраны в озере Нарочь 16.07.2019, глубина 6 м**

Макрофит	Обводненность, %	Зольность, %	Удельная поверхность относительно сырой массы, см <sup>2</sup> /г	Удельная поверхность относительно абсолютно сухой массы, см <sup>2</sup> /г
<i>Charasp.</i>	77,4 $\pm$ 0,5	70,2 $\pm$ 0,7	78,6 $\pm$ 2,4	347,8 $\pm$ 12,0
<i>Nitellopsissp.</i>	78,9 $\pm$ 1,5	60,3 $\pm$ 2,1	64,6 $\pm$ 1,5	306,8 $\pm$ 28,4

Таким образом, в данном исследовании было показано, что харовые водоросли обладают сезонной динамикой морфофункциональных характеристик: обводненность возрастает в весенний период, зольность увеличивается в осенний сезон, а удельная поверхность максимальна летом. Выявлено изменение морфофункциональных показателей в зависимости от глубины произрастания: максимальная обводненность наблюда-

ются у образцов с глубины 6 м, водоросли с прибрежной зоны имеют также высокий уровень обводненности; зольность и удельная поверхность достигают наибольшей величины на глубине 6 м. Найдены видо-вые различия морфофункциональных показателей харовых водорослей: *Nitellopsis* sp. обладает немного большей обводненностью, меньшей зольностью и удельной поверхностью относительно сырой и абсолютно сухой массы по сравнению с *Chara* sp.

#### Библиографические ссылки

1. Экологическая система Нарочанских озер / под ред. Г. Г. Винберга. Мн., 1985.
2. *Боговая Н.А., Борейко Н.В.* Зольность массовых видов макрофитов нарочанских озер // 76-я Научная конференция студентов и аспирантов БГУ. Минск. 13–24 мая 2019 г. Минск, 2019. Часть 1. С. 287–298.
3. Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей / К.М. Хайлов [и др.]. Киев: Наукова думка, 1992.
4. *Макаревич Т.А., Боговая Н.А., Борейко Н.В.* К оценке метаболической поверхности погруженных макрофитов в озерах // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Национальный парк «Нарочанский». 9 – 11 октября 2019. С. 161–166.
5. Макрофиты в метаболизме экосистемы озера Нарочь / А. П. Остапеня [и др.] // Проблемы гидроэкологии на рубеже веков: тезисы докл. 2-й междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 11–15 октября 2000 г. СПб., 2000. С. 220.
6. *Spence D.H.N., Campbell R.M., Chrystal J.* Specific Leaf Areas and Zonation of Freshwater Macrophytes // *Journal of Ecology*. 1973. Vol. 2, № 61. P. 317–328.
7. *Johnson M.P.* Temperature Dependent Leaf Morphogenesis in *Ranunculus flabellaris* // *Nature*. 1967. № 214. P. 1354–1355.

# НОКАУТ ГЕНОВ ДАГФ–СИНТАЗ II ТИПА PSEUDOMONAS CHLORORAPHIS SUBSP. AURANTIACA B-162

**М. Е. Василевская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
vasilevskaya.margarita@mail.ru;  
науч. рук – А.И. Левданская, ассистент*

ДАГФ–синтаза катализирует первую реакцию шикиматного пути, необходимого для синтеза ряда ароматических соединений, в том числе и феназиновых антибиотиков (феназинов). В геноме *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-162 обнаружено два изофермента ДАГФ–синтаз подтипа Ia и два изофермента II типа. На сегодняшний день наименее изученным является ген, находящийся вне феназинового оперона и кодирующий ДАГФ–синтазу III типа. Вклад данного фермента в синтез феназинов не изучен. Анализ мутантов с нокаутированным геном внеоперонной ДАГФ–синтазы III типа показал, что отключение данного гена приводит к полному подавлению синтеза феназиновых антибиотиков.

**Ключевые слова:** нокаут генов, ДАГФ–синтаза, феназины, *Pseudomonas*.

## **ВВЕДЕНИЕ**

3–дезоксид–D–арабино–гептулозонат 7–фосфат синтаза (ДАГФ–синтаза) является ферментом, катализирующим первую реакцию шикиматного пути – взаимодействие фосфоенолпирувата и эритрозо–4–фосфата. Одной из ветвей этого пути является биосинтез феназинов. Это низкомолекулярные гетероциклические азотсодержащие соединения, основу которых составляет феназин–1–карбоксилат. Феназины имеют широкий спектр биологических свойств, за счет которых применяются в биотехнологии, медицине и сельском хозяйстве.

На основании филогении, размера ферментов и длины их последовательностей, ДАГФ–синтазы делятся на два типа: тип I и тип II [5]. У бактерий *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-162 были обнаружены четыре изофермента ДАГФ–синтаз. Два из них были классифицированы как подтип Ia и два как тип II. Один из генов, кодирующих ДАГФ–синтазу II типа, находится в составе феназинового оперона а, другой локализован за его пределами.

Индивидуальный вклад каждого из ферментов в синтез феназиновых антибиотиков до сих пор неизвестен. Однако в связи с меньшей изученностью ДАГФ–синтазы III типа, находящейся вне оперона, целью данной работы являлось выяснение вклада именно этого фермента в биосинтез феназиновых антибиотиков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной объект исследования – штамм *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В–162 (коллекционный номер ВКМВ–162) из коллекции кафедры генетики Белорусского государственного университета. Также в исследовании использовались штаммы *E. coli* XL–Blue и *E. coli* BW 19851. Культивирование данных бактерий осуществляли в стандартных питательных средах [2].

Выделение ДНК осуществлялось с помощью GeneJET–Genomic DNA Purification Kit #K0721.

ПЦР проводилась в смеси стандартного состава с использованием программируемого амплификатора Bio–Rad C1000 Touch Thermal Cycler. Для получения полноразмерного гена внеоперонной ДАГФ–синтазы II типа (~1347 п.о.) были использованы праймеры: прямой – **cggatccgatgagccaaccctg**; и обратный – **cggatccctcagcggttgacctg**. Для получения фрагмента гена внеоперонной ДАГФ–синтазы II типа (~130 п.о.) были использованы праймеры: прямой – **cggatccaacgtcaccgagtgcacatcg**; и обратный – **cggatcccaaggtctcggcaatcagga**. Все праймеры содержат навески из сайтов рестрикции BamHI.

Электрофоретический анализ осуществляли методом [6]. Очистка продуктов ПЦР из геля производилась с помощью набора АртДНК MiniSpin Гель производства «АртБиоТех» (Минск, Беларусь).

Реакции лигирования и рестрикции проводили согласно протоколам, рекомендованным фирмой производителем «МБИ Fermentas» (Литва).

Трансформацию бактерий проводили по стандартной методике с применением хлористого кальция (Mandel, Hida, 1970) [2]. Плазмидную ДНК выделяли методом щелочного лизиса (Birnboim–Doly) [3].

Конъюгация проводилась согласно оптимизированной для рода *Pseudomonas* методике [1]. Выделение и измерение концентрации феназиновых антибиотиков осуществлялось согласно методике [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы была выделена ДНК бактерий *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В–162 и амплифицирован ген внеоперонной ДАГФ–синтазы II типа. Данный ПЦР–продукт был использован в качестве матрицы для амплификации внутреннего фрагмента этого гена (130 п.о.) (рис. 1).

Полученный фрагмент гена был вырезан из геля и очищен, а затем клонирован в *E. coli* XL–Blue в составе вектора pTZ57R/T. Полученные трансформанты были высеваны на агаризованную питательную среду, содержащую ампициллин в качестве селектирующего фактора. Подтвер-

ждение наличия необходимой вставки было проведено с помощью ПЦР и рестрикционного анализа (рис. 2).

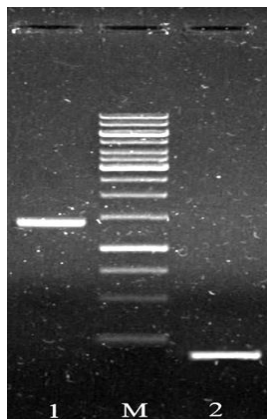


Рис 1. ПЦР-фрагменты ДАГФ-синтазы II типа 2 подтипа.

1 – полноразмерный ген (1347 п.о.); 2 – фрагмент 130 п.о.; М – маркер молекулярных масс TriDye 2–Long DNA Ladder

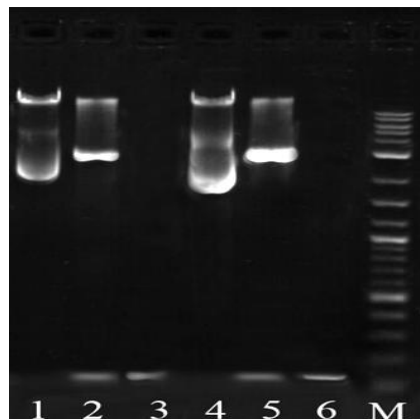


Рис 2. Электрофореграмма полученных генетических конструкций.

1 – рTZ57R/ДАHPИ, 2– рестрикция конструкции рTZ57R/ДАHPИ поBamHI, 3 – ПЦР-фрагмент (130 п.о.); 4 – рK18mob/ДАHPИ, 5 – рестрикция конструкции рK18mob/ДАHPИ поBamHI, 6 – ПЦР-фрагмент (130 п.о.), внутренней части гена; М – маркер молекулярных масс TriDye 2–Long DNA Ladder

На следующем этапе из трансформированных бактериальных клеток *E.coliXL–Blue* был выделен вектор рTZ57R/Т со вставкой фрагмента гена внеоперонной ДАГФ-синтазы II типа, который затем был вырезан и залигирован в суицидальную плазмиду рK18mob (рис 2). Полученная конструкция была использована для трансформации бактерий *E. coliXL–Blue*. Полученные трансформанты были высеваны на агаризованную питательную селекционную среду, содержащую канамицин.

Из полученных трансформантов была выделена плазмидарK18mob со вставкой и использована для трансформации бактерий *E. ColiBW 19851*. Данный штамм содержит в хромосоме *tra*-гены, что позволяет ввести полученную конструкцию в клетки бактерий *P.chlororaphissubsp. aurantiacaВ–162* посредством конъюгации.

После совместной инкубации штамма дикого типа *P.chlororaphissubsp. aurantiacaВ–162* и штамма *E. ColiBW 19851*, содержащего плазмидарK18mob со вставкой фрагмента гена внеоперонной ДАГФ-синтазы II типа произошла интеграция вышеописанной генно-инженерной конструкции в ген внеоперонной ДАГФ-синтазы II типа путем гомологичной рекомбинации, что нарушило структуру данного гена.

Полученные мутанты с нокаутированным геном были засеяны в продукционную среду для антибиотиков и культивировались в течение 5



суток с последующим выделением феназинов. По литературным данным наиболее активный синтез феназинов наблюдается на 3–4 сутки.

У всех полученных мутантов по сравнению со штаммом дикого типа отсутствовал оранжевый пигмент, свойственный феназинам, что свидетельствует об их отсутствии в среде (рис. 3). Анализ концентрации феназинов также дал отрицательный результат. Следовательно, отключение гена внеоперонной ДАГФ–синтазы II типа, приводит к полному подавлению синтеза феназиновых антибиотиков.

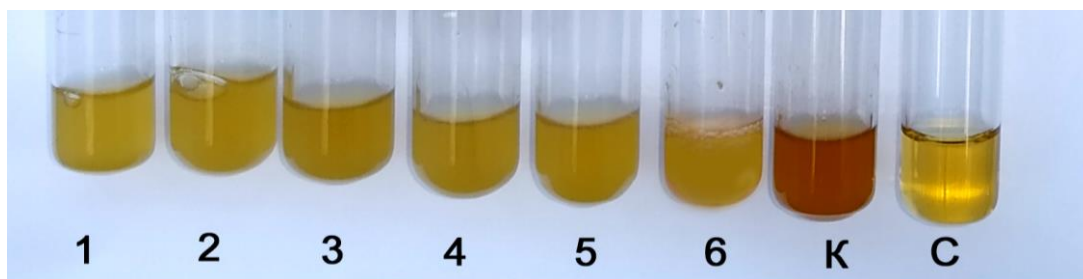


Рис 3. Бактериальная культура:

1– 6 – Мутанты с нокаутированным геном внеоперонной ДАГФ–синтазы; К – контроль *P.chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В–162; С – чистая продукционная среда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, доказано, что именно внеоперонная ДАГФ–синтаза II типа, является основным ферментом, участвующим в биосинтезе феназинов для штамма *P.chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В–162.

## Библиографические ссылки

1. *Веремеенко, Е.Г.* Оптимизация методики проведения сайт–направленного мутагенеза с использованием плазмиды *pk18mob* для бактерий рода *Pseudomonas* / Е.Г. Веремеенко, Шилова, Ю.А., Н.П. Максимова // Журнал Белорусского государственного университета. Биология. – 2017, № 1. – С. 56–61.
2. *Маниатис, Т.* Методы генетической инженерии. Молекулярное клонирование / Т. Маниатис, Э. Фрич, Д. Сэмбрук. – Москва: Мир, 1984. – 479 с.
3. *Birnboim, H.C.* A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA / H.C. Birnboim, J. Doly // *Nucleic Acids Research*. – 1979. – Vol. 7, № 6. – P. 1513–1523.
4. *Levitch, M.E.* Regulation of aromatic amino acid biosynthesis in phenazine–producing strains of *Pseudomonas* / M.E. Levitch // *J. Bacteriol.* – 1970. – Т. 103, № 1. – С. 16–19.
5. *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.
6. *Sambrook, J.* Molecular cloning: a laboratory manual. Molecular cloning / J. Sambrook, D.W. Russell. – Cold Spring Harbor, N.Y: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2001. – 3 с.

# ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛОГРЕЗИТЕНТЫХ МУТАНТОВ БАКТЕРИЙ *PSEUDOMONAS FLUORESCENS* И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПОВЫШЕННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА СОРТА «КОНКУРЕНТ» К АБИОТИЧЕСКОМУ СТРЕССУ

**А.Н. Заинчковская**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*anna.zainchkovskaya@mail.ru;*

*науч. рук. – Е. А. Храмова, канд. биол. наук, доц.*

Одной из актуальных задач современной биотехнологии является создание, с помощью генетических и генно-инженерных подходов, высокоактивных штаммов ризосферных бактерий, способных к сверхсинтезу индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) и АЦК-дезаминазы, и разработка приемов их использования для стимуляции роста сельскохозяйственных растений. Целью данной работы является получение аналогрезистентных мутантов бактерий, устойчивых к аналогам триптофана (NL-ацетил-DL-триптофан, 5-метил-триптофан), и изучение их влияния на повышенную устойчивость растений огурца к абиотическому стрессу.

**Ключевые слова:** этилен; АЦК-дезаминаза; индолил-3-уксусная кислота; *Pseudomonas fluorescens*; абиотический стресс

В ответ на действие неблагоприятных факторов окружающей среды в растительных клетках в избыточном количестве образуется гормона этилен («стрессовый» этилен), который действует угнетающе на растения, подавляя развитие корней, стеблей, образование и рост листьев, ускоряя процессы старения и способствуя проявлению симптомов заболевания [1].

Одним из подходов к снижению уровня стрессового этилена в растениях является использование бактерий группы PGPR, синтезирующих фермент 1-аминоциклопропан-1-карбоксилат-дезаминазу (АЦК-дезаминазу). АЦК-дезаминаза разлагает предшественника этилена – АЦК до аммиака и  $\alpha$ -кетобутирата, и тем самым снижает концентрацию стрессового этилена в растениях [2].

Для стимуляции роста растений бактерии могут использовать несколько механизмов. Одним из важнейших механизмов, который используется бактериями PGPR-группы для стимуляции роста растений также, является продукция ими фитогормона индолил-3-уксусной кислоты (ИУК). Она стимулирует как быстрые ответы (например, удлинение растительных клеток), так и длительные (ускорение деления и дифференцировки). Бактерии, стимулирующие рост растений, оказывают свое действие именно через изменение гормонального баланса в растениях. Прикрепляясь к корню развивающегося растения, бактерии PGPR также синтезируют ИУК в ответ на выделяемые растением вещества.

Клетки растения поглощают бактериальную ИУК, которая совместно с ИУК, синтезируемой самим растением, может стимулировать деление или рост клеток растения. Выделенная растением АЦК расщепляется АЦК–дезаминазой бактерий PGPR–группы на аммоний и  $\alpha$ –кетобутират. Таким образом, бактерии PGPR–группы могут, стимулировать рост растений как за счет продукции ими индолил–3–уксусной кислоты, так и синтеза АЦК–дезаминазы [3].

Бактерии *Pseudomonas fluorescens* относятся к бактериям PGPR–группы и характеризуются наличием фермента АЦК–дезаминазы, обладающего высокой активностью. Также было показано, что данный штамм является природным продуцентом ИУК. Однако, синтез этого фитогормона у бактерий *P. fluorescens* осуществляется в небольших количествах.

Для увеличения продукции ИУК была проведена серия химических мутагенезов. Была подобрана оптимальная концентрации N–метил–N'–нитро–N–нитрозогуанидина и условий проведения химического мутагенеза бактерии *P. fluorescens*. Оптимальная доза мутагена составляла 100 мкг/мл и время обработки культуры мутагеном 30 мин. Поскольку триптофан является предшественником синтеза ИУК, отбор мутантов, способных к сверхсинтезу ИУК, осуществляли по их росту в присутствии аналогов триптофана. В работе использовались следующие аналоги триптофана (NL–ацетил–DL–триптофан, 5–метил–триптофан). В ходе экспериментов были получены штаммы аналогрезистентных мутантов бактерий *P. fluorescens* продуцирующие ИУК в концентрации 65–75 мкг/мл, что в 10 раз больше, чем бактерии дикого типа.

Далее было проведено исследование ростостимулирующих свойств полученных штаммов. Эксперимент проводили на семенах растения огурца сорта «конкурент». Были проанализированы следующие параметры – масса растений, длина всего растения и, в отдельности, корней. Результаты показали (рис. 1, таблица 1), что полученные штаммы обладают ярко выраженными ростостимулирующими свойствами. Наибольшую длину имеют проростки при обработке семян бактериями *P. fluorescens*, подвергшихся химическому мутагенезу. Их значения в 2,4 раза превышают длину контрольных проростков, обработанных водой, и в 1,2 раза – контрольных проростков, обработанных суспензией бактерий *P. fluorescens* дикого типа. Наибольшие показатели длины корней также являются проростки, обработанные штаммом мутантных бактерий, что в 11,7 раз больше чем длина корней проростков, обработанных водой, и в 1,2 раза больше обработанных суспензией бактерий дикого типа. По биомассе, проростки, обработанные мутантными бактериями *P. fluorescens* превосходят в 2,05 раза проростков, обработанных водой и, в 1,04 – обработанных суспензией бактерий *P. fluorescens*.



Рис. 1. Изучение ростостимулирующей активности штамма *P. fluorescens* в отношении растений огурцов *in vitro*:

К1 – растения, обработанные дистиллированной водой, К2 – растения, обработанные суспензией бактерий *P. fluorescens* (дикий тип), О – растения, обработанные суспензией бактерий *P. fluorescens* (мутантные)

Таблица 1

**Изучение ростостимулирующей активности штамма *P. fluorescens* в отношении растений огурцов *in vitro***

Вариант	Длина проростка (см)	Длина корня(см)	Масса растения (г)
К1	4,25 ± 0,7	1,5 ± 0,75	0,15 ± 0,02
К2	8,7 ± 2,2	6,5 ± 0,75	0,296 ± 0,08
О	10,4 ± 0,9	7,8 ± 0,6	0,308 ± 0,06

Поскольку бактерии *P. fluorescens* обладают не только способностью к синтезу ИУК, но и имеют высокоактивную АЦК–деаминазу, было выдвинуто предположение, что данный штамм будет способен повышать устойчивость растений к абиотическому стрессу. В нашей работе мы исследовали способность полученного штамма повышать устойчивость растений огурца к абиотическому стрессу, вызванному загрязнением солями хрома в концентрации 42.5 мг / 50 мл почвы.

Семена огурцов помещали в стерильные чашки Петри (10 штук на чашку) на фильтры и заливали 10 мл стерильной дистиллированной воды. Чашки выдерживали в течение трех суток при комнатной температуре до момента проростания семян. Далее проростки высаживали во влажный грунт. После одной недели роста отобрали рассаду одинакового размера пересадили в отдельные стаканчики объемом 100 мл. После все растения были подвергнуты обработке солями хрома ( $K_2Cr_2O_7$ ) в концентрации 42.5 мг / 50 мл почвы. Одну часть растений мы обработали 10 мл бактериальной суспензии *P.*

*fluorescens*, несущей ген *acdS*, который кодирует АЦК–дезаминазу, другая часть – 10 мл бактериальной суспензии *P. fluorescens* дикого типа. В дальнейшем все растения поливали только дистиллированной водой, по мере необходимости. Результаты учитывали через 4 недели. Определяли массу растений, длину всего растения и, в отдельности, корней.

Как видно из полученных данных (рис. 2, таблица 2), наибольшую длину имеют проростки, полученные при обработке растений бактериями *P. fluorescens*, способными к сверхсинтезу ИУК. Их значения в 1,4 раза превышают длину контрольных растений, обработанных суспензией бактерий *P. fluorescens* дикого типа. Наибольшие показатели длины корней также являются растения, обработанные суспензией штамма–продуцента ИУК, что в 1,9 раз больше, чем длина контрольных растений, обработанных суспензией бактерий *P. fluorescens* дикого типа. Биомасса, растений, обработанных суспензией мутантных бактерий *P. fluorescens* превосходит в 1,7 раз биомассу растений, обработанных суспензией бактерий *P. fluorescens* дикого типа.



Рис. 2. Влияния аналогрезистентных мутантов бактерий *P. fluorescens* на повышенную устойчивость растений огурца к абиотическому стрессу:

К – растения, обработанные суспензией бактерий *P. fluorescens* (дикий тип), О – растения, обработанные суспензией бактерий *P. fluorescens* (мутантные)

Таблица 2

**Изучение влияния аналогрезистентных мутантов бактерий *P. fluorescens* на повышенную устойчивость растений огурца к абиотическому стрессу**

Вариант	Длина растения(см)	Длина корня(см)	Масса растения (г)
К	19.6 ± 2,6	2,7 ± 0,9	1,09 ± 0,3
О	26,8 ± 2	5,1 ± 0,8	1,9 ± 0,2

Таким образом, в ходе данного исследования получен штамм *P. fluorescens*, продуцирующий ИУК в 10 раз больше, чем бактерии дикого типа, обладающий ярко выраженными ростостимулирующими свойствами и повышающим устойчивость растений огурца к абиотическому стрессу, вызванному загрязнением почвы высокими концентрациями хрома.

**Библиографические ссылки**

1. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria / O. S. Olanrewaju [et al.] // World J Microbiol Biotechnol. – 2017. – Vol. 33. – P. 197.
2. The Role of Rhizobial ACC Deaminase in the Nodulation Process of Leguminous Plants / F. X. Nascimento [et al.] // International Journal of Agronomy. – 2016. – Vol. 2016. – 9 p.
3. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria / C. Forni [et al.] // Plant Soil. – 2017. – Vol. 410. – P. 335–356.

# БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ МИКРОМИЦЕТОВ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

**Карманова В.В.**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*veronikarmanova@gmail.com;*

*науч. рук. – Т. Г. Шабашова, канд. биол. наук, доц;*

*В. Д. Поликсенова, канд. с.-х. наук, доц.*

Актуальность изучения Антарктиды на предмет наличия психрофильных и психротолерантных микромицетов с каждым годом возрастает. Это, вероятно, связано с появлением данных о способности грибов развиваться в условиях космоса и в районах с повышенным уровнем химического загрязнения, что свидетельствует о широких адаптивных возможностях данных организмов. Изучение биологического разнообразия и стратегий выживания микромицетов данной среды обитания позволит получить больше информации об их роли в формировании экосистем Антарктиды, а также обнаружить потенциальные источники важных для биотехнологии веществ [1, с. 480]. В данной работе были проанализированы образцы эндолитов и почв с растительными и животными остатками с двух российских антарктических станций «Прогресс» и «Новолазаревская» и белорусской станции «Гора Вечерняя». В результате исследования выявлены 18 образцов микромицетов. Преобладающим является отдел Ascomycota, среди которого доминируют микромицеты, представленные только анаморфными стадиями.

**Ключевые слова:** почвенные микромицеты; экстремофильные микроорганизмы; психрофильные микромицеты; микобиота Антарктиды; эндолиты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сбор материала (эндолиты, почвы с растительными и животными остатками) осуществлялся ведущим научным сотрудником НПЦ по биоресурсам НАН Беларуси Ю.Г. Гигиняком в районе российских антарктических станций «Прогресс» и «Новолазаревская» и белорусской станции «Гора Вечерняя» (рис. 1). Образцы эндолитов отбирали с помощью молотка и зубила путем откалывания верхних слоев коренных пород. Сбор органо–минерального горизонта осуществлялся в отдельные пакеты.

Как и в других средах, среди биоты, присутствующей в Антарктике, микробная жизнь в основном представлена археями, бактериями и грибами. Тем не менее, грибы являются самой разнообразной группой в различных антарктических экосистемах, включая почвы. Выживание грибов в экстремальных условиях является следствием как экологического отбора, так и эволюционной адаптации, выраженной на физиологическом, метаболическом, структурном и генетическом уровнях. Станции, на которых осуществлялся отбор образцов, находятся в Восточной

Антарктиде. Среди факторов, ограничивающих биологическое разнообразие микромицетов в данном регионе, можно выделить экстремально низкие температуры, сильные кatabатические ветра, высокое ультрафиолетовое облучение, высушивание, сильные снегопады, нехватка источников питания [1, с. 480]. Биотические факторы, такие как флора и орнитофауна, также оказывают прямое воздействие на разнообразие антарктических микромицетов. Растительность представлена мхами и лишайниками, для которых характерна фрагментарность, высшие растения отсутствуют. Среди птиц распространены пингвины Адели, императорские пингвины, буревестники, поморники.

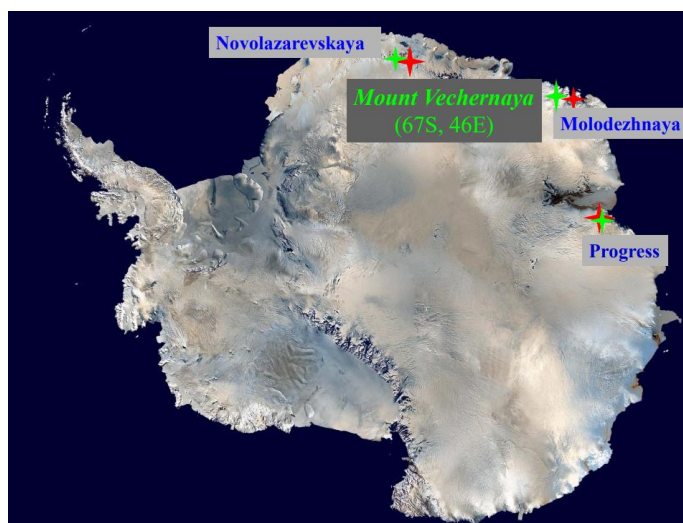


Рис. 1. Географическое положение станций

В данной работе были использованы классические микроскопические методы исследования. Посев на питательную среду осуществлялся с проведением предварительных разведений, где степень разведения определялась предполагаемым количеством микроорганизмов в образце (число разведений тем больше, чем больше предполагаемое число микроорганизмов), с последующим высевом на среду с помощью пипетки и шпателя, а также осуществлялся прямой посев образцов субстрата без приготовления разведений. В качестве питательной среды использовались агар Чапека и картофельный агар. Культивирование осуществлялось при 22 °С [2, с. 61–63]. По прошествии трех недель проводилась идентификация образцов по морфологическим и анатомическим признакам с помощью определителей для различных групп грибов [3, 4, 5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате микробиологического исследования образцов эндолитов и почв с растительными и животными остатками трех антарктических



станций выявлено 18 образцов микромицетов. Обнаруженные грибы относятся к 10 видам и 7 родам. Доминирующим по количеству представителей в исследуемых образцах является отдел Ascomycota (большинство видов представлено анаморфными стадиями).

Количество видов в образцах варьировало от 1 до 3. В исследованных образцах доминировал род *Aspergillus*, часто встречаемым был род *Penicillium*. В образцах почв с растительными остатками преобладали грибы рода *Chaetomium*, это свидетельствует о том, что даже в условиях экстремально низких температур, гиперсолености, высушивания, высокого уровня ультрафиолетового облучения представители данного рода не утрачивают своих целлюлозолитических свойств. Необходимо отметить, что растительный покров в целом способствует увеличению биологического разнообразия микромицетов, поскольку растения сами представляют собой субстрат для произрастания грибов, а также являются барьером при колебании суточных температур [6, с. 24]. В образцах эндолитов обнаружен только *Verticillium album* Licor. Такое бедное разнообразие объясняется тем, что эндолиты и мелкоземы с каменистыми примесями являются поверхностным горизонтом почвы, подвергающимся непосредственному воздействию климатических факторов. Все обнаруженные микромицеты представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Биологическое разнообразие микромицетов Восточной Антарктиды**

Вид	Субстраты			Место сбора (антарктические станции)
	Горные породы	Почвы с остатками мхов и лишайников	Почвы с остатками перьев и гуано	
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	+	+	+	Новолазаревская, Гора Вечерняя
<i>Aspergillus duricaulis</i> Raper & Fennell		+	+	Прогресс
<i>Aspergillus</i> sp.		+	+	Гора Вечерняя
<i>Chaetomium megalocarpum</i> Bainier		+		Гора Вечерняя
<i>Collariellabostrychodes</i> (Zopf) X. Wei Wang & Samson		+		Гора Вечерняя
<i>Monilia brunnea</i> J.C. Gilman & E.V. Abbott		+		Гора Вечерняя
<i>Penicillium</i>	+	+	+	Прогресс

<i>chrysogenum</i> Thom				
<i>Phoma leveillei</i> Boerema & G.J. Bollen		+		Прогресс
<i>Rhizopus microsporus</i> Tiegh.		+	+	Новолазаревская
<i>Verticillium album</i> Licop.	+			Гора Вечерняя

Таким образом, наше исследование показало, что наибольшее видовое разнообразие микромицетов характерно для почв, а наименьшее – для каменистых субстратов. Роды *Aspergillus fumigatus* Fresen. и *Penicillium chrysogenum* Thom встречаются на всех типах субстрата. Можно предположить, что преобладание такого малого количества видов свидетельствует о филогенетической примитивности антарктических сообществ [6, с. 25].

#### Библиографические ссылки

1. Власов Д. Ю. Микроскопические грибы в экстремальных местообитаниях: Биологическое разнообразие и сущность взаимодействий // Биосфера. 2011. Т3. №4. С 479–492.
2. Егорова Н. С. Практикум по микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 1976.
3. Балай В.И., Коваль Э.З. Аспергиллы. Киев: Наукова думка, 1988.
4. Литвинов М.А. Определитель микроскопических почвенных грибов. Л.: Изд-во «Наука», Ленингр. отд., 1967.
5. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.–H. Compendium of soil fungi. Eching, 2007.
6. Власов Д. Ю., Курцидели И. Ю., Зеленская М. С., Абакумов Е. В. Грибы на природных и антропогенных субстратах в Западной Антарктике / Д.Ю. Власов [и др.] // Микология и фитопатология. 2012. Т46. С. 20–26.

# ВИДОВОЙ СОСТАВ И ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ФИТОПЕРИФИТОНА В КАРЬЕРНЫХ ВОДОЕМАХ ГРОДНЕНСКОГО МЕЛОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Ю. Карпаева

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*karpaevanastya1@gmail.com*

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

Представлены результаты первых исследований фитоперифитона карьерных водоёмов, выработанных месторождений мела в г. Гродно (Беларусь). Выявлено 77 видов водорослей. Установлено значительное соответствие видового состава водорослей двух карьерных водоёмов. Подавляющее число видов являются космополитами с широкой экологической валентностью.

**Ключевые слова:** перифитон; карьерные водоёмы; видовое богатство; таксономическая структура.

Перифитон является важным компонентом пресноводных экосистем. От него зависит продуктивность и состояние экосистем, кроме того он позволяет судить о качестве исследуемых вод [1]. Использование перифитона как показателя качества поверхностных вод имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими методами биоиндикации вод. Во-первых, благодаря его высокой информативной ёмкости, а во-вторых, перифитон допускает широкие возможности экспериментальных исследований не только в лаборатории, но и в естественных условиях.

Между тем сообщества обрастаний изучены гораздо меньше, чем планктон и бентос, особенно мало изучен перифитон в карьерных водоемах, которые образуются в результате затопления выемок мела, песка и других нерудных ископаемых, хотя изучение экосистем подобных водоёмов дает уникальную возможность проследить закономерности первичной экологической сукцессии. Первые исследования бактерио-, фитопланктона и фитоперифитона проводились в Беларуси в июле 2012 г. на шести меловых карьерах разного «возраста» [2;3].

Наши исследования направлены на изучение видового состава и структуры сообществ фитоперифитона двух карьерных водоемов Гродненского мелового месторождения – Центральный и Южный.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Карьерные водоемы выработанных месторождений мела Центральный и Южный находятся в черте города Гродно на расстоянии примерно 200 м друг от друга. Карьер Южный затоплен в 1976 г. (возраст водоема 44 года), а Центральный в 1989 г. (возраст 31 год). Водоемы имеют сходную мор-

фометрию. Для них характерны крутые береговые склоны и резкое нарастание глубин. Максимальные глубины достигают 35 м. Площадь обоих водоемов около 20 га. Основным субстратом для перифитона в карьерах Южный и Центральный служат погруженные и полупогруженные макрофиты, которые занимают узкую мелководную прибрежную полосу.

Материалом для настоящей работы послужили пробы фитоперифитона, собранные в период с 29.07. 2019 г. по 03.08. 2019 г. с доминирующих в карьерных водоемах макрофитов: Рдест плавающий (*Potamogeton natans* L.), Рдест стеблеобъемлющий (*P. perfoliatus* L.), Рдест блестящий (*P. lucens* L.), Элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.), Тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin.), Рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.).

Перифитон отделяли от субстрата с помощью скальпеля, фиксировали материал раствором Утермеля, концентрировали общепринятым методом осаждения. Видовой состав водорослей изучали на временных и постоянных препаратах. Постоянные препараты готовили по общепринятой методике Жузе [4] для установления видовой принадлежности диатомовых водорослей. Исследования проводили с помощью светового микроскопа фирмы Carl Zeiss (модель Axiostar plus) при увеличении x100, x400 и x1000.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований выявлено 77 видов водорослей. Обнаруженные виды относятся к шести отделам. Отделы представлены неравнозначно (таблица 1). Наибольшее видовое богатство характерно для отдела Bacillariophyta (55% общего числа видов). Диатомовые водоросли представлены 42 видами, которые относятся к 20 родам из 12 семейств, объединенных в 4 порядка. По числу представленных видов выделяются роды *Cymbella* (9), *Navicula* (6), *Synedra* (5). Остальные роды представлены одним–двумя видами. Также значительную часть видового богатства составляют представители отдела Chlorophyta. На долю этого отдела приходится 30 % общего числа видов.

Таблица 1

Таксономическая структура фитоперифитона меловых карьеров

Отдел	Класс	Порядок	Семейство	Род	Вид
Суанophyta	2	3	4	4	4
Cryptophyta	1	1	1	1	1
Dinophyta	1	1	1	3	3
Chrysophyta	1	1	2	3	4
Bacillariophyta	2	4	12	20	42
Chlorophyta	5	7	10	11	23
Всего	12	17	30	42	77

Как видно из таблицы 2, для альгофлоры перифитона характерны невысокие величины индексов разнообразия: отношение количества видов к количеству родов составляет 1,8, отношение количества видов к количеству семейств составляет 2,56.

Таблица 2

**Таксономическое разнообразие фитоперифитона меловых карьеров**

Число видов (В)	77
Число родов (Р)	42
Число семейств (С)	30
Отношение В/Р	1,83
Отношение В/С	2,56
Отношение Р/С	1,4
Число родов, представленных одним видом	30
Число родов, представленных пятью и более видами	5

Таксономическая структура альгофлоры перифитона в карьерах Центральный и Южный сходна. Наибольшее видовое богатство характерно для отдела *Vacillariophyta*, на долю которого приходится 55 % общего числа видов в карьере Южный и 53 % в карьере Центральный. На втором месте по значимости в обоих карьерах зеленые водоросли – 30 % и 24 % в Южном и Центральном соответственно. Отличительной чертой является большая значимость золотистых водорослей в карьере Центральный – 9 % общего числа видов против 3 % в Южном. Общими для двух карьеров служат 30 видов. Практически во всех пробах отмечены следующие виды: *Anabaenasp.*; *Oscillatoriasp.*; *Rhodomonaspusilla*; *Peridiniumsp.*; *Ceratiumhirudinella*; *Synedraulna*; *Navicularadiosa*; *Cymatopluerasolea*; *Cymbellaaffinis* и др.

Подавляющее число выявленных в фитоперифитоне видов являются космополитами с широкой экологической валентностью. По биотопической приуроченности в перифитоне преобладают типично планктонные формы и эвритопы. На их долю приходится свыше 65 % общего числа видов. Небольшой процент составляют эпифиты 2–3%.

**Библиографические ссылки**

1. Макаревич Т.А., Савич И.В. Фитопланктон и фитоперифитон в разновозрастных карьерных водоемах оработанных меловых месторождений (Беларусь) // Actualproblemsinmodernphycology: V Internationalconference. Moldova . – Chişinău: CEP USM, 2014. – P. 199–204.
2. Makarevich T. A. The structure of plankton and periphyton communities in quarry reservoirs of different “ages” (Belarus) / T. A. Makarevich, I. V. Savich, L. V. Nikitina / Dynamics and functioning of aquatic ecosystems under the impact of climate change and anthropogenic stress. Abstracts of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference to commemorate famous hydrobiologist G.G. Winberg (12–17 October 2015, St. Petersburg, Russia).– St. Petersburg: Publishing company «LEMA», 2015. P. 156–157.

3. *Савич И.В.* К изучению перифитона карьерных водоемов выработанных меловых месторождений / И. В. Савич, Т. А. Макаревич, А. С. Хижняк // Актуальные проблемы биоэкологии: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 40-летию образования кафедры общей экологии и методики преподавания биологии, Минск, 23–25 октября 2014 г. / БГУ. – Минск, 2014. – С. 111 – 112.
4. *Жузе А.П.* Методика исследования / А.П. Жузе, А.И. Прошкина–Лавренко, В.С. Шешукова–Порецкая // Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). – Л.: Наука, 1974. – Т.1 – С. 50–79.

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕЛЕЦИОННОГО МУТАНТА ПО ГЕНУ ГЛОБАЛЬНОГО ТРАНСКРИПЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА *SlyA* У БАКТЕРИЙ *ERWINIA AMYLOVORA*

Койда Е.С.

Белорусский государственный университет, г. Минск

*elenakoida99@gmail.com*

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

В ходе работы был сконструирован делеционный мутант *Erwinia amylovora* по гену транскрипционного фактора *SlyA* и осуществлена его фенотипическая характеристика. Были получены данные, указывающие на то, что транскрипционный регулятор *SlyA* вовлечен в регуляцию подвижности клеток *E. amylovora*, продукции амиловорана, процесса формирования биопленок и устойчивости к окислительному стрессу.

**Ключевые слова:** *Erwinia amylovora*; транскрипционный регулятор *SlyA*; регулон *SlyA*; делеционный мутант; инактивация гена по Даценко; факторы вирулентности.

Бактерии *Erwinia amylovora* являются возбудителями бактериального ожога – опаснейшей болезни плодовых деревьев. Фитопатоген относится к карантинным объектам для стран, входящих в Европейскую Организацию Защиты Растений. В 2007 году впервые были зафиксированы вспышки бактериального ожога в яблоневых садах Республики Беларусь [1]. Основными изученными факторами вирулентности бактерий *E. amylovora* являются эффекторы системы секреции третьего типа. Бактерии интенсивно образуют биопленки внутри сосудов ксилемы растения-хозяина, что непосредственно связано с продукцией экзополисахаридов амиловорана и левана, формированием фимбрий и пилей, но механизмы регуляции этого процесса слабо изучены. Несомненно, механизм взаимодействия растительной клетки с фитопатогеном намного сложен и требует участия большего количества факторов вирулентности.

Транскрипционный фактор *SlyA*, будучи членом *MarR* семейства, контролирует широкий спектр клеточных процессов в клетках бактериальных патогенов человека и животных. Однако, на данный момент, очень мало известно о роли этого транскрипционного фактора в биологии фитопатогенных микроорганизмов.

Ранее, с использованием биоинформатического подхода, нами был предсказан регулон *SlyA* в геноме *E. amylovora* E2. Так, потенциальные сайты связывания белка были найдены в регуляторных областях генов, вовлеченных в образование биопленки, задействованных в противостоянии окислительному стрессу; перед детерминантами систем трансдукции сигналов из внешней среды, перед генами, вовлеченные в регуляцию подвижности и в ряде других участков генома [3].

Для изучения роли SlyA в регуляции важных для патогенности клеточных процессов был сконструирован делеционный мутант *E. amylovora* по соответствующему гену. Клетки бактерий *E. amylovora* E2 подвергали мутагенезу по методу «PCR-based one-step inactivation of chromosomal genes» [4]. В результате проделанной работы был отобран штамм (далее  $\Delta$ slyA), устойчивый к канамицину. Для подтверждения наличия делеции ДНК из клеток  $\Delta$ slyA амплифицировали с праймерами к областям, фланкирующим делецию, а также с внутренними праймерами к гену устойчивости к канамицину. В результате ПЦР были получены фрагменты ДНК ожидаемых размеров.

На следующем этапе работы была изучена подвижность клеток бактерий  $\Delta$ slyA и E2 на питательных средах различного состава (рис. 1). Как видно из рисунка, при выращивании *E. amylovora* как на минимальной среде M9, так и на полноценной среде LB, значимых различий в подвижности клеток мутанта и исходного штамма не наблюдалось. Однако в условиях сверхэкспрессии гена *slyA* подвижность клеток снижалась почти в 2 раза по сравнению с контролем (рис. 1б). Полученные результаты косвенно указывают на возможность негативной регуляции подвижности клеток *E. amylovora* SlyA.

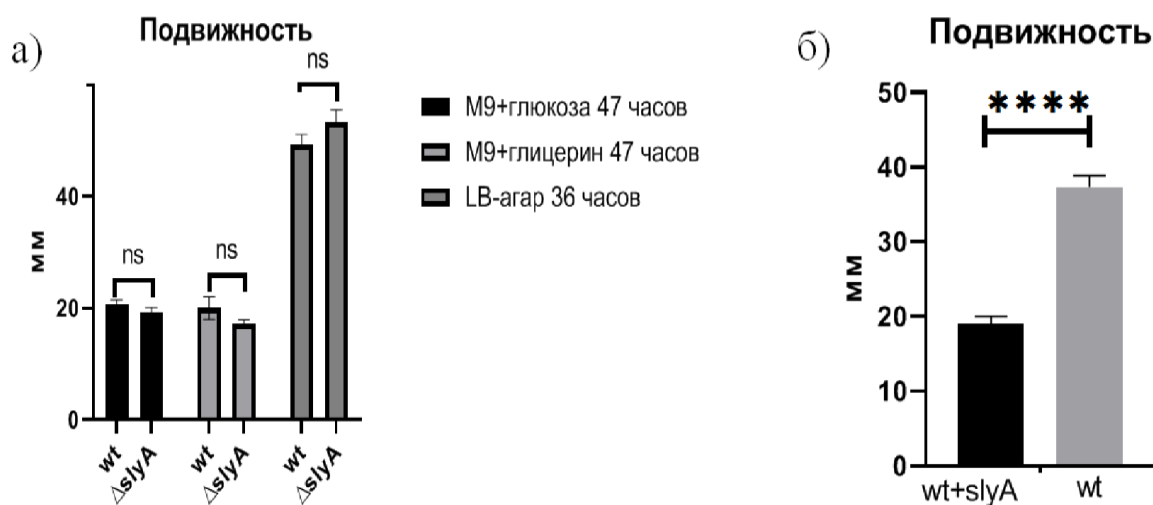


Рис.1. **а)** Подвижность клеток *E. amylovora* E2 (wt) и мутанта ( $\Delta$ slyA) на разных средах  
**б)** Подвижность клеток бактерий *E. amylovora* E2 несущих pFLAG-CTC (wt) и бактерий E2 с плазмидой pFLAG-CTC::slyA (wt+slyA) в условиях индукции на среде LB

Тест на продукцию экзополисахарида амиловорана (важнейшего фактора вирулентности и компонента биопленок) выявил два интересных момента (рис.2а). Во-первых, продукция амиловорана действительно снижена в отсутствие SlyA. Во-вторых, присутствие белка в количествах, превышающих физиологические в несколько раз, увеличивает продукцию амиловорана.



Учитывая тот факт, что инактивация *slyA* приводит к снижению продукции амиловорана, было интересно изучить эффект такой мутации на способность образовывать биопленки. Для исследования этого явления была выбрана среда M9 с сорбитолом (рис. 2б).

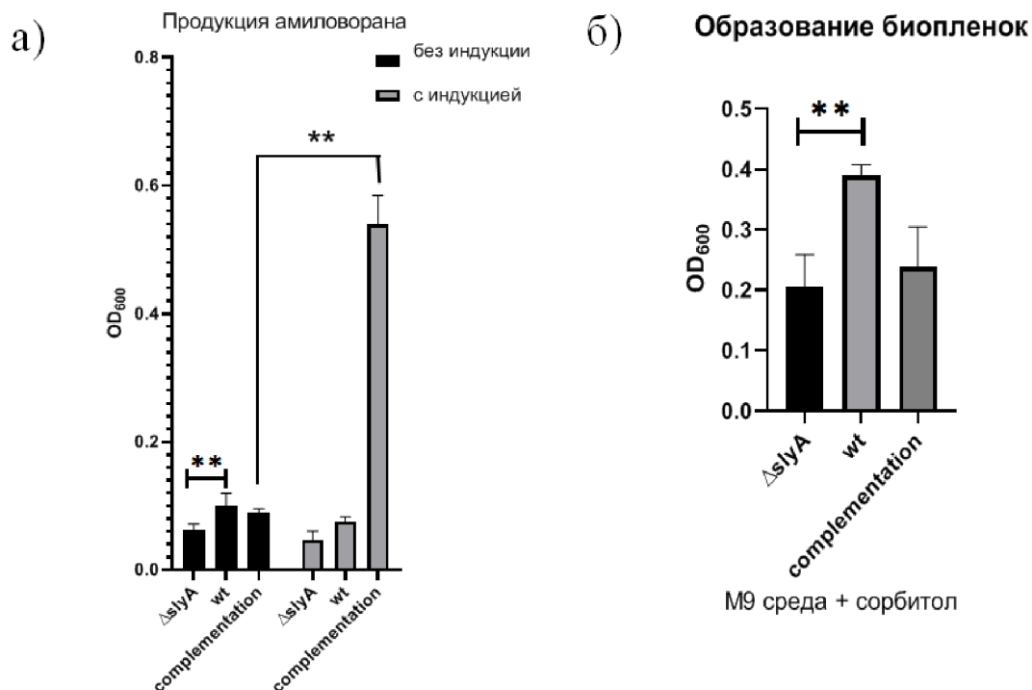


Рис.2. а) Продукция амиловорана клетками *E. amylovora* E2 (wt), мутанта ( $\Delta slyA$ ), E2 с плазмидой pFLAG-CTC::*slyA* (complementation). б) Образование биопленок клетками штамма дикого типа (wt), мутанта ( $\Delta slyA$ ), дикого типа с экспрессионной плазмидой pFLAG-CTC::*slyA* (complementation)

Исходя из данных, представленных на рисунке, образование биопленок у делеционного мутанта достоверно снижено по сравнению с диким типом.

Устойчивость бактерий к окислительному стрессу была изучена с использованием двух методов. В соответствии с первым, выживаемость в присутствии перекиси водорода оценивалась по оптической плотности культур, со вторым – подсчетом выживших клеток после посева на агаризованную среду. Согласно результатам эксперимента с подсчетом колоний, выживаемость дикого типа – 0,957%, мутанта – 0,662%, что соотносится с результатами на графике рис.3а.

Сходным образом оценивалась и выживаемость бактерий в условиях кислотного стресса. Однако достоверных различий в устойчивости клеток исходного штамма и мутанта к кислотному стрессу (рН 4.7) выявить не удалось (рис. 3б).

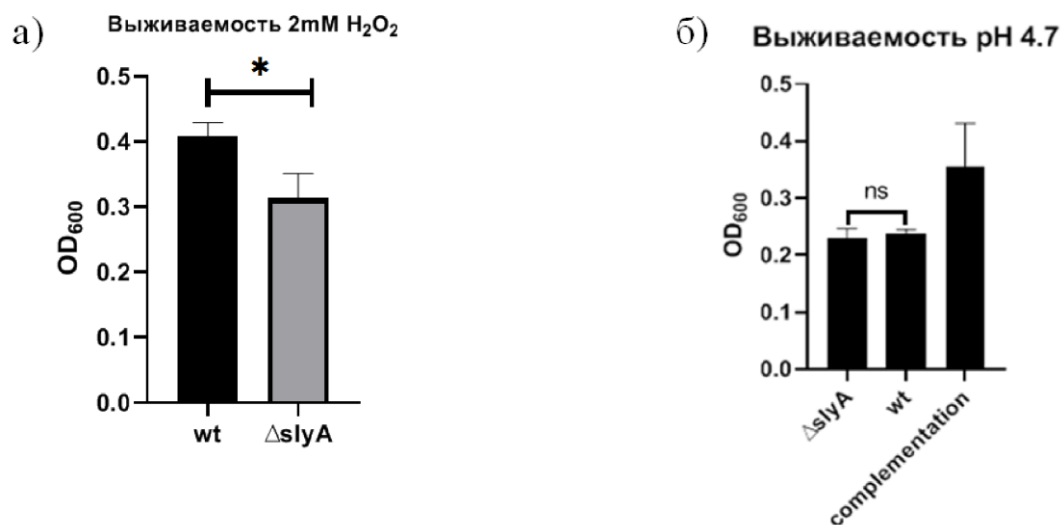


Рис.3. Выживаемость клеток бактерий *E. amylovora* E2 (wt) и мутанта ( $\Delta$ slyA) в условиях стресса а) окислительного б) кислотного

Таким образом, в ходе исследования нами были получены данные, указывающие на то, что транскрипционный регулятор SlyA вовлечен в регуляцию подвижности клеток *E. amylovora*, продукции амиловорана, процесса формирования биопленок и устойчивости к окислительному стрессу.

#### Библиографические ссылки

1. Lagonenko A. First Report of *Erwinia amylovora* Fire Blight in Belarus. // *Journal of Phytopathology*. 2008. Vol. 156, № 10. P. 638–640.
2. Vrancken K. Pathogenicity and infection strategies of the fire blight pathogen *Erwinia amylovora* in Rosaceae: State of the art // *Microbiology*. 2013. Vol. 159, № 5. P. 823–832.
3. Койда Е.С., Лагоненко А.Л., Характеристика транскрипционного фактора SlyA у бактерий *Erwinia amylovora* // *Материалы 76-й научной конференции студентов, и аспирантов Белорусского государственного университета*. 2019. Т.1. С. 306–309.
4. Datsenko K. A., Wanner B. L. One-step inactivation of chromosomal genes in *Escherichia coli* K-12 using PCR products. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000. Vol. 97, № 12. P. 6640–6645.

# У ИЗМЕНЕННЫХ ФОРМ МИКОБАКТЕРИЙ ТУБЕРКУЛЕЗА ТРАНСФОРМИРУЕТСЯ КЛЕТОЧНАЯ СТЕНКА ПОДВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТИБИОТИКОВ

**М.В. Кучвальский**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*kuchvalskimv@gmail.com;*

*науч. рук. – А. П. Лысенко, д-р вет. наук, проф.*

Микобактерии туберкулеза при стрессовых воздействиях образуют формы с дефектной клеточной стенкой. Эти формы непатогенны, но более адаптированы к неблагоприятным условиям, например, к действию противомикробных агентов. Впервые установлен профиль антибиотикорезистентности в различных изолятах микобактерий с дефектной клеточной стенкой. Показано, что антибиотики влияют на морфологию этих изолятов.

**Ключевые слова:** измененные формы микобактерий; латентный туберкулез; дефектная клеточная стенка; антибиотикорезистентность; дезинфекция; плеоморфность.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Согласно отчету ВОЗ за 2018 год, Беларусь занимает первое место в мире по проценту новых больных туберкулезом с множественной–лекарственной устойчивостью среди всех новых пациентов[1]. В 100% случаев изоляты микобактерий, полученные от заболевших, устойчивы к рифампицину – антибиотику первой линии.

Считается, что такая адаптивность микобактерий туберкулеза (МБТ), в значительной степени, связана с их свойством трансформироваться. Они не погибают при фагоцитозе, при действии лизоцима трансформируются в формы с так называемой дефектной клеточной стенкой (CWD – cellwalldeficient)[2].

CWD–формы характеризуются устойчивостью к ряду противомикробных агентов, а также персистенцией внутри организмов. Популяционная морфологическая изменчивость и изменение клеточной стенки может рассматриваться как естественное явление, обеспечивающее адаптивную стратегию этого патогена в меняющейся окружающей среде [3].

Значительный интерес представляет структура популяций различных микобактериальных штаммов и такие ее важные характеристики, как вирулентность, морфология и лекарственная устойчивость, особенно в случае изменчивости заболевания и развитии лекарственно–устойчивого туберкулеза.

Цель работы –установить профиль антибиотикорезистентности CWD–штаммов микобактерий туберкулеза.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали CWD–изоляты *Mycobacterium bovis*, полученные из культур клеток больного острой Т–клеточной лейкемией («Jurkat») и лекарственно–устойчивым туберкулезом («Сеп»), из положительной контрольной сыворотки коровы, больной лейкозным вирусом («ПКС BLV») или после обработки соответствующими растворами дезинфектантов или антисептиков («Параформ», «Глутаровый альдегид», «CWDэтанол–хлоргексидин»). Контролем служил CWD–изолят *M. tuberculosis*H37Rv.

Изоляты высевали на чашки со средой МПА, сразу после посева выкладывали на поверхность среды диски индикаторные ДИ–ПЛС–50–01 (ООО «НИЦФ», Россия), пропитанные антибиотиками (см. таблицу). Через сутки измеряли диаметры зон задержки роста, а с краев этих зон отбирали бакмассу для мазков. За устойчивость к антибиотику принимали диаметр зоны задержки не более 20 мм.

Мазки окрашивали по Киньону. Кислотоустойчивые МБТ окрасились в красный цвет, а некислотоустойчивые CWD–формы – в синий цвет.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшие зоны задержки роста (25–40 мм) обнаружили вокруг дисков со фторхинолонами (левофлоксацин, ципрофлоксацин) (см. таблицу). Все изоляты устойчивы к аминогликозидам (выраженно к неомицину и стрептомицину, умеренно к канамицину), цефалоспорином (кроме «Параформ») и бензилпенициллину. Профиль устойчивости к антибиотикам почти не изменяется от изолята к изоляту.

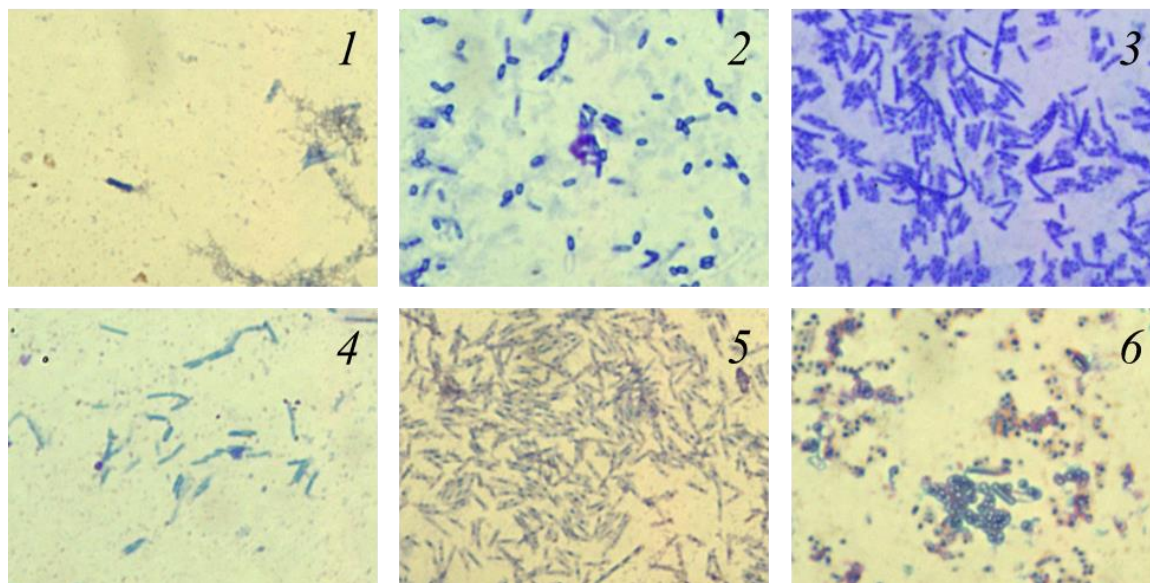
У всех изолятов микобактерий наблюдали плеоморфную изменчивость популяции (см. рисунок). У полностью устойчивых к антибиотикам изолятов обнаружили коккоиды (номера 2, 4 и 6 в рисунке). Более того, если исходные изоляты были представлены только CWD–формами, то применение антибиотиков привело к сосуществованию как классических форм (кислотоустойчивые), так и форм с дефектной клеточной стенкой (некислотоустойчивые).

Диаметры зон задержки роста CWD–изолятов

Антибиотики и их дозировка	Изоляты						
	Па- ра- форм	Глутаровый альдегид	CWD ЭТХГ	Jurkat 402	ПКС BLV	Сеп- НО	H37Rv
Амоксициллин / клавулановая кис- лота 20/10 мкг	31	22	20	18	14	0	25
Бензилпенициллин 10 ед	31	0	14	8	0	0	0
Неомицин 30 мкг	15	15	16	16	15	20	24
Стрептомицин 30 мкг	10	17	14	11	12	18	22
Канамицин 30 мкг	18	21	20	22	17	22	21
Азитромицин 15 мкг	26	19	23	22	24	27	22
Левифлоксацин 5 мкг	26	26	31	28	31	28	37
Ципрофлоксацин 5 мкг	23	36	37	40	32	33	35
Цефалотин 30 мкг	34	0	19	0	16	0	12
Цефаклор 30 мкг	22	12	20	20	0	13	0
Тетрациклин 30 мкг	24	21	19	21	22	23	23

Реверсия CWD–форм в типичные кислотоустойчивые бактерии является важным свойством, которое индуцируется изменением условий культивирования *in vitro* или происходит самопроизвольно *in vivo* при благоприятных для патогенов условиях. Появление коккоидных форм, возможно, является одной из стадий развития CWD–форм. Считается, что за невидимой фазой CWD–конверсии (происходящей на среде MucCeIDW) следует состояние активного размножения некислотоустойчи-

вых CWD–форм, зачастую с кокковидной морфологией. различную восприимчивость к противомикробным препаратам.



*Рис.* Рост изолятов на краю зоны задержки цефалотином: 1 – Параформ, 2 – Глутаровый альдегид, 3 – CWD ЭТХГ, 4 – Jurkat 402, 5 – ПКС BLV, 6 – СепНО

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Процессы трансформации CWD–форм, наблюдаемые в изолятах после обработки дезинфектантами, вызваны действием антибиотиков. Проявление плеоморфности является адаптивной стратегией CWD–форм микобактерий, которая позволяет им выживать в неблагоприятных условиях.

### **Библиографические ссылки**

1. Global Tuberculosis Report 2019 // WHO [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/329368/9789241565714-eng.pdf>. – Date of access: 07.02.2020.
2. Willett H.P., Thacore H. The induction by lysozyme of an L–type growth in *Mycobacterium tuberculosis* // Canadian Journal of Microbiology. 1966. Vol. 12, № 1. P. 11–16.
3. Morphological variability and cell–wall deficiency in *Mycobacterium tuberculosis* «heteroresistant» strains / L. Michailova [et al.] // The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease. 2005. Vol. 9, № 8. P. 907–914.
4. Evolution of extensively drug–resistant *Mycobacterium tuberculosis* from a susceptible ancestor in a single patient / V. Eldholm [et al.] // Genome Biology. 2014. Vol. 15, № 11. P. 490.

# АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ Ni<sup>2+</sup> НА РОСТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ГЕНЕРАЦИЮ АФК У РАЗЛИЧНЫХ ЛИНИЙ *ARABIDOPSIS THALIANA* L. HEYNH.

К.С. Лицкевич

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*v.mackievic@gmail.com;*

*науч. рук. – В. С. Мацкевич*

Клеточные механизмы ответа растений на никелевый стресс, а также роль связывания никеля с органическими лигандами в настоящее время мало изучены. В частности, не понятно, каким образом происходит индукция сигнальных процессов и генерация активных форм кислорода (АФК) при воздействии Ni<sup>2+</sup>. Известно, что при избытке наружной концентрации никеля увеличивается содержание гистидина в тканях растений, что может иметь значение для распознавания Ni<sup>2+</sup> растительной клеткой. Поэтому, целью данной работы являлось установить роль взаимодействия Ni<sup>2+</sup> с гистидином в индукции сигнальных и адаптивных реакций в корне арабидопсиса под действием никелевого стресса. Также в данной работе была проанализирована реакция на никелевый стресс линии rhd2, лишенной НАДФН-оксидазы типа С – фермента, являющегося основным источником экзогенного АФК в растениях.

**Ключевые слова:** никель; гистидин; активные формы кислорода; флуоресцентная микроскопия; дигидроэтидиум; корень; арабидопсис; НАДФН-оксидаза.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды никелем является одной из важнейших экологических проблем индустриально развитых регионов. Избыточные уровни данного металла (свыше 100 мг/г) вызывают угнетение роста растений, хлороз и некроз листьев, повреждение мембран, деградацию клеточных органелл, нарушение функционирования фотосинтетического, изменение активности ферментов и т.д. [1]. Действие никеля также сопровождается стимуляцией синтеза активных форм кислорода (АФК) и индукцией окислительного стресса, однако механизм данной реакции до конца не понятен. Известно, что в свободная ионная форма никеля (Ni<sup>2+</sup>) не является редокс-активной в биологических условиях [2]. В связи с этим нами была выдвинута гипотеза, согласно которой для активации АФК-генерирующих свойств никель образует комплексы с природными хелаторами, в первую очередь с гистидином. Гистидин обладает высоким сродством к Ni<sup>2+</sup>, также ряд исследований показал, что данная аминокислота активно синтезируется в растениях, выращиваемых на среде с повышенным уровнем никеля [3]. Целью настоящей работы являлось установить роль взаимодействия ни-

келя с гистидином в индукции сигнальных и адаптивных реакций в корне арабидопсиса под действием никелевого стресса.

Основным источником продукции экзогенного АФК в растениях является фермент НАДФН-оксидаза. Он локализуется на плазматической мембране и переносит электроны от НАДФН/НАДН цитоплазмы к кислороду апопласта, что приводит к образованию АФК [4]. В ряде работ было показано, что опосредованная НАДФН-оксидазой продукция АФК играет важную роль в регуляции адаптивных реакций растений при воздействии таких стресс-факторов, как засоление, экстремальные температуры, засуха и др. [5, 6]. Поэтому актуальным представлялось также проанализировать реакцию растений-нокаутов по данной системе в ответ на обработку никелем и никель-гистидиновыми комплексами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе была протестирована реакция корней модельных растений *Arabidopsis thaliana* (L.) Heunh. природного экотипа Col-0 и линии *rhd2*, лишенной НАДФН-оксидазы типа С. Растения выращивались в стерильной вертикальной культуре в чашках Петри на полной среде Мурасиге и Скуга, рН 6,0, 1% сахароза, 0,35% Phytigel 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 Ni<sup>2+</sup> и Ni-гистидиновых комплексов). Уровень АФК в клетках корня 7-дневных растений арабидопсиса регистрировался с использованием флуоресцентного зонда дигидроэтидиум (ДГЭ). Растения помещались в стресс-расторы (3 ммоль/л Ni<sup>2+</sup>; 6 ммоль/л гистидин; 3 ммоль/л Ni<sup>2+</sup> + 6 ммоль/л гистидин), содержащие 10<sup>-5</sup> моль/л ДГЭ, на протяжении 30 мин, в качестве контроля выступал буферный раствор следующего состава (ммоль/л): 0,1 KCl, 0,1 CaCl<sub>2</sub>, 1 Tris/ 2 MES рН 6,0. Флуоресценция ДГЭ регистрировалась при помощи флуоресцентного микроскопа Nikon TS100 ( $\lambda_{ex} = 490$  нм,  $\lambda_{em} = 540$  нм). Изображения анализировались в приложении ImageJ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании влияния никеля и никель-гистидина на рост основного корня *A. thaliana* с использованием техники замены среды было показано, что введение никеля в низких концентрациях (0,01–1 ммоль/л Ni<sup>2+</sup>) не оказывало эффекта на скорость роста корня дикого типа Col-0. Никель начинал ингибировать удлинение корня, начиная с 3 ммоль/л,



вызывая снижение скорости роста на 80–85%. Обработка 10 ммоль/л  $\text{Ni}^{2+}$  вызывала 90% ингибирование. Гистидин уменьшал токсичность высоких уровней  $\text{Ni}^{2+}$  (3 и 10 ммоль/л). Это говорит о том, что образование никель–гистидиновых комплексов позволяет растениям уменьшить вредное воздействие избыточных концентраций никеля. Растения *rhd2*, лишённые НАДФН–оксидазы С, были менее чувствительны к никелю: ингибирование удлинения корня начиналось только с 10 ммоль/л  $\text{Ni}^{2+}$ . Следовательно, генерация АФК с вовлечением комплекса НАДФН–оксидазы С, является важным компонентом при развитии окислительного стресса на фоне повышенных уровней никеля. Следует отметить, что добавление гистидина не оказывало влияние на изменение скорости роста корня при выращивании растений на среде с никелем. Вероятно, протекторная роль данной аминокислоты заключается не только в физическом устранении  $\text{Ni}^{2+}$  путем хелатирования, но и в индукции АФК–зависимой сигнализации, запускающей реакции адаптации.

Тесты с флуоресцентным зондом ДГЭ показали, что обработка 3 ммоль/л  $\text{Ni}^{2+}$  не стимулировала сильного накопления АФК в корнях арабидопсиса в зоне всасывания. Выдерживание в растворе 6 ммоль/л гистидина также не оказывало существенного влияния на синтез АФК. Совместная обработка никелем и гистидином индуцировала сильную выработку АФК, интенсивность флуоресценции ДГЭ возрастала на 50 % в зоне всасывания и на 75 % в зоне деления по сравнению с контролем. Максимальная флуоресценция ДГЭ в зоне всасывания вызывала обработка  $\text{Ni}^{2+}$  и гистидином на протяжении 30 мин, после чего интенсивность флуоресценции снижалась (рисунок). В зоне кончика корня достоверных различий между 30–90 мин экспозиции в растворах  $\text{Ni}^{2+}$ –гистидин не отмечалось. Таким образом, зона деления демонстрировала большую чувствительность к воздействию комплексов  $\text{Ni}^{2+}$ –гистидин по сравнению с зоной всасывания. Возможно, это имеет принципиальное значение для выживания растений при тяжелометаллическом стрессе, так как имеются сведения, что уровень АФК определяет направление и скорость роста корня [7]. При проведении фармакологических тестов было показано, что добавление различных антиоксидантов (ДМСО, тиомочевина) и блокаторов кальций–проницаемых каналов ( $\text{Gd}^{3+}$ ) на фоне стресса, индуцированного никелем с гистидином, значительно снижало генерацию АФК в корнях арабидопсиса. Наиболее эффективной была обработка 0,3% ДМСО: в зоне всасывания корня накопление АФК в ответ на никель–гистидиновые комплексы снизилось на 17%. Данный эффект может представлять интерес при разработке агротехнических приемов для снижения токсического действия  $\text{Ni}^{2+}$  на растения.

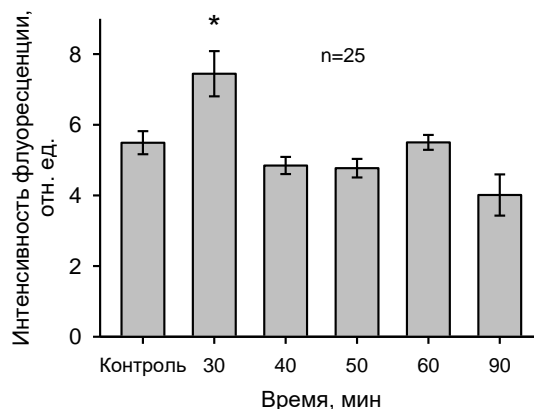


Рис. Средняя интенсивность флуоресценции ДФЭ в зоне всасывания корней арабидопсиса экотипа Col-0 при обработке растений 3 ммоль/л  $\text{Ni}^{2+}$  + 6 ммоль/л гистидин в течение 30–90 мин ( $X \pm SE$ ,  $n=25$ ). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю при помощи ANOVA-теста: \* –  $p \leq 0,05$

Таким образом, нами было показано: 1) при введении  $\text{Ni}^{2+}$ -содержащих смесей в среду выращивания ингибируется прорастание и рост главного корня *A. thaliana*; 2) растения *rhd2*, лишённые НАДФН-оксидазы типа С, менее чувствительны к никелевому стрессу; 3) гистидин, в соотношении 1  $\text{Ni}^{2+}$ / 2 гистидин, снижает токсическое действие  $\text{Ni}^{2+}$  на рост корня дикого типа, но не оказывает эффекта на линию *rhd2*; 4) свободный  $\text{Ni}^{2+}$  не вызывает значительного изменения в уровне АФК в корне арабидопсиса, однако, добавление гистидина активирует редокс-активность  $\text{Ni}^{2+}$  и вызывало накопление АФК; 5) зона деления более чувствительна к данному воздействию, чем зона всасывания; 6) добавление антиоксидантов (ДМСО) снижает уровень АФК в зоне всасывания корня, вызванный совместной обработкой никелем с гистидином.

#### 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. Halliwell B. & Gutteridge J.M.C. Free radicals in biology and medicine / B. Halliwell, J.M.C. Gutteridge – Oxford, UK: OUP, 1999. – 936 p.
3. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel / U. Krämer [et al.] // Nature. – 1996. – Vol. 379, № 6566. – P. 635–638.
4. Kaur G., Pati P.K. In silico physicochemical characterization and topology analysis of Respiratory burst oxidase homolog (Rboh) proteins from Arabidopsis and rice / G. Kaur, P.K. Pati // Bioinformation. – 2018. – T. 14, № 03. – С. 93–100.
5. Role of plant respiratory burst oxidase homologs in stress responses / W. Wang [et al.] // Free Radical Research. – 2018. – Vol. 52, № 8. – P. 826–839.
6. Comparative analysis of the reactive oxygen species-producing enzymatic activity of Arabidopsis NADPH oxidases / H. Kaya [et al.] // Plant J. – 2019. – Vol. 98, № 2. – P. 291–300.
7. Liskay A. Production of reactive oxygen intermediates ( $\text{O}_2\text{-}\bullet$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $\text{OH}\bullet$ ) by Maize roots and their role in wall loosening and elongation growth / A. Liskay // Plant Physiology. – 2004. – Vol. 136, № 2. – P. 3114–3123.

# ВИДОВОЙ СОСТАВ И УРОВЕНЬ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В КАРЬЕРНЫХ ВОДОЕМАХ ГРОДНЕНСКОГО МЕЛОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. Г. Мельничек

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*a\_melnichek@mail.ru;*

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

Представлены результаты изучения видового состава и анализа структуры фитопланктона отработанных меловых карьеров Южный и Центральный Гродненской области. В ходе исследования выявлено 52 вида водорослей, относящиеся к 7 отделам. Анализ таксономической структуры показал, что основу видового разнообразия фитопланктона отработанных меловых карьеров составляют отделы Bacillariophyta, Chlorophyta и Chrysophyta. Проведена оценка численности и биомассы фитопланктона отдельно по двум карьерным водоемам. Численность составила 12,6 млн кл./л в карьере Южный; 0,394 млн кл./л в Центральный. Биомасса 2,55 мг/л в карьере Южный; 2,41 мг/л в карьере Центральный, что соответствует мезотрофному типу водоема.

**Ключевые слова:** фитопланктон, карьерные водоемы, видовой состав, численность, биомасса.

На территории Республики Беларусь насчитывается около трехсот отработанных меловых карьеров. Лимнологические исследования этих водных объектов начаты в 80–е годы прошлого века [1]. Однако с гидробиологической позиции они изучены крайне слабо. В частности, по фитопланктону имеются лишь единичные публикации [2–4].

Фитопланктон является одним из важных компонентов водных биоценозов. Как правило, он играет основную роль в образовании органического вещества в водоемах озерного типа. Фитопланктону принадлежит ключевое место в системе оценки экологического состояния водных объектов, поскольку он находится в основании трофической пирамиды и первый принимает на себя оказываемое воздействие. Фитопланктон служит удобным объектом в системе биомониторинга, обладая быстрым и интегральным ответом на любые внешние воздействия [5].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе приведены результаты первых исследований фитопланктона двух карьерных водоемов Гродненского мелового месторождения – Центральный и Южный.

Водоемы находятся в окрестностях г. Гродно на расстоянии примерно 200 м друг от друга. Карьер Южный затоплен в 1976 г., а Цен-

тральный в 1989 г., следовательно, возраст карьерных водоемов на момент исследования составил соответственно 44 года и 31 год. Водоемы имеют близкие морфометрические характеристики. Площадь водного зеркала около 20 га, максимальная глубина достигает 35 м, характерны крутые береговые склоны.

Пробы фитопланктона отобраны 03.08.2019 года, на 4 станциях в карьере Южный и 2 станциях в карьере Центральный.

Фитопланктон отбирали на расстоянии 2–3 метра от берега с глубины от 0,5 до 1,60 м в зависимости от глубины станции. Фиксировали пробы раствором Утермёля. Концентрировали фитопланктон методом отстаивания от начального объема 0,5 л. Плотность (численность) фитопланктона определяли счетным методом в камере Фукс–Розенталя. Биомассу водорослей рассчитывали методом «истинного объема» (=геометрического подобия). Для установления видовой принадлежности диатомовых водорослей готовили постоянные препараты по общепринятой методике.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В фитопланктоне карьерных водоемов определено 52 вида водорослей, которые относятся к 39 родами, 30 семействам, 18 порядкам, 13 классами и 7 отделам (таблица 1).

Анализ таксономической структуры фитопланктонных организмов показал, что наиболее значимыми отделами являются Bacillariophyta (29 % от общего числа выявленных видов), Chlorophyta (25%) и Chrysophyta (23%). Следует отметить, что таксономическая структура фитопланктона в карьерах Центральный и Южный различается.

Преобладающими отделами в карьерном водоеме Южный являются отделы Bacillariophyta – 33 % и Chlorophyta – 27%, а в карьерном водоеме Центральный – отделы Chrysophyta и Bacillariophyta, составляющие 32 и 29 % от общего числа видов соответственно. На долю Chlorophyta в карьере Центральный приходится всего 16 %. В свою очередь, Chrysophyta, доминирующие в альгофлоре планктона карьера Центральный, в карьере Южный составляют только 13%.

Преобладание диатомовых и зеленых водорослей является типичным для водоемов и водотоков Беларуси, видовое богатство золотистых, как правило, ниже [6].

Таблица 1

## Таксономическая структура фитопланктона карьерного водоема Центральный

Отдел	Класс	Порядок	Семей- ство	Род	Вид
<b>Cyanophyta</b>	2	2	4	4	4
<b>Cryptophyta</b>	1	1	1	2	3
<b>Dinophyta</b>	1	1	2	4	4
<b>Chrysophyta</b>	2	3	4	6	12
<b>Bacillariophyta</b>	2	4	8	10	15
<b>Euglenophyta</b>	1	1	1	1	1
<b>Chlorophyta</b>	4	6	10	12	13
<b>Всего</b>	13	18	30	39	52

Для полноценной оценки экологического состояния карьеров необходимо проанализировать данные по биомассе и численности.

Данные рассчитанной биомассы и численности карьерных водоемов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Уровень количественного развития фитопланктона карьеров Южный и Центральный, среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение

Карьер	Численность, млн клеток/л	Биомасса, мг/л
Южный	12,6 $\pm$ 2,79	2,55 $\pm$ 0,68
Центральный	0,394	2,41

Величины биомассы в обоих карьерах практически одинаковы, при этом численность различается в 30 раз. Это объясняется тем, что в двух карьерах разное соотношение преобладающих отделов водорослей. В Южном доминируют мелкоклеточные диатомовые и зеленые (*Cyclotella* sp., *Tetrastrum* sp., *Dictyosphaerium pulchellum*), а в Центральном – крупноклеточные золотистые, их мало, но они все обладают большой индивидуальной массой (*Dinobryon divergens*, *Dinobryon bavaricum*, *Chromulina* sp.).

Величины численности и биомассы фитопланктона в карьерах Центральный и Южный соответствуют мезотрофному типу водоемов.

## Библиографические ссылки:

1. Хомич С.А. Геоэкологические аспекты водохозяйственной рекультивации нарушенных земель Беларуси. Мн.: Институт геологических наук, 2001. 124 с.
2. Макаревич Т.А., Савич И.В. Фитопланктон и фитоперифитон в разновозрастных карьерных водоемах отработанных меловых месторождений (Беларусь) // Actual problems in modern phycology: V International conference. Moldova. – Chişinău: CEPUSM, 2014. P. 199–204.

3. Макаревич Т.А., Никитина Л.В., Савич И.В., Богданова А.С. К изучению фито- и бактериопланктона карьерных водоемов выработанных меловых месторождений // Актуальные проблемы биоэкологии: мат. Междунар. науч. конф., Минск, 23–25 окт. 2014. Минск: БГУ, 2014. С. 93–94.
4. Makarevich T. A., Savich I.V., Nikitina L.V. The structure of plankton and periphyton communities in quarry reservoirs of different “ages” (Belarus) // Dynamics and functioning of aquatic ecosystems under the impact of climate change and anthropogenic stress. Abstracts of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference to commemorate famous hydrobiologist G.G. Winberg. – St. Petersburg: Publishing company «LEMA», 2015. P. 156–157.
5. Михеева, Т.М. Альгофлора Беларуси: Разнообразие, продукционные возможности, значимость в экосистемах, изменение в процессе эволюции (обзор) // Вестник БГУ. Сер. 2. 2010. № 2. С. 36–45
6. Баринава, С.С. Биоазнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. ТельАвив: PiliesStudio, 2006. 498 с.

# АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ IN VITRO ПЛОДОВОЯГОДНЫХ РАСТЕНИЙ

Н.А.Перковский

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*Nikitaperkovskij@gmail.com*;

науч. рук. – М. А. Черныш

Микроклональное размножение *invitro* является одной из самых актуальных технологий в сельском хозяйстве, и находит широкое применение в выращивании плодоваягодных культур. Гормональные модификации сред, введение новых культур *invitro* и их адаптация к условиям *exvitro*—основные подходы по улучшению данной технологии. В данной работе предлагаются модификации для отдельных этапов микроклонального размножения *Fragaria vesca*, *Rubus idaeus* и *Rubus vulgaris*.

**Ключевые слова:** растительная биотехнология; микроклональное размножение; плодоваягодные культуры.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение устойчивости сельского хозяйства представляется одной из важнейших задач нашего времени, для её решения необходимы технологии и подходы. Одной из таких технологий является микроклональное размножение *invitro*, она находит широкое применение при выращивании плодоваягодных культур[1].

Целью настоящей работы было освоение и усовершенствование методов проращивания семян земляники лесной; анализ воздействия на рост малины обыкновенной и ежевики обыкновенной при субкультивировании *invitro* различных фитогормонов. Анализ влияния почвенных субстратов на адаптацию ежевики обыкновенной к условиям *exvitro*. Для достижения поставленной темы было необходимо проанализировать влияния стратификации и различных способов проращивания семян земляники лесной; охарактеризовать воздействие добавленных в среду различных уровней ауксинов, цитокининов и брассиностероидов на рост стерильных микрорастений ежевики и малины обыкновенной; проанализировать влияние почвенного субстрата на адаптацию малины обыкновенной к условиям *exvitro*[2].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Семена земляники лесной 4 сортов: «Руяна», «Барон Солемахер», «Сашенька», «Золушка»; предварительно были разделены на 2 группы, одна была подвергнута 2 недельной стратификации, вторая подобной

обработки не проходила [6]. После они были стерилизованы при помощи коммерческого препарата «Белизна» и высажены в равных пропорциях в почвенный субстрат (верховой торф, вермикулит и песок, в соотношении 2:2:1) и на безгормональную среду Мурасиге и Скуга (МС) [4].

Ежевика обыкновенная сорта «Гималаи» и малина обыкновенная сорта «Атлант» предварительно уже были введены в культуру *in vitro*, поэтому для их субкультивирования брались микрорастения, растущие на полноценной безгормональной среде МС. После чего такие растения в стерильных условиях ламинар-бокса, подвергались микрочеренкованию и переносились на полноценную среду МС с добавлением 0,9% агар и 3,0% сахарозы, модифицированную следующими фитогормонами: 6-бензиламинопурина (БАП), кинетин (Кин), индолил-3-уксусная кислота (ИУК), индолил-3-масляная кислота (ИМК), 24-эпибрассинолид (ЭБ), 24-эпикастастерон (ЭК). Брассиностероиды были протестированы в концентрации  $10^{-8}$  [3]. Также были использованы цитокинины и ауксины, классически используемые при культивировании различных плодовых культур. Уровни данных гормонов были подобраны согласно литературным источникам: 0,1 мг/л для ауксинов и 0,5 мг/л для цитокининов [5]. Одним из вариантов стало культивирование на безгормональной МС среде (Б/г), в качестве контроля выступила безгормональная МС среда с содержанием 0,1 мг/л спирта.

После 30 дней культивирования ежевики обыкновенной в условиях *in vitro*, микрорастения были изъяты из стерильных условий и после снятия показаний были помещены в сосуд с проточной водой для 24 ч отмывки от остатков субстрата. После чего они были посажены в три предварительно подготовленных субстрата: торф, вермикулит, торф и вермикулит (в соотношении 1:1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование показало сортоспецифичное увеличение прорастания семян *Fragaria Vesca* под действием стратификации. Показана ростостимулирующая активность микромолярных концентраций брассиностероидов (ЭБ и ЭК) и ауксинов (ИМК) при субкультивировании микрорастений *Rubus Vulgaris* и *Rubus Idaeus in vitro*. Продемонстрирована наилучшая адаптация ежевики обыкновенной к условиям *ex vitro*.

По истечению 30 суток проращивания семян земляники лесной, наилучший результат был отмечен, при проращивании в почве семян сортов «Сашенька» и «Руяна» 88% и 48% соответственно. Использование почвенного субстрата показало лучшие результаты, как для стратифици-



рованных, так и для не стратифицированных семян, за исключением не стратифицированных семян сорта «Руяна» – 20% в почве и 26 % на питательной среде. Влияние стратификации было сортоспецифичным.

После 30 дневного культивирования ежевики обыкновенной наилучший результат продемонстрировало добавление в питательную среду эпибрасинолида ( $10^{-8}$  М), прирост длины побега на 31 % по сравнению с контролем, также прирост на 20 % получен при использовании индолмасляной кислоты (0,1 мг/л). При культивировании малины обыкновенной наилучший результат продемонстрировало использование эпикастастерона ( $10^{-8}$  М) с приростом длины побегов на 11,7 %.

Использование торфяного субстрата для адаптации ежевики обыкновенной к условиям *ex vitro*, позволяет получить наибольшее количество адаптированных растений 57,5 % ; результаты снимались на 30 сутки.

#### Библиографические ссылки

1. Джафарова, В.Е. Особенности микроклонального развития яблони с геном *vf* и возможности индуцирования полиплоидных меристем в условиях *in vitro*/ В.Е. Джафарова // Научно-методический электронный журнал концепт. – 2013. – № 3. – С. 446–450.
2. Козицкий, Ю.Н. Регуляторы роста и микроразмножение цветочных культур/ Ю.Н. Козицкий, М.Ф. Борукаева, Н.С. Смирнова // Цветоводство. – 1980. – №2. – С. 13–15.
3. Clouse, S.D. Molecular analysis of brassinolide action in plant growth and development./ S.D. Clouse, D. Zurek // American Chemical Society. – 1991. – P. 122–140.
4. Micropropagation Of Strawberry (*Fragaria X Ananassa*) / N. Ahmed [et al.] // Crop Improvement – 2010. – Vol.27, n. 2– P.153–156.
5. Sedlak, J. Micropropagation of blackberry genotypes./ J. Sedlak, F. Paprstein// Acta-horticulturae. – 2016. – P. 487–490.
6. Raymond, A. M. Enhanced Strawberry Seed Germination through *in vitro* Culture of Cut Achenes / A. M. Raymond, J. C. Scheereus, P. S. Erb //J. AMER. Soc. HORT. SCI. – 1992. – Vol.117, n. 2– P. 313–316.

# АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ ОКИСЛЕНИЯ АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТЫ И ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЯХ *NICOTIANATABACUM*, ВЫРАЩЕННЫХ В УСЛОВИЯХ АБИОТИЧЕСКОГО СТРЕССА

К.В. Приступа, В.Д. Курган

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*kristina.pristupa@mail.ru; kvitella8@gmail.com*  
науч. рук. – Т.А. Кукулянская, канд. биол. наук., доц.

Повышение устойчивости растений к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды является одной из задач, стоящих перед учеными. Растения, которые произрастают в неблагоприятных условиях, подвергаются абиотическому стрессовому воздействию, например, засолению, засухе и т.д. В таких условиях повышается содержание активных форм кислорода (АФК), усиливается интенсивность свободно радикальных окислительных процессов в растениях. Как правило, это приводит к активации ферментативных и неферментативных элементов антиоксидантной защитной системы растений (в том числе аскорбиновой кислоты (АК), фенольных соединений (ФС) и ферментов, участвующих в их метаболизме)[1].

Развитие абиотического стресса сопровождается образованием избыточного количества этилена в растениях. Одним из способов его снижения является создание трансгенных растений, которые несут в своем геноме бактериальный *acdS*-ген, который кодирует 1-аминоциклопропан-1-карбоксилатдезаминазу. Данный фермент катализирует превращение предшественника этилена 1-аминоциклопропан-1-карбоксилата до аммиака и  $\alpha$ -кетобутирата [2].

Целью данной работы являлось изучение влияния абиотического стресса на активность ряда ферментов окисления аскорбиновой кислоты и фенольных соединений в нетрансгенных и трансгенных растениях *Nicotianatabacum*, несущих *acdS*-ген бактерий *Pseudomonasputida*B-37.

**Ключевые слова:** антиоксидантная система; аскорбиновая кислота; фенольные соединения; этилен; *acdS*-ген; *Pseudomonasputida*B-37.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объектов исследования выступали нетрансгенные и трансгенные растения *Nicotianatabacum*. Растения были разделены на следующие серии:

1. Контрольная серия (почва не обрабатывалась);
2. 1 серия (почва была обработана  $\text{CuSO}_4$  в концентрации 30 мг/кг почвы);
3. 2 серия (почва была обработана  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  в концентрации 15 мг/кг почвы);
4. 3 серия (почва была обработана  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  в концентрации 15 мг/кг почвы).
5. 4 серия (почва была обработана 200 мМ  $\text{NaCl}$ );

6. 5 серия (почва была подвержена засухе)

Растительный материал (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 3×15с), центрифугировали 15 мин при 10 000 об/мин. Определение содержания АК, ФС, активности ферментов антиоксидантной защиты в экстрактах проводили согласно методическому пособию по спецпрактикуму [3]. Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью программы STATISTICA 6.0. Оценку достоверности различий средних арифметических между контрольной и опытными сериями проводили на основании коэффициента Стьюдента.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Первоначально нами было определено содержание ФС и АК, что представлено в таблице 1.

Таблица 1

Содержание АК и ФС в экстрактах *Nicotianatabacum*

Серия	Содержание АК, мг/г растительного материала		Содержание ФС, мкг танина/г растительного материала	
	Нетрансгенные растения	Трансгенные растения	Нетрансгенные растения	Трансгенные растения
Без обработки	0,73 ± 0,015	0,78 ± 0,015	59 ± 0,3	69 ± 0,3
5хПДК [Cu <sup>2+</sup> ]	0,96 ± 0,018*	1,07 ± 0,019*	84 ± 0,4*	150 ± 0,7*
5хПДК [Cr <sup>6+</sup> ]	1,38 ± 0,027*	1,74 ± 0,037*	106 ± 0,6*	161 ± 0,8*
5хПДК [Pb <sup>2+</sup> ]	0,75 ± 0,016	0,88 ± 0,017	80 ± 0,4*	104 ± 0,5*
200 мМ NaCl	1,79 ± 0,040*	3,82 ± 0,063*	107 ± 0,5*	172 ± 0,9*
Засушливая почва	2,29 ± 0,047*	5,12 ± 0,081*	156 ± 0,9*	185 ± 1,0*

\* – различия достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$

Как видно из табл.1, при внесении в почву ионов тяжелых металлов, засолении и засухе повышается содержание АК и ФС в нетрансгенных и трансгенных растениях. Показано, что трансгенные формы отличаются более высоким содержанием данных антиоксидантов по сравнению с нетрансгенными при абиотическом стрессе. Максимальное содержание АК

обнаружено в условиях засухи: для нетрансгенных растений оно составило 310%, для трансгенных – 450% по сравнению с контрольной серией.

Установлено, что внетрансгенных растениях содержание ФС увеличилось в 1,4, 1,8 и 1,4 раз при обработке почвы ионами меди (II), хрома (VI) и свинца (II) по сравнению с контрольной серией, в трансгенных – в 2,2, 2,3 и 1,5 раза соответственно.

Также нами была определена активность аскорбатоксидазы (АО) и аскорбатпероксидазы (АП) во всех сериях растений (таблица 2).

Таблица 2

**Активность АО и АП в экстрактах *Nicotianatabacum***

Серия	Активность АО, отн. ед. / (мин×мг белка)		Активность АП, отн. ед. / (мин×мг белка)	
	Нетранс- ген-ные рас- тения	Трансгенные растения	Нетранс- ген-ные рас- тения	Трансген- ные растения
Без обработки	0,04 ± 0,002	0,04 ± 0,002	0,03 ± 0,002	0,03 ± 0,002
5хПДК [Cu <sup>2+</sup> ]	0,11 ± 0,006*	0,06 ± 0,002*	0,10 ± 0,004*	0,07 ± 0,003*
5хПДК [Cr <sup>6+</sup> ]	0,13 ± 0,007*	0,09 ± 0,004*	0,15 ± 0,007*	0,11 ± 0,005*
5хПДК [Pb <sup>2+</sup> ]	0,10 ± 0,005*	0,05 ± 0,002*	0,09 ± 0,004*	0,06 ± 0,003*
200 мМ NaCl	0,14 ± 0,008*	0,1 ± 0,005*	0,17 ± 0,008*	0,12 ± 0,005*
Засушл и-вая почва	0,16 ± 0,007*	0,11 ± 0,005*	0,18 ± 0,008*	0,14 ± 0,006*

\* – различия достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$

Как видно из представленных данных, активность АО и АП увеличились в условиях абиотического стресса. Для нетрансгенных растений активность АО составила 280%, 330%, 250%, 350% и 400% при обработке почвы ионами меди (II), хрома (VI), свинца (II), NaCl, а также после засухи соответственно по сравнению с контрольной серией, для трансгенных растений – 150%, 250%, 130%, 250% и 280% соответственно.

В нетрансгенных растениях активность АП возросла в 3,3; 5; 3; 5,7 и 6 раз после внесения в почву меди (II), хрома (VI), свинца (II), NaCl, а

также после засухи соответственно по сравнению с контрольной серией, в трансгенных растениях – в 2,3; 3,7; 2; 4 и 4,7 раза соответственно.

Кроме того, нами была изучена активность полифенолоксидазы(ПФО) и интенсивность процессов пероксидазного окисления в экстрактах *Nicotianatabacum*, что представлено в таблице 3.

Таблица 3

Активность ПФО и пероксидаз в *Nicotianatabacum*

Серия	Активность ПФО, Е/(мин×мг белка)		Пероксидазная активность, мкмоль/(мин×мг белка)	
	Нетранс- ген-ные рас- тения	Трансген- ные растения	Нетранс- ген-ные рас- тения	Трансген- ные растения
Без обработки	0,85 ± 0,019	0,86 ± 0,020	2,32 ± 0,06	2,44 ± 0,06
5хПДК [Cu <sup>2+</sup> ]	1,73 ± 0,042*	1,44 ± 0,028*	6,53 ± 0,08*	3,37 ± 0,08*
5хПДК [Cr <sup>6+</sup> ]	1,42 ± 0,038*	1,25 ± 0,033*	7,96 ± 0,06*	3,96 ± 0,08*
5хПДК [Pb <sup>2+</sup> ]	1,06 ± 0,029*	0,96 ± 0,028*	6,88 ± 0,05*	3,65 ± 0,07*
200 мМ NaCl	1,82 ± 0,045*	1,56 ± 0,032*	7,04 ± 0,07*	3,85 ± 0,07*
Засушл и-вая почва	1,93 ± 0,047*	1,62 ± 0,034*	8,46 ± 0,11*	4,24 ± 0,08*

\* – различия достоверны при уровне значимости  $p \leq 0,05$

Как видно из табл. 3, активность ПФО и пероксидазная активность увеличились в растениях при абиотическом стрессе. Показано, что нетрансгенные образцы отличаются более высокой активностью данных ферментов по сравнению с трансгенными. Максимальная пероксидазная активность и активность ПФО обнаружена в условиях засухи: для нетрансгенных форм они составили 230% и 370% по сравнению с контрольной серией, для трансгенных – 180% и 170% соответственно.

**Заключение.** В данной работе сравнивали ряд биохимических показателей нетрансгенных и трансгенных растений в условиях абиотического стресса. Вероятно, трансгенные формы отличаются более низким уровнем образования АФК в условиях абиотического стресса, поэтому в них в меньшей степени происходит активация ферментативных элемен-

тов антиоксидантной защиты (АП, АО, ПФО). Этому, в свою очередь, может способствовать более высокое содержание низкомолекулярных компонентов антиоксидантной системы (ФС, АК).

#### **Библиографические ссылки.**

1. *Mates, J.M.* Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology / J.M. Mates // *Toxicology*. – 2000. – Vol. 153. – P. 83–104.
2. *Glick, B.R.* Bacterial ACC deaminase and the alleviation of plant stress / B.R. Glick // *Advances in applied microbiology*. – 2004. – Vol. 56. – P. 291–312.
3. *Семак И.В.* Методическое пособие по спец. практикуму для студентов биологического факультета / И.В. Семак, Т.Н. Зырянова, О.И. Губич. – Минск: БГУ, 2012. – 123 с.

# ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ И НИКЕЛЬ–ГИСТИДИНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА РОСТ КОРНЕЙ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

А. Л. Рекиш, А. А. Шикер

*Белорусский государственный университет;*

*v.mackievic@gmail.com;*

*науч. рук. – В.С. Мацкевич*

Среди тяжелых металлов–загрязнителей никель занимает особое место, так как он чрезвычайно широко используется в промышленности. В индустриально развитых регионах уровни  $Ni^{2+}$  в среде часто превышают допустимые значения и оказывают токсическое действие на окружающую флору. Механизмы ответной реакции растений на никелевый стресс в настоящее время мало изучены. В данной работе было протестировано воздействие  $Ni^{2+}$  и комплексов Ni–Гистидин2 на рост корней трех важнейших сельскохозяйственных растений (пшеницы, подсолнечника и гороха).

**Ключевые слова:** никель; гистидин; тяжелые металлы; пшеница; подсолнечник; горох; рост; корень.

## ВВЕДЕНИЕ

Никель является 22–ым по распространению элементом в земной коре и составляет 3% массы Земли [1]. Данный металл широко используется в промышленности при производстве нержавеющей стали, различных сплавов, аккумуляторов, элементов электротехники, медицинского и химического оборудования [2]. Поэтому в индустриально развитых регионах часто возникает проблема никелевого загрязнения.

Для растений никель является важным микроэлементом, в первую очередь он входит в состав фермента уреазы [3]. Тем не менее, потребность растений в нем не высока, для большинства видов концентрации  $Ni^{2+}$  свыше 10–50 мкМ вызывают токсические эффекты: тормозят ростовых процессов, подавляют фотосинтез, прорастание семян, транспорт сахара и индуцируют хлороз, некроз и увядание [4]. Кроме того,  $Ni^{2+}$  способен накапливаться в различных тканях растения, что дает возможность попаданию больших доз никеля по пищевым в организмы животных и человека.

Первичный и наиболее общий ответ растений на воздействие стресс–факторов среды – ингибирование ростовых процессов, происходящих вследствие переключения с использования ресурсов (энергии и метаболических предшественников) для накопления биомассы на использование их для активации защитных механизмов [5]. При этом основной мишенью большинства абиотических стрессоров выступают клетки корня. В связи с этим, анализ роста корней является одним из удобных и

информативных методов изучения влияния стресс-факторов на растительный организм, а также определения стрессоустойчивости различных видов и сортов. Целью настоящей работы являлся анализ влияния никеля и комплексов никеля с гистидином на рост корней трех сельскохозяйственных растений: пшеницы, подсолнечника и гороха.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были выбраны три важнейших сельскохозяйственных видов растений: *Triticum aestivum* L. сорт Элегия, *Helianthus annuus* L. гибрид Ореон, *Pisurn arvense* L. сорт Пелюшка. Растения культивировались рулонным методом. Семена обрабатывались 20 мин 20 % раствором коммерческого детергента (Domestos), промывались в проточной воде и высаживались на фильтровальную бумагу по десять семян в каждую после чего бумага сворачивалась в рулон и помещалась в стакан с питательной средой. Среда выращивания содержала 10 % стандартную смесь солей Мурашиге и Скуга с микроэлементами, произведенную компаниями Duchefa, рН титровался до уровня 6,0 при помощи КОН. В данную среду вводились тестируемые растворы  $\text{NiCl}_2$ . Рулоны с подсолнечником переносились в ростовую комнату, где выращивались в контролируемых условиях (освещение 16 ч свет / 8 ч темнота, температура 22 °С) в течение 7 сут. На 7 сут регистрировалась длина основного корня, расчеты производились при помощи приложения ImageJ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ростовые тесты показали, что низкие концентрации  $\text{Ni}^{2+}$  (до 0,01 мМ) стимулировали рост основного корня пшеницы, однако при увеличении концентрации свыше 0,03 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  наблюдалось ингибирование ростовых процессов (рисунок, панель А). Полунгибирующий эффект отмечался при 0,3 мМ  $\text{Ni}^{2+}$ , концентрация 10 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  была летальной. В присутствии гистидина токсический эффект  $\text{Ni}^{2+}$  снижался и даже при летальной концентрации никеля в 10 мМ наблюдалось прорастание семян.



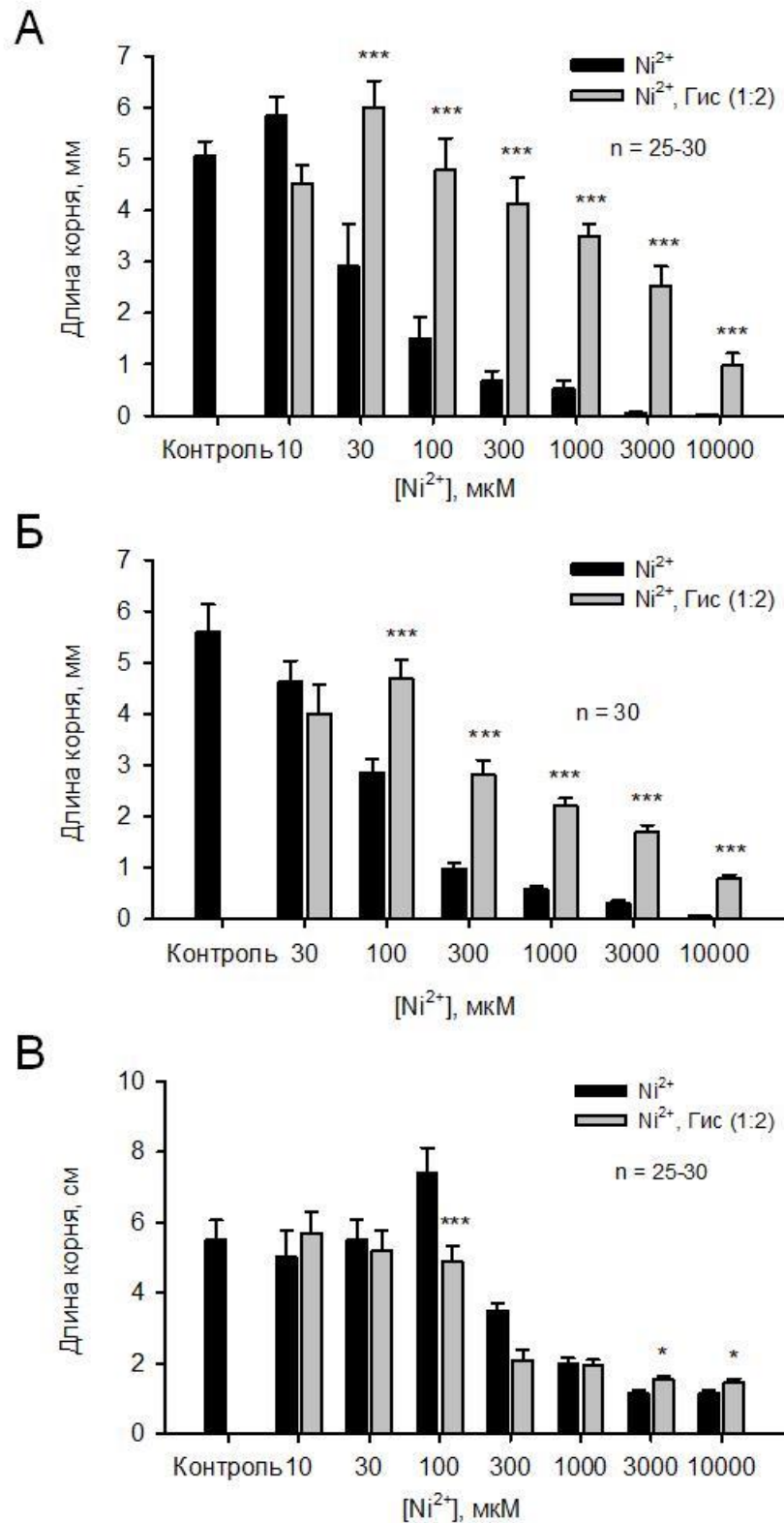


Рис. Средняя длина основного корня пшеницы (А), подсолнечника (Б) и гороха (В) при выращивании растений в среде, содержащей никель и никель–гистидиновые комплексы ( $X \pm SE$ ,  $n=25-30$ ). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к длине корня у растений, культивируемых в среде с никелем ( $\text{Ni}^{2+}$ ) при помощи ANOVA–теста: \* –  $p \leq 0,05$ ; \*\*\* –  $p \leq 0,001$

В случае подсолнечника при выращивании растений в среде с никелем не наблюдалась стимуляция роста низкими концентрациями  $\text{Ni}^{2+}$  (рисунок, панель Б). Начиная с 0,1 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  отмечалось ингибирование роста основного корня. Полумаксимальный ингибирующий эффект регистрировался при 0,3 мМ  $\text{Ni}^{2+}$ , концентрация 10 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  была летальной. Добавление гистидина также оказывало протекторное действие, особенно заметное на фоне сублетальных и летальных уровней никеля.

Проростки гороха были более устойчивыми к обработке никелем (рисунок, панель В). Концентрация 0,1 мМ стимулировала ростовые процессы на 20%, начиная с 0,3 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  отмечалось снижение скорости роста основного корня. Полумаксимальный ингибирующий эффект регистрировался при 1 мМ  $\text{Ni}^{2+}$ , небольшой рост отмечался и на фоне 10 мМ  $\text{Ni}^{2+}$ . Вероятно, меньшая чувствительность гороха к никелю связана с большей активностью уреазы в бобовых и, следовательно, высокой потребностью растений в никеле, входящим в состав данного фермента. Ведение гистидина в питательную среду имело меньший эффект по сравнению с другими видами, небольшое протекторное действие гистидина наблюдалось лишь при 3 и 10 мМ  $\text{Ni}^{2+}$ .

Таким образом, в данной работе было показано: 1) введение никеля в среду выращивания ингибирует рост основного корня пшеницы и подсолнечника в концентрациях свыше 0,1 мМ, гороха – свыше 0,3 мМ; 2) горох является менее чувствительным к никелю, т.к. при 10 мМ  $\text{Ni}^{2+}$  (летальной концентрации для других объектов) все еще наблюдается рост; 3) в присутствии гистидина токсический эффект  $\text{Ni}^{2+}$  снижается, особенно при высоких уровнях металла.

#### Библиографические ссылки

1. Toxicity and carcinogenicity of nickel compounds / T.P. Coogan [et al.] // Crit. Rev. Toxicol. – 1989. – Vol.19, №4. – P. 341–384.
2. 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.
3. Yaadav N. An account of nickel requirement, toxicity and oxidative stress in plants / N. Yaadav, S. Sharma // Biological forum – an international journal. – 2016. – Vol. 1, № 8. – P. 414–419.
4. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants / T.V.M. Sreekanth [et al.] // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2013. – Vol. 10. – P. 1129–1140.
5. Mechanisms of salinity tolerance / R. Munns, M. Tester // Annu. Rev. Plant Biol. – 2008. – Vol. 59. – P. 651–681.

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МУТАНТОВ И ИСХОДНЫХ ФОРМ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К АНТРАКНОЗУ

Сяо Юйтин

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,  
Anokhina@tut.by,  
науч. рук. – В. С. Анохина, канд. биол. наук, доц.

Для создания перспективных источников для селекции новых сортов фасоли актуально создание и изучение генетически разнообразного генофонда культуры с использованием современных методов при репродукции образцов в конкретных регионах возделывания.

Цель работы – комплексная оценка по устойчивости к антракнозу различных по происхождению образцов фасоли обыкновенной с использованием показателей выживаемости форм в полевых условиях, изучение реакции проростков на воздействии патогена и молекулярно–генетического маркирования генотипов для выделения перспективного исходного селекционного материала.

**Ключевые слова:** антракноз, выживаемость растений, патоген, проростки, фасоль

В нашей работе в 2017–2019 годы на полях ботанического сада БГУ были высеяны семена сорта фасоли Триумф сахарный и его мутантные линии (МЗЛ4 и МЗЛ6). Они были изучены по всхожести семян, выживаемости растений, окраске цветков и семян, элементам семенной продуктивности. Проведен анализ геномов по аллелям отдельных генов, детерминирующих устойчивость генотипов к антракнозу. Отобраны перспективные формы по продуктивности и морфотипу растений. Они оценены по устойчивости к антракнозу по проросткам и ДНК–маркированию геномов.

Для определения устойчивости образцов фасоли к антракнозу использовали метод оценки по проросткам с использованием суспензии спор возбудителя антракноза – *Colletotrichum lindemuthianum*. В опыте была проведена оценка за три года анализа ранее отобранных 15 семей мутантной линии МЗЛ4 и 7 семей из линии МЗЛ6.

По результатам проведенных исследований выделена мутантная линия ТсМЗЛ4. Она отличалась от исходного сорта окраской семян, имела в большинстве семей относительно высокую выживаемость растений и всхожесть семян, которые сохранялись в течение трех лет исследований. Эта линия имела лиловые цветки и черную окраску семян. Линия ТсМЗЛ6 имела 2 рецессивных признака (белая окраска семян и цветков).

В полевых условиях были учтены всхожесть семян и выживаемость растений. Изученные формы в полевых условиях обладали хорошей всхожестью семян (от 60 до 85 %) у сорта Триумф сахарный, как и об-

разцы линии ТсМЗЛ4, в то время как у линии ТсМЗЛ6 всхожесть была всего 4% в 2017 г и до 87.50% в 2017 и 2018 г. г. В этой же линии также максимально снижалась всхожесть семян и под воздействием патогена (в 2018 году проросло всего 5% семян). Линия МЗЛ4 отличалась высокой выживаемостью растений в полевых условиях (процент выживаемости составлял от 82,35% до 100%).

Выделенные по результатам полевых опытов линии в лабораторных условиях оценены на устойчивость к антракнозу по проросткам (табл. 1), где учитывали длину корешка и гипокотилия, поражаемость проростков и балл устойчивости, согласно рекомендации [1].

Таблица 1

**Оценка устойчивости к антракнозу экспериментальных образцов фасоли по проросткам**

Сорт му-тант год	Длина ( $\bar{x} \pm S_x$ ), см				Поражаемость, %	Балл устойчивости
	корешка		гипокотилия			
	контроль	опыт	контроль	опыт		
Тссо рт 2017	2,06±0,3 5	3,44±0,68	2,01±0,1 6	2,64±0,21	42,11	3
Тссо рт 2019	5,86±0,6 1	6,56±0,97	1,89±0,1 1	4,51±0,48* **	10	7
ТсМЗ Л4 2017	4,35±0,7 4	6,52±0,43*	3,89±0,4 9	6,60±0,45*	0	9
ТсМЗ Л4 2018	5,22±0,5 1	5,66±0,82	4,44±0,2 7	7,39±0,78* **	5	7
ТсМЗ Л4 2019	6,48±0,6 4	11,59±1,52 **	2,28±0,1 4	5,79±0,68* **	0	9
ТсМЗ Л6 2017	0,43±0,1 3	1,94±0,49	2,20±0,2 9	2,64±0,42	100	1
ТсМЗ Л6 2018	4,94±0,58	3,20±0,00*	1,77±0,0 9	0,00±0,00* **	100	1
ТсМЗ Л6 2019	9,41±0,8 7	6,65±0,73* *	2,32±0,1 5	5,21±0,64* *	90	1

Примечание: контроль – без воздействия патогена, опыт – с воздействием патогена. \* – разница с контролем достоверна при  $p \geq 0,05$ ; \*\* – разница с контролем достоверна при  $p \geq 0,01$ ; \*\*\* – разница с контролем достоверна при  $p \geq 0,001$ .

Наибольшие баллы устойчивости к антракнозу среди изученных образцов фасоли овощной отмечены у ТсМ3Л4. Балл устойчивости в 2018 г был 7, в 2017 и 2019 г – 9: длина корешка и длина гипокотыля у этой линии в опыте достоверно превосходила контроль и исходный сорт.

В таблице 2 приведены результаты оценки опытных форм по ДНК-маркированию их геномов по семенам, согласно рекомендациям [2–5].

Выделение ДНК из проростков проведено с использованием набора Plant DNA Preparation Kit, Bioscience, Jena, Germany согласно методике производителя. ПЦР проводили с использованием праймеров CV54 2014, TGA, SQ4, SAS13, SY20, SBB14, SZ04, SC08, синтезированных ОДО «Праймтех», г. Минск. Продукты амплификации разделяли в 2 %-ной агарозе при одновременном окрашивании бромистым этидием. Гели визуализировали в УФ-транслюминаторе. В работе использовали ДНК-маркер молекулярного веса М 100 bp и 1Кb ОДО «Праймтех».

Таблица 2

**Результаты изучения геномов образцов фасоли обыкновенной по устойчивости к антракнозу с использованием ДНК-маркеров**

Название образца, год	Результаты маркирования (ген, праймер)							
	Ген Co1 <sup>4</sup> (CV54 2014)	Ген Phg-1 (TGA)	Ген Co-2 (SQ4)	Ген Co-4 (SAS13)	Ген Co-4 (SY20)	Ген Co-4 (SBB14)	Ген Co-4 (SC08)	Ген Co-6 (SZ04)
Тссорт 2017,2019	-	+	-	+	+	+	-	+
ТсМ3 Л4 2017	+	+	-	+	+	-	-	+
ТсМ3 Л4 2018,2019	-	+	-	+	+	+	-	+
ТсМ3 Л6 2017,2019	-	+	-	+	+	+	-	+
ТсМ3 Л6 2018	-	+	-	+	+	-	-	+

Примечание: + наличие гена; – отсутствие гена.

Исходный сорт Триумф сахарный в 2017 и 2019 годах проявлял одинаковые показатели по ДНК–маркированию (отсутствие гена Co14, по праймеру CV54 2014, гена Co–2 по праймеру SQ4 и гена Co–4 по праймеру SC08) и присутствие в геноме других аллелей изученных генов. В геноме линии ТсМЗЛ4 были выявлены 5 аллелей изученных генов с некоторыми отличиями по годам. В геномах линии ТсМЗЛ6 не выявлены гены Co14, Co–2 и Co–4 (праймер SC08) в 2017 и 2019 г.г, аллель гена Co–4 (праймер SBB14) в 2018 г. Возможно, такое соотношение генов и определяло разную реакцию на воздействие патогена на проростки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена полевая оценка по выживаемости растений и лабораторная оценка по устойчивости проростков при воздействии *Colletotrichum lindemuthianum* – источника антракноза, а также молекулярное тестирование генотипов по 4 генам исходного сорта образцов фасоли Триумф сахарный и его мутантных линий разных поколений. По результатам трехлетнего изучения опытных форм фасоли выделена перспективная для селекции мутантная линия ТсМЗЛ4 устойчивая к антракнозу.

Сочетание количества разных аллелей генов устойчивости в геноме изученных форм позволяет утверждать о сложной полигенной природе признака устойчивости фасоли к грибным болезням, а выделенная мутантная форма может быть рекомендована как источник устойчивости к антракнозу.

## Библиографические ссылки

1. Shirokii unifitsirovannyi klassifikator SEV i mezhdunarodnyi klassifikator SEV kul'turnykh vidov roda Phaseolus L. [The wideunified descriptor of the CMEA and the international descriptor of the CMEA of cultural species of the genus Phaseolus L.]. Leningrad:VIR; 1984. 37 p. Russian.
2. Goncalves–Vidigal MC, Cruz AS, Garcia A, Kami J, Vidigal Filho PS, Sousa LL, et al. Linkage mapping of the Phg–1 and Co–14 genes for resistance to angular leaf spot and anthracnose in the common bean cultivar AND277. Theoretical and Applied Genetics. 2011; 122(5):893–903. DOI: 10.1007/s00122–010–1496–1.
3. Awale H.S. et al. SQ4 SCAR marker linked to the Co–2 gene on B11 appears to be linked to the Ur 11f gene. Annu. Rept. Bean Improv. Coop. 2008; 51: 174–175.
4. Kelly J.D. et al. Tagging and mapping of genes and QTL and molecular marker–assisted selection for traits of economic importance in bean and cowpea. Field Crops Research. 2003. 82:135–154
5. Alzate–Marin AL, Menarim H, Chagas JM, Gonçalves de Barros E, Moreira MA. Identification of RAPD markers linked to Co–6 anthracnose resistance gene in common bean cultivar AB 136. Genetics and Molecular Biology. 2000; 23(3):633–637. DOI: 10.1590/s1415–47572000000300023.

# ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ НАСЕЛЕНИЯ ПТИЦ И ЕЕ СВЯЗЬ С СИНУРБИЗАЦИЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ПАМЯТНИКА ПРИРОДЫ РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗНАЧЕНИЯ «ДУБРАВА», МИНСК)

К. А. Федоринчик, В. В. Сахвон

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*karina22031999@mail.ru; sakhvon@gmail.com*

*науч. рук – В. В. Сахвон, канд. биол. наук, доц.*

Был проведен анализ изменения структуры населения гнездящихся птиц за период с 2015 по 2019 гг. на территории памятника природы республиканского значения «Дубрава» (Минск). Всего на данной территории зарегистрировано гнездование 47 видов птиц, из которых 21 вид гнезвился ежегодно. Было установлено, что за данный период времени произошло увеличение видового богатства гнездящихся птиц (с 30 (2015) до 38 (2019) видов) и общей плотности гнездования (с 8,53 до 13,39 пар/га). Появление новых видов птиц на гнездовании и увеличение плотности гнездования отдельных из видов связано с активным внедрением их на урбанизированные территории и их синурбизацией. Так, положительные тренды численности были выявлены для 15 видов птиц: *Erithacus rubecula*, *Turdus philomelos*, *T. pilaris*, *T. merula*, *Sylvia atricapilla*, *Parus major*, *Sturnus vulgaris*, *Cyanistes caeruleus*, *Periparus ater*, *Phylloscopus sibilatrix*, *P. collybita*, *Fringilla coelebs*, *Coccothraustes coccothraustes*, *Chloris chloris*, *Dendrocygna major*.

**Ключевые слова:** ассамблея гнездящихся птиц, плотность гнездования, численность, парк, урбанизированная территория, синурбизация.

## ВВЕДЕНИЕ

С ростом населения планеты наблюдается стремительное распространение территорий, занятых городами, что ведет к увеличению отрицательного воздействия на природные экосистемы, в первую очередь, снижению видового разнообразия животных, в том числе и птиц. Однако, несмотря на негативное влияние процесса урбанизации на большинство видов птиц, отдельные из них успешно адаптировались к жизни в городах. В новых для себя условиях урбанизированной среды они нашли массу преимуществ, в частности на городских территориях птицы испытывают значительно меньший пресс со стороны их естественных хищников, имеют доступ порой к неограниченным пищевым ресурсам в течении всего года, большому количеству укрытий и подходящих для гнездования мест [1]. Как следствие, такие виды смогли не только увеличиться в численности, но и расширить свои ареалы. К настоящему времени пятая часть (свыше 2000 видов) всех видов мировой орнитофауны обитает в городах [2]. Синурбизация и связанные с этим изменения в организации ассамблей гнездящихся птиц на урбанизированных территориях, в частности, городских парках, все еще остаются слабоизученными, при этом имеющиеся в литературе исследования большей своей ча-

стью относятся к территории западной и центральной Европы, где процесс синурбизации птиц начался сравнительно давно, у отдельных видов еще в 18–19 столетиях. В условиях Беларуси данные по формированию птиц городских зеленых насаждений единичны. В связи с этим целью данной работы стал анализ динамики структуры населения птиц ППРЗ «Дубрава».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выяснения особенностей организации населения гнездящихся птиц в условиях урбосреды в 2015–2019 гг. были проведены количественные учеты птиц на территории памятника природы республиканского значения «Дубрава» (Минск). «Дубрава», площадью около 24 га, располагается на юго-западной окраине г. Минска и представляет собой фрагмент естественного растительного комплекса подзоны широколиственно-еловых лесов, где основными лесообразующими породами являются дуб черешчатый (*Quercus robur*) и ель обыкновенная (*Picea abies*) со значительной примесью различных древесных экзотов [3]. Для количественного изучения населения птиц был использован принятый в орнитологии площадочный метод учета, который предполагает не менее 5-кратного посещения выбранной учетной территории в период гнездования птиц с третьей декады марта до второй половины июня. В ходе посещения учетной площадки регистрируются все отмеченные гнездящиеся пары птиц (по голосу и визуально) с последующим нанесением их гнездовых территорий на карту-схему. По результатам всех учетов составлялась общая карта с нанесенными на нее гнездовыми территориями птиц. Подсчет плотности гнездования того или иного вида проводился в количестве пар/га.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных исследований были получены данные о пространственном распределении и динамике структуры населения гнездящихся птиц на территории «Дубравы». Всего на данной территории зарегистрировано гнездование 47 видов птиц, из которых 21 вид гнезвился регулярно с 2015 по 2019 гг. Общая плотность гнездования была сравнительно высокой (с такими естественных лесов) и достигала 13,39 пар/га. Во все годы доминирующей экологической группой являлись виды подлесочного яруса и подроста (среднее значение их доли участия в населении составляет 59%). Участие в населении полу- и дуплогнездников, видов-кронников и видов, гнездящихся на земле, составило 22 %, 11 % и 8 % соответственно. При этом было зарегистрировано увеличение видового богатства птиц (с 30 до 38 видов) к 2019 г. Общая плотность гнездования также возросла с 8,53 до 13,39 пар/га.



Не отрицая влияния биотопических изменений, связанных с хозяйственной деятельностью и рекреационным использованием территории памятника природы, важнейшим фактором изменений в структуре гнездового населения птиц, на наш взгляд, выступила общая тенденция многих видов к синурбизации, ярким признаком которой выступает увеличение их численности. Так, положительные тренды численности были выявлены для 15 видов птиц (39,5 % всех видов, охваченных учетами), относящихся к различным экологическим группам, динамика их плотности гнездования отражена на рисунке.

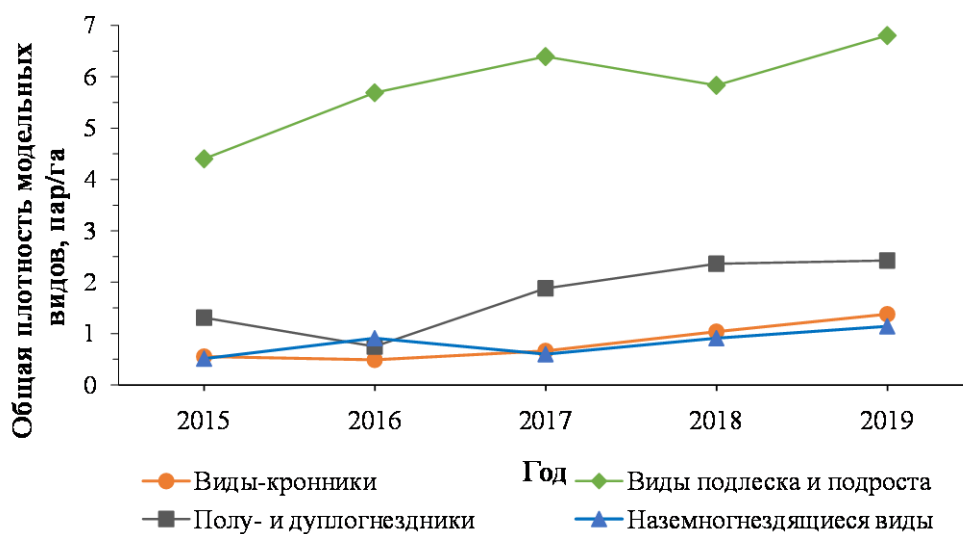


Рис. Динамика плотности гнездования модельных видов птиц на территории ППРЗ «Дубрава», Минск

Среди видов-кронников значительное возрастание численности произошло у вяхиря (*Columba palumbus*), численность которого с 2015 г. неизменно возрастала, увеличившись к 2019 г. в 1,5 раза. Плотность гнездования дубоноса (*Coccothraustes coccothraustes*) увеличилась в 6,3 раза с 0,1 (2015) до 0,63 пар/га (2019). Более, чем в 2 раза возросла численность дрозда-рябинника (*Turdus pilaris*) (с 4 до 11 гнездящихся пар).

Среди видов подлеска и подроста, продемонстрировавших положительную динамику, следует выделить зяблика (*Fringilla coelebs*), который являлся абсолютным доминантом во все годы исследований. С 2015 по 2019 год его численность увеличилась практически в 2 раза с 1,65 до 2,88 пар/га соответственно. Плотность гнездования зарянки (*Erithacus rubecula*) также возросла в 2 раза с 0,82 (2015) до 1,71 пар/га (2019). Схожую динамику продемонстрировала и славка черноголовая (*Sylvia atricapilla*). Черный (*Turdus merula*) и певчий дрозды (*Turdus philomelos*) яв-

лялись неизменными доминантами во все годы исследований. Плотность гнездования черного дрозда, который только в конце XX столетия начал осваивать территорию ППРЗ, увеличилась в 2 раза. Несмотря на небольшое снижение плотности в последние годы, динамику численности данного вида следует считать положительной.

Положительные тренды численности были установлены и для полу- и дуплогнездников. Так, плотность гнездования синицы большой (*Parus major*), которая с 2017 года являлась доминантом, возросла с 0,38 (2015) до 0,71 пар/га (2019), а ее пик наблюдался в 2018 году (1,08 пар/га). Доминантами из этой экологической группы птиц в разное время являлись скворец обыкновенный (*Sturnus vulgaris*), плотность которого к 2019 году возросла до 0,71 пар/га, а также лазоревка обыкновенная (*Cyanistes caeruleus*), плотность гнездования которой увеличилась почти в 4 раза с 0,2 (2015) до 0,75 пар/га (2019).

Пеночка-теньковка (*Phylloscopus collybita*) является единственным представителем наземногнездящихся птиц на данной территории, плотность гнездования которого возросла с 0,27 (2015) до 0,5 пар/га (2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, все зарегистрированные изменения в структуре видового разнообразия птиц на территории ППРЗ «Дубрава», произошедшие с момента первых количественных учетов, сводятся к увеличению видового богатства птиц, возрастанию общей плотности их гнездования и смене качественного состава гнездовой орнитофауны. Анализ динамики видового разнообразия птиц на территории памятника природы показал на ее значительное сходство с таковой ассамблей гнездящихся птиц европейских городских парков (при условии сходства биотопических параметров), где процессы синурбизации птиц начались сравнительно давно и к настоящему времени многие из таких видов адаптировались к обитанию на урбанизированных территориях.

## Библиографические ссылки

1. Shochat E. Credit or debit? Resource input changes population dynamics of city-slicker birds // *Oikos*. 2004. Vol. 106. P. 622–626. DOI: 10.1111/j.0030-1299.2004.13159.x.
2. Aronson M. F. J. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers // *Proc. R. Soc. B.: Biol. Sci.* 2014. Vol. 281, issue 1780. DOI: 10.1098/rspb.2013.3330.
3. Гирилович И. С., Джус М. А., Кочергина М. В. Памятник природы республиканского значения «Дубрава» // *Вестник БГУ Сер. 2. Химия, биология, география*. 2007. Вып. 1. С. 55–61.

# ГЕНЕРАЦИЯ *IN VITRO* КУЛЬТУРЫ *CHAENOMELES JAPONICA* (THUNB.) LINDL. EX SPACH

В.Д. Харькова

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*bio.harkova@bsu.by*;

науч.рук. – А. Ю. Шашко

Древесные растения являются важной частью человеческого существования. Большое количество деревьев и кустарников являются востребованными культурными, декоративными, лесообразующими растениями. Микрклональное размножение может стать способом значительно повысить пул доступных для высадки деревьев, при этом требуется значительно меньше места, чем при классических способах размножения. В настоящей работе целью является генерация культуры *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach *in vitro*. В ходе исследования наилучшие результаты показало введение в культуру молодых проростков айвы японской на среду Мурашиге и Скуга с добавлением 5 мг/л 6-бензиламинопурина.

**Ключевые слова:** культура *in vitro*, *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach, микрклональное размножение, биотехнология растений.

## ВВЕДЕНИЕ

Микрклональное размножение ценных сортов различных хозяйственно и медицински важных, а также декоративных древесных культур является одним из наиболее перспективных направлений в практической и фундаментальной биологии растений [1, 2], и на сегодняшний день, тема культивирования в условиях *in vitro* и тиражирования древесных растений представляет собой одну из актуальнейших биотехнологических задач.

На успех начальной стадии микрклонального размножения влияют различные параметры. Критические точки для эффективного создания культуры древесных растений *in vitro* связаны с эффективностью стерилизации собранных эксплантов и ингибированием их фенол-индуцированного потемнения [3]. В качестве эксплантов можно использовать меристемы или кончики побегов (спящие или активно растущие почки) из-за их генетической стабильности [4]. Часто используются фрагменты молодых побегов растения, несущих одну или несколько пазушных почек. При культивировании тканей растений *in vitro* на богатых питательными веществами средах, рост непатогенных в обычных условиях микроорганизмов ускоряется до такой степени, что они могут существенно нарушить или подавить развитие эксплантов [5]. Стандартные методы стерилизации эксплантов подразумевают погружение рас-

тительного материала в стерилизующие растворы на определенный промежуток времени с последующим многократным отмыванием стерильной дистиллированной водой. Потемнение эксплантатов и последующая возможная гибель ткани происходит под действием полифенолоксидазы и пероксидаз, вызывающих защитные реакции, вызванные ранением [6]. Для предотвращения или контроля потемнения чаще всего применяют добавление в исходную среду различных агентов, которые могут предотвращать образование фенольных соединений или удалять их из среды, такие как антиоксиданты, хелатообразующие материалы или адсорбенты [7].

Целью данной работы было произвести генерацию культуры *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach *in vitro*: подобрать оптимальную методику введения айвы японской в культуру, а именно тип экспланта, режим стерилизации, состав питательной среды.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На данный момент существует целый спектр методик генерации культуры *in vitro* для различных представителей семейства Розоцветные, теоретически применимых для *Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach, или айвы японской. Среди них в качестве эксплантов наиболее часто используются молодые проростки и листовые почки, реже семена и изолированные зародыши.

В первом варианте для введения в культуру были использованы семена *Chaenomeles japonica* урожая 2019 года, прошедшие стратификацию при 4°C в течение 30 сут. Для введения в культуру использовалась методика, описанная в литературе для сходных культур. Стерилизация производилась 0,1% раствором сулемы в течение 7 минут, после чего семена высаживались на среду Мурашиге и Скуга с добавлением 0,5 мг/л 6-бензиламинопурина в асептических условиях ламинарного бокса.

В следующем варианте были использованы молодые проростки айвы японской, полученные из семян после 30 сут стратификации (4°C, темнота) и 30 сут культивирования на ростовых стеллажах. В качестве эксплантов использовались участки побега в 1–2 верхних междоузлия. Непосредственно перед введением в культуру свежесрезанные проростки помещались в химических стакан и промывались проточной водой 10–15 минут. Стерилизация эксплантов проводилась в ламинар-боксе в следующей последовательности: 1) 96% этанол 1 с; 2) отмыв стерильной дистиллированной водой 5 мин; 3) 0,1% раствор сулемы 5 или 7 минут; 4) отмыв 5 мин. Затем экспланты переносились в культивационные сосуды на питательную среду, содержащую 100% микро- и макро-солей

по прописи Мурашиге и Скуга с добавлением 30 г/л сахарозы и 9 г/л агар–агара. В качестве дополнительного компонента тестировались 0,5 мг/л 6–бензиламинопурина (стимулятор побегообразования) и 1 г/л активированного угля (адсорбент фенольных соединений).

Кроме того, тестировалась возможность генерации асептической культуры айвы японской из листовых почек растений открытого грунта или прошедших 14 сут адаптацию к лабораторным условиям. Режим стерилизации и среда культивирования были аналогичны предыдущему варианту.

Культивирование всех вариантов в почвенных субстратах и микроклональных сосудах осуществлялось на ростовых стеллажах в условиях  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , относительной влажности воздуха  $75 \pm 5\%$  и световом режиме 16 ч свет / 8 ч темнота.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе работы было апробировано несколько методов генерации асептической культуры айвы японской. При использовании в качестве посадочного материала семян айвы японской 20% семян не поддались стерилизации и остались контаминированными; 8% семян проросли, но под семенной кожурой оказались поражены инфекцией; 72% семян простерилизовались, но не взошли.

При использовании в качестве эксплантов молодых проростков, изначально проводился подбор оптимальных условий высадки семян в почву для достижения максимального уровня всхожести. Как видно по представленным в таблице данным, стратификация является обязательным элементом подготовки семян к дальнейшей посадке в грунт, а наиболее эффективным вариантом является высадка семян в субстрат из торфа верхового раскисленного и вермикулита (соотношение 1:1 по объему) с последующим помещением на 30 сут стратификацию в темноте при  $4^\circ\text{C}$ .

*Таблица*

**Всхожесть семян айвы японской при различных режимах стратификации**

	Торф + вермикулит, % взшедших семян	Песок + вермикулит, % взшедших семян
Без стратификации	–	–
Стратификация в субстрате	52,5	35
Стратификация без субстрата	25	16,3

По результатам эксперимента по введению проростков в культуру можно утверждать, что стерилизации в 96% этаноле в течение 1 секунды и в 0,1% растворе сулемы в течение 5 минут достаточно для молодых

проростков айвы японской, полученных из семян в лабораторных условиях. Среда МС с углем не подходит для введения в культуру айвы – экспланты не жизнеспособны, а добавление бензиламинопурина способствует эффективной генерации культуры. Кроме того, разницы по эффективности введения в культуру между проростками с разных типов почв обнаружено не было.

В результате использования в качестве эксплантов листовых почек было показано, что в случае с почками растения из открытого грунта 20% эксплантов не простерилизовались, остальные не жизнеспособны. Экспланты, адаптированные к условиям лаборатории, прижились, наблюдается их рост.

По результатам работы наиболее эффективным оказалось введение в культуру молодых проростков айвы японской на среду Мурашиге и Скуга с добавлением 30 г/л сахарозы, 9 г/л агара и 5 мг/л 6-бензиламинопурина. Разницы между режимами стерилизации отмечено не было.

#### Библиографические ссылки

1. *Dobrąnszki J., da Silva J. A. T.* Micropropagation of apple – a review // *Biotechnology Advances*. 2010. Vol. 28 №. 4. P. 462–488. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.02.008.
2. *Beck S. L., Dunlop R. W.* Micropropagation of the *Acacia* species—a review // *In Vitro Cellular & Developmental Biology–Plant*. 2001. Vol. 37, №. 5. P. 531–538. DOI: 10.1079/IVP2001220.
3. *Pérez-Tornero O., Burgos L.* Apricot micropropagation // *Protocols for micropropagation of woody trees and fruits*. Dordrecht: Springer, 2007. P.267–278.
4. *Kaushal N. et al.* In vitro clonal multiplication of an apple rootstock by culture of shoot apices and axillary buds. 2005. Vol. 43, № 06. P. 561–565.
5. *Giladi I., Altman A., Goren R.* A method for aseptic culture of bud explants from citrus trees // *Scientia Horticulturae*. 1979. Vol. 10, №. 4. P. 357–362. DOI: 10.1016/0304-4238(79)90095-5.
6. *Pan M. J., Van Staden J.* The use of charcoal in *in vitro* culture—A review // *Plant growth regulation*. 1998. Vol. 26, №. 3. P. 155–163. DOI: 10.1023/A:1006119015972.
7. *Sharma M., Modgil M., Sharma D. R.* Successful propagation *in vitro* of apple rootstock MM106 and influence of phloroglucinol. 2000. Vol.38, № 12. 1236–1240.

# ПОИСК ПРИРОДНЫХ ИЗОЛЯТОВ СПОРООБРАЗУЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ С ВЫСОКОЙ ЭКЗОФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И СПОСОБНОСТЬЮ К РОСТУ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УСЛОВИЙ

**М.Ю. Шонина, И.Э. Сенковская**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*Shonina@bsu.by, senkovskaya1998@mail.ru*

*науч. рук. – А. В. Лагодич, канд. биол. наук, доц.*

*LagodichAV@bsu.by*

Были получены изоляты спорообразующих грам положительных микроорганизмов из природного источника – Удрянское водохранилище, вблизи гп Радошковичи, Молодеченского района. Данные изоляты обладали характерной для представителей рода *Bacillus* морфологией. Для них была подтверждена принадлежность к роду *Bacillus* с помощью рестрикционного анализа амплифицированного гена 16S РНК.

**Ключевые слова:** *Bacillus*; протеазы; протеолитическая активность; амплификация; рестрикция; 16SPHK.

Ферменты протеазы используются в пищевой, кожевенной, текстильной промышленности, а также в производстве детергентов и фармацевтических препаратов, крахмала, текстиля, кожи, бумаги и продуктов гигиены [1]. В связи с широким применением протеаз возникает огромный спрос на данные ферменты. [2].

Одной из задач является получение протеаз, обладающих высокой стабильностью и активностью в широком диапазоне температур, так как многие ткани не выдерживают высоких температур, а в пищевой промышленности применяются ферменты активные как при высоких, так и при низких температурах [3].

В работе использовали изоляты микроорганизмов, полученных из различных природных источников. В данном обзоре проанализированы изоляты, полученные из природного источника Удрянского водохранилища, вблизи гп Радошковичи, Молодеченского района. Бактериальные культуры выращивали в жидкой и плотной полноценной питательной среде. Плотные среды содержали 1,5% агара. У полученных изолятов была определена протеолитическая активность (среды с 12 % содержанием желатины и с содержанием 1% обезжиренного молока.).

Электрофоретический анализ ДНК осуществляли общепринятыми методами, приведенными в руководстве [5]. Для визуализации фрагментов ДНК использовали бромистый этидий в конечной концентрации 0,5 мкг/мл. Для нанесения проб использовали буфер следующего состава:

40%–ная сахароза, 0,25%–ный бромфеноловый синий. Гель фотографировали, используя систему документации InfinityST5 («VilberLourmat»).

В качестве реперной ДНК при определении размеров фрагментов использовали: DNA LadderMix и GeneRuler 1kbDNALadder (производства ThermoScientific).

Из перспективных изолятов были получены препараты хромосомной ДНК и использованы в качестве матрицы в ПЦР для идентификации по 16S РНК. Продукты амплификации должны иметь размер около 1500 бп. Для идентификации выделенных изолятов как *Bacillus subtilis* использовалась рестриктаза Cfr421 (SacII). В качестве объекта сравнения использовался ПЦР продукт 16S РНК *Bacillus subtilis* 168.

При постановке ПЦР использовали реактивы производства Праймтех (Беларусь) и ThermoScientific. ПЦР проводилось с использованием универсальных праймеров под прокариотический ген 16S РНК – 8F (5' – AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG –3') и 1492R (5' – GGTТАССТТГТТАСГАСТТ –3') (производства Праймтех (Беларусь)) [4]. Программа ПЦР для 16SPНК: 95°C – 10 минут (1 цикл); 95°C – 30 сек, 54°C – 30 сек, 68°C – 2 минуты (30 циклов); 68°C – 10 минут (1 цикл).

Были предсказаны рестрикционные профили последовательности 16S РНК, характерные для различных представителей рода *Bacillus*. Последовательности генов 16S РНК были извлечены из базы данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). Предсказанные рестрикционные профили рода *Bacillus* были разделены на две группы. Первая группа: при рестрикционном анализе образуются фрагменты размером около 840 бп, 290 бп, 230 бп и 83 бп (*Bacillus subtilis subsp. subtilis str. 168*, *Bacillus coagulans DSM 1 = ATCC 7050*, *Bacillus amyloliquefaciens DSM 7 = ATCC 23350*). Вторая группа: при рестрикционном анализе образуются фрагменты размером около 840 бп, 527 бп, и 83 бп (*Bacillus mycoides*, *Bacillus anthracis str. 'AmesAncestor'*) (рисунок 1).

Были получены продукты амплификации, соответствующие ожидаемым размерам и проверены с помощью рестрикционного анализа (рисунки 2, 3).

Как видно из рисунков 1, 2 и 3 всех проанализированных изолятов, на основании рестрикционного профиля полученного с использованием рестриктазы Cfr421 (SacII), можно отнести к представителям рода *Bacillus*. Но, как видно из рисунка 1 видовая идентификация с использованием рестриктазы Cfr421 (SacII) затруднена.

На основании полученных рестрикционных профилей невозможно с полной достоверностью определить к какому представителю рода *Bacillus* относятся исследуемые природные изоляты. Для уточнения систематического положения перспективных кандидатов целесообразно исполь-



зовать идентификацию на основе секвенирования имеющихся последовательностей генов 16S РНК.

Таблица 1

**Протеолитическая активность изолятов, выделенных из природного источника Удрянское водохранилище вблизи гп Радошковичи, Молодеченский район**

Место изъятия пробы	Номер изолята	Ферментативная активность	
		Расщепление казеина	Расщепление желатина
Почва возле удрянского водохранилища Радошковичи	3	–	–
	4	2	1
	5	2	3
	6	3	3
Вода удрянского водохранилища Радошковичи	2	2	1
	3	1	–
	6	2	2
	12	3	3

Примечание. Желатин, казеин: «3»–высокая протеолитическая активность; «2»–средняя протеолитическая активность ; « 1» –слабая протеолитическая активность; « – » протеолитическая активность отсутствует.

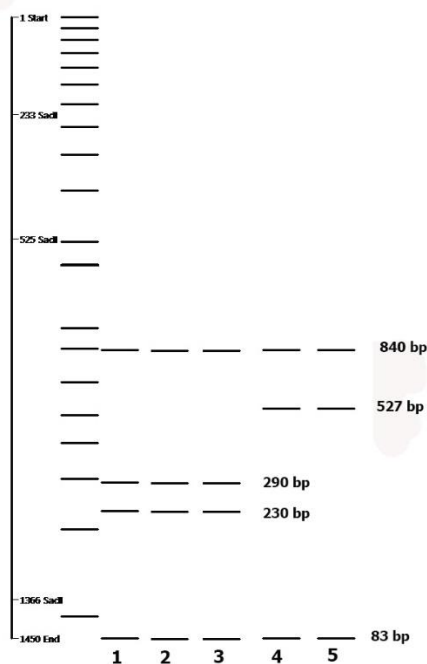


Рис. 1. Ожидаемый рестрикционный профиль продуктов амплификации при рестрикции SacII (Cfr42I) у различных представителей рода *Bacillus*  
 1 – *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* str. 168; 2 – *Bacillus coagulans* DSM 1 = ATCC 7050;  
 3 – *Bacillus amyloliquefaciens* DSM 7 = ATCC 23350; 4 – *Bacillus mycoides*;  
 5 – *Bacillus anthracis* str. 'Ames Ancestor'

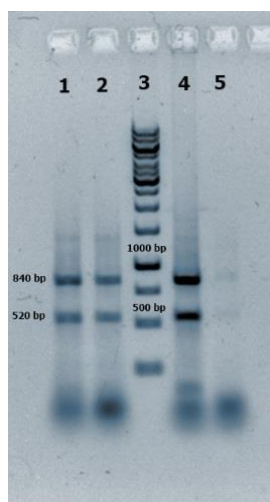


Рис. 2. Электрофореграмма рестрикции гена 16S РНК по рестриктазе Cfr421 (SacII)

- 1 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба № 5, почва возле Удрянского водохранилища);
- 2 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба № 6, почва возле Удрянского водохранилища);
- 3 – GeneRuler 1kb DNA Ladder
- 4 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба №6, вода Удрянского водохранилища)
- 5 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба №12, вода Удрянского водохранилища)

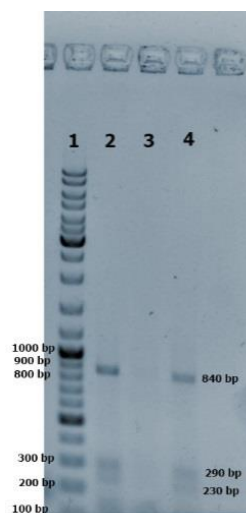


Рис. 3. Электрофореграмма рестрикции гена 16S РНК по рестриктазе Cfr421 (SacII)

- 1 – GeneRuler DNA Ladder Mix
- 2 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба № 4, почва возле Удрянского водохранилища)
- 3 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба №2, вода Удрянского водохранилища)
- 4 – Рестрикция продукта ПЦР 16S РНК (проба №3, вода Удрянского водохранилища)

### Библиографические ссылки

1. Sathiya G Production of protease from *Bacillus subtilis* and its application in leather making process / GSathiya – International Journal of Research in Biotechnology and Biochemistry, Received 09 January 2013; accepted 20 February 2013.
2. Oyeleke S.B. Production of protease and amylase from *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger* using *Parkia biglobosa* (Africa Locust Beans) as substrate in solid state fermentation / S.B. Oyeleke, O.A. Oyewole and E.C. Egwim – Advances in Life Sciences, vol. 1, no. 2, pp. 49–53, 2011.
3. Балабан Н.П., Шарипова М.Р. Практическое применение бактериальных протеаз / Балабан Н.П., Н.П. Шарипова – Ученые записки казанского университета, 2011. – Том 133, кн. 2.
4. Galkiewicz J. P. Cross-Kingdom Amplification Using *Bacteria*-Specific Primers: Complications for Studies of Coral Microbial Ecology / J. P. Galkiewicz, Ch. A. Kellogg – Appl Environ Microbiol, 2008 Dec; 74(24): 7828–7831.
5. Sambrook J. Molecular cloning: a laboratory manual / J. Sambrook, E. Fritsch, T. Maniatis. – 2nd ed. – New York: Cold Spring Harbor Publications, 1989. – 468 p.

### ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПНОГО Н-D ЭФФЕКТА НА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГЛИЦЕРИНА

**Д. И. Бобров**

*Белорусский государственный университет, химический факультет;  
dmitrybobrovig@gmail.com;*

*науч. рук. – О. И. Шадыро, д-р. хим. наук, проф., Р. Л. Свердлов, канд.  
хим. наук, доц.*

Было проведено сравнение радиационно-химических выходов гидроксиацетона (ГА), глицеринового альдегида (ГлиА), дигидроксиацетона (ДГА) и 3-гидроксипропаналя (ЗГП) для  $\gamma$ -радиолиза деаэрированных 1,0 М и 0,10 М водных растворов глицерина и глицерина-2-d1 (ДГ). Установлено, что важную роль в образовании ГА и ЗГП играют цепные процессы с участием углерод-центрированных радикалов. Впервые показано, что введение дейтерия в положение С-2 глицерина подавляет протекание радикальных реакций у данного атома углерода. Так, для 1,0 М растворов ДГ выход ГА снижается в 4,3, а для 0,10 М – в 2,5 раза по сравнению с растворами глицерина. Данная работа показывает перспективность исследования влияния атома дейтерия в остатке глицерина на устойчивость природных липидов к радикальным превращениям, что может иметь терапевтическое значение при лечении ряда заболеваний.

**Ключевые слова:**  $\gamma$ -радиолиз, глицерин, глицерин-2-d1, изотопный Н-D эффект.

#### ВВЕДЕНИЕ

Все больше и больше работ подтверждают, что свободнорадикальные превращения в клетке играют существенную роль в развитии ряда серьезных патологий. Наиболее важными с эпидемиологической точки зрения являются атеросклероз [1], инфаркт миокарда [2], онкологические заболевания [3], болезнь Альцгеймера [4] и другие нейродегенеративные заболевания [5], при которых наблюдается повреждение липидов.

Также было показано, что гидроксилсодержащие глицерофосфолипиды (ГГФЛ), в том числе и кардиолипиды (КЛ), основной липид мембран митохондрий, вступают в  $\cdot$ ОН-индуцированные процессы деструкции, нехарактерные для остальных липидов [6].

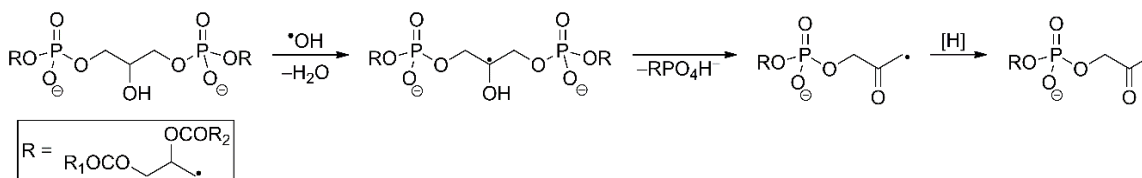


Рис. 1. Радикальные превращения КЛ [6]

Особый интерес к радикальным превращениям КЛ (рис. 1) вызывает тот факт, что их основной стабильный продукт, фосфатидная кислота, регулирует участие ряда белков в контроле прогрессии клеточного цикла и роста клеток [6]. Избыточные радикальные превращения ГГФЛ и КЛ, скорее всего, играют определенную роль в развитии ряда заболеваний, в связи с чем подавление этих процессов может иметь терапевтический эффект.

Потенциально введение дейтерированных аналогов биомолекул в организм не повлияет на их биологические функции, но сможет подавить побочные радикальные процессы, приводящие к развитию патологий, за счет наличия более прочных связей С–D. Теоретически, введение дейтерия в остаток глицерина способно замедлить радикальные превращения, как минимум, ГГФЛ и КЛ, а возможно и других липидов. Простейшей модельной системой для изучения влияния дейтерия на радикальные превращения ГГФЛ и КЛ является чистый глицерин и его дейтерированный аналог, глицерин-2-d<sub>1</sub> (ДГ).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все растворы, включая как системы для радиолиза, так и стандарты для хроматографического определения, были приготовлены путем взвешивания точных навесок (чистота не менее 95%) на аналитических весах (точность до 0,1 мг) с последующим разбавлением в мерной посуде (2 класс точности) 50 мМ (КН<sub>2</sub>РO<sub>4</sub> + Na<sub>2</sub>НРO<sub>4</sub>) фосфатным буфером (рН 7,10 ± 0,10).

*Радиолиз.* Инициирование радикальных процессов – γ-излучением изотопа <sup>60</sup>Со (установка МРХ-γ-25М). Мощность дозы – 0,105 ± 0,003 Гр/с. Интервал поглощенных доз: 0,0 (контроль) – 756 Гр (использовались партии, состоящие из 5 ампул с ~400 мкл раствора глицерина или глицерина-2-d<sub>1</sub> с концентрацией 1,0 М или 0,10 М, в которой каждая ампула облучалась разное время: 0, 30, 60, 90 и 120 мин). Удаление кислорода из растворов осуществлялось продуванием высокочистого аргона (99,993%) в течение 50 мин., с последующей запайкой ампул.

*Методика дериватизации.* К исследуемому раствору (облученный глицерин, растворы стандартов) объемом 200 мкл прибавляли 200 мкл

раствора 2,4-динитрофенилгидразина (ДНФГ) в метаноле ( $C_{\text{ДНФГ}} = 1,5 \text{ мМ}$ ,  $C(\text{H}^+) = 0,7 \text{ М}$ , 4,7%  $\text{H}_2\text{O}$  по объему), интенсивно перемешивали и выдерживали перед анализом пробы в течение 15 минут в темном месте во избежание фоторазложения продуктов дериватизации. Большинство производных карбонильных соединений с ДНФГ имеют максимум поглощения в диапазоне 350 – 390 нм, в связи с чем определение площадей пиков соответствующих гидразонов проводилось на длине волны  $365 \pm 7 \text{ нм}$  [7, 8].

*Количественный анализ.* Для проведения количественного анализа использовался жидкостный хроматограф Shimadzu LCMS-2020 с колонкой VP-ODS (150 мм, в. д. 4,6 мм, диаметр частиц 4,6 мм, диаметр пор 12 нм) при температуре 40 °С и скорости потока 0,8 мл/мин. Градиентный режим элюирования, смесь метанол-вода (линейное увеличение доли метанола от 40% до 60% в течение 10 мин, 60% MeOH с 10-ой по 26-ю мин). Объем задаваемой пробы – 3 мкл.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Механизм образования основных продуктов радиолиза водных растворов глицерина приведен на рис. 2 и рис. 4.

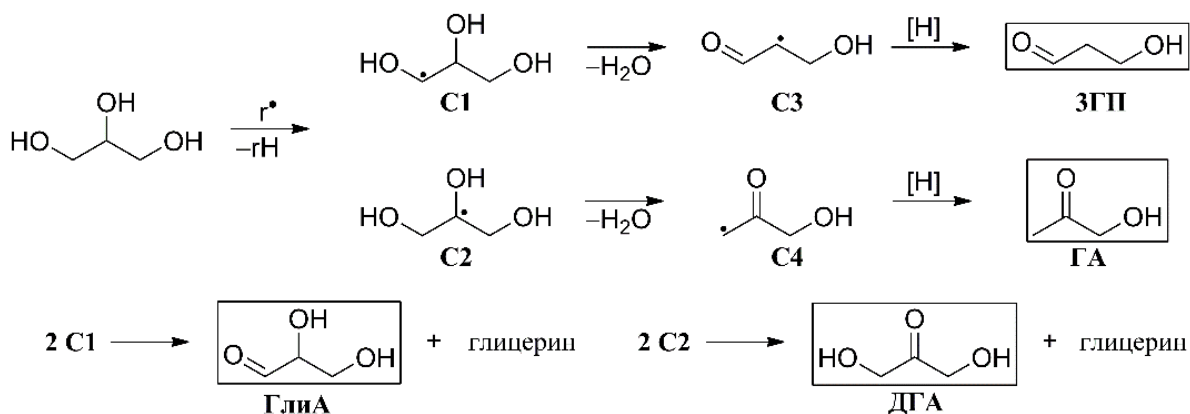


Рис.2. Механизм образования основных продуктов радиолиза растворов глицерина

Помимо процессов, изображенных на рис. 1, протекают реакции рекомбинации радикалов C1 – C4 друг с другом.

Результаты радиационно-химического эксперимента (усредненные данные трех независимых экспериментов) приведены в таблице ниже.

Таблица 1

Данные по радиационно-химическим выходам (молекул/100 эВ) основных продуктов радиолитического распада 1,0 М и 0,10 М растворов обычного (Н) и дейтерированного (D) глицерина.

Вещество	1,0 М глицерин		0,10 М глицерин	
	Н	D	Н	D
ГА	2,129 ± 0,390	0,497 ± 0,112	0,795 ± 0,137	0,313 ± 0,058
ДГА + ГлиА	0,559 ± 0,095	0,537 ± 0,066	0,359 ± 0,054	0,383 ± 0,049
ЗГП	1,728 ± 0,724	3,063 ± 0,716	3,016 ± 0,163	5,071 ± 0,227
ДГА	–	–	0,0374 ± 0,0076	0,0410 ± 0,0052
ГлиА	–	–	0,322 ± 0,054	0,342 ± 0,049

Для объяснения полученных результатов была выдвинута гипотеза (рис. 3), суть которой состоит в том, что радикалы Н· и ·ОН взаимодействуют примерно с одинаковой скоростью как с глицерином, так и с ДГ ввиду своей высокой активности, в то время как углерод-центрированные радикалы (УЦР) медленнее отщепляют водород от связи С–D, чем от связи С–H.

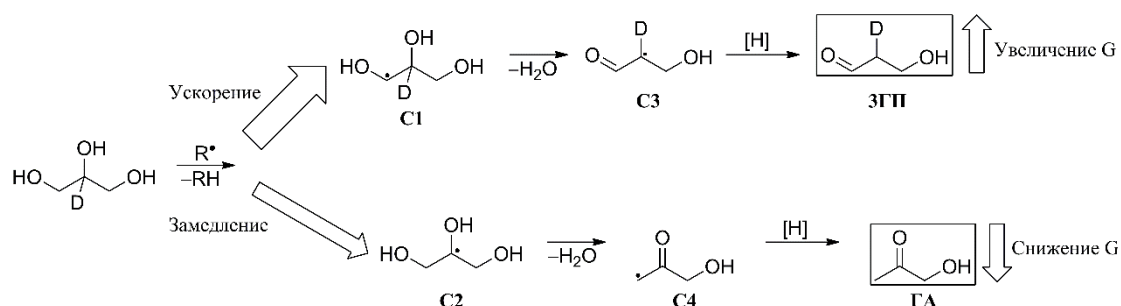


Рис.3. Изменение в скорости превращений при введении дейтерия (R· – УЦР).

Значение  $G(\text{ГА}) > 2$  для 1,0 М раствора и  $G(\text{ЗГП}) > 2$  для 1,0 М и 0,10 М растворов глицерина свидетельствуют о протекании цепных процессов в ходе радиолитического распада (рис. 4).

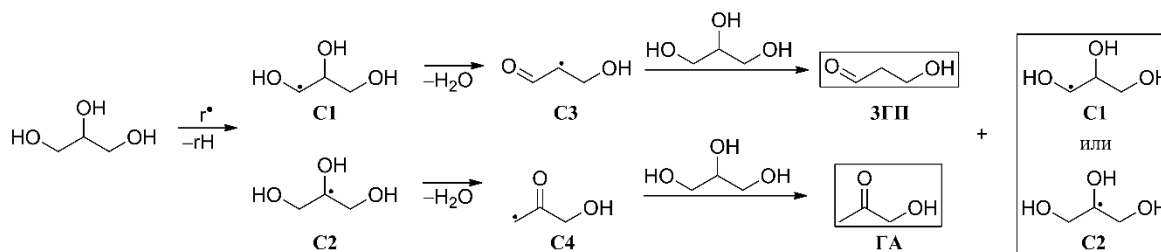


Рис.4. Цепные процессы в ходе радиолитического распада водных растворов глицерина

При переходе к 0,10 М раствору выход ГА ожидаемо снижается из-за уменьшения концентрации субстрата, однако, соотношение величин  $G(\text{ГА})_{\text{глицерин}} : G(\text{ГА})_{\text{ДГ}}$  для 1,0 М раствора составляет 4,3, в то время как для 0,10 М раствора оно равно 2,5. Если бы УЦР не участвовали в цепном процессе, то соотношение  $G(\text{ГА})_{\text{глицерин}} : G(\text{ГА})_{\text{ДГ}}$  было бы одинаковым в случае 1,0 М и 0,10 М растворов.

Снижение величины  $G(\text{ГА})$  при радиолизе растворов ДГ с концентрацией 1,0 М (4,3 раза) и 0,10 М (2,5 раза) по сравнению с растворами глицерина аналогичной концентрации, а также подавление цепных процессов в случае 1,0 М раствора говорит о том, что дейтерированные атомы углерода менее склонны к участию в радикальных реакциях. Можно сделать вывод, что константы скоростей реакций УЦР по положению С-2 ощутимо меньше для ДГ, чем для глицерина.

Утилизация радикалов С1 – С4 путем отщепления атома дейтерия от положения С-2 замедлена в случае растворов ДГ, что ведет к более высокой их стационарной концентрации и, как следствие, ускорению остальных путей утилизации этих радикалов (в том числе и взаимодействие по положению С-1). В связи с этим выход ЗГП в случае радиолиза растворов ДГ по сравнению с глицерином увеличивается.

Увеличение выхода ЗГП в 0,10 М растворе по сравнению с 1,0 М можно объяснить тем, что в разбавленном растворе процессы диспропорционирования и рекомбинации радикалов С1 друг с другом (бимолекулярные реакции) протекают значительно медленнее, чем в концентрированном, в результате чего больше радикалов С1 успевает превратиться в С3, что приводит к увеличению  $G(\text{ЗГП})$  ( $\text{С1} \rightarrow \text{С3} \rightarrow \text{ЗГП}$ ).

Наличие атома дейтерия в положении С-2 ДГ не влияет на величину  $G(\text{ГлиА})$  и  $G(\text{ДГА})$ , что говорит о высокой склонности радикалов С1 и С2 к отщеплению воды с образованием С3 и С4.

На основании экспериментальных данных можно предположить, что липиды и лизолипиды, содержащие атом (-ы) дейтерия в остатках глицерина, будут более устойчивы к воздействию радикальных процессов, протекающих *in vivo*, что может иметь серьезное биологическое значение. Например, ожидается, что превращения ГГФЛ и КЛ (рис. 1), содержащих атом дейтерия в положении С-2 остатка глицерина, будут значительно замедлены.

#### Библиографические ссылки

1. *Bonomini F. [et al.]. Atherosclerosis and oxidative stress // Histology and histopathology. 2008. Vol. 23, № 3. P. 381–390. DOI: 10.14670/HH-23.381.*
2. *Ramond A. [et al.]. Oxidative stress mediates cardiac infarction aggravation induced by intermittent hypoxia // Fundamental & Clinical Pharmacology. 2013. Vol. 27, № 3. P. 252–261. DOI: 10.1111/j.1472-8206.2011.01015.x.*

3. *Halliwell B.* Oxidative stress and cancer: have we moved forward? // *Biochem J.* 2007. Vol. 401, № 1. P. 1–11. DOI: 10.1042/BJ20061131.
4. *Pohanka, M.* Alzheimer's Disease and Oxidative Stress: A Review // *Current Medicinal Chemistry.* 2014. Vol. 21, № 3. P. 356–364(9). DOI: 10.2174/09298673113206660258.
5. *Farooqui A. A., Horrocks L. A., Farooqui. T.* Glycerophospholipids in brain: their metabolism, incorporation into membranes, functions, and involvement in neurological disorders // *Chemistry and Physics of Lipids.* 2000. Vol. 106, № 1. P. 1–29. DOI: 10.1016/S0009-3084(00)00128-6.
6. *Shadyro O., Samovich S., Edimecheva I.* Free-radical and biochemical reactions involving polar part of glycerophospholipids // *Free Radical Biology and Medicine.* 2019. Vol. 144. P. 6–15. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.02.033.
7. *Shigehisa Uchiyama, Yohei Inaba, Naoki Kunugita.* Derivatization of carbonyl compounds with 2,4-dinitrophenylhydrazine and their subsequent determination by high-performance liquid chromatography // *Journal of Chromatography B.* 2011. Vol. 879, № 17–18. P. 1282–1289. DOI: 10.1016/j.jchromb.2010.09.028.
8. *Zwiener C., Glauner T., Frimmel F.* Method optimization for the determination of carbonyl compounds in disinfected water by DNPH derivatization and LC–ESI–MS–MS // *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* 2002. Vol. 372. P. 615–621. DOI: 10.1007/s00216-002-1233-y.



## СИНТЕЗ C<sup>1</sup>-C<sup>8</sup> СТРОИТЕЛЬНОГО БЛОКА АМФИДИНОЛИДОВ С И F

**Варанчук В.В.**

*Белорусский государственный университет, Минск.*

*varanchukv@gmail.com.*

*науч. рук. – И. В. Минеева., канд. хим. наук, доц.*

**Минеева И.В.**

*Белорусский государственный университет, Минск.*

*i.mineyeva@yandex.ru.*

*науч. консульт. – В. М. Шкуматов, д-р. биол. наук, чл.-кор. НАН РБ*

Поиск и развитие новых методов синтеза сложных молекул природного происхождения является важной задачей органической химии. Реакции асимметрического аллилирования карбонильных соединений зарекомендовали себя как надежный инструмент в решении данной задачи. Высокая степень энантио- и диастереоселективности, разнообразие реагентов, способность получения разнообразных стереодиад и триад, функционализированные продукты реакции делают этот метод весьма распространенным и востребованным в органическом синтезе. Цель нашей работы заключается в том, чтобы показать возможность использования метил 3-бромметил-3-бутаноата как исходного реагента при получении соответствующего аллилметаллического производного с его последующим вовлечением в реакции асимметрического аллилирования для синтеза ключевого строительного блока амфидинолида С и F.

**Ключевые слова:** диастереоселективное аллилирование; амфидинолид, динофлагеллят, 2-замещенный аллилбромид, внутримолекулярная циклизация оксо-Михаэля.

В 1988 году группа ученых под руководством Кобаяши в ходе исследований биологически активных веществ, источниками которых являлись морские организмы, успешно культивировала динофлагеллят *Amphidinium sp.*, симбиотически связанный и выделенный из клеток Окинавского плоского червя *Amphiscolops sp.* [1]. Исследование экстракта культивированного динофлагеллята привело к выделению амфидинолида С (**1**) в виде бесцветного аморфного вещества с крайне малым выходом (0,0015 % вещества во влажном состоянии линии Y-5), а содержание амфидинолида F (**2**) еще ниже (0,0006% линии Y-56) (рисунок 1) [1]. Эти молекулы показали высокую цитотоксичность против солидных опухолей. В частности, амфидинолид С является одним из самых мощных цитотоксических агентов этого семейства (IC<sub>50</sub> = 5,8 и 4,6 нг/мл против мышинной лимфомы и клеток плоскоклеточного рака человека, соответственно). Амфидинолид F (**2**), который различается только по длине и функционализации боковой цепей от общего 25-членного кольца макролактона, оказывается примерно в 1000 раз менее активным. Та-

кие нечетные циклы являются редкими и их биосинтетических происхождение является неочевидным, что в совокупности с высокими токсическими свойствами привлекли внимание научного сообщества по синтезу амфинолидов С, F и их аналогов [2].

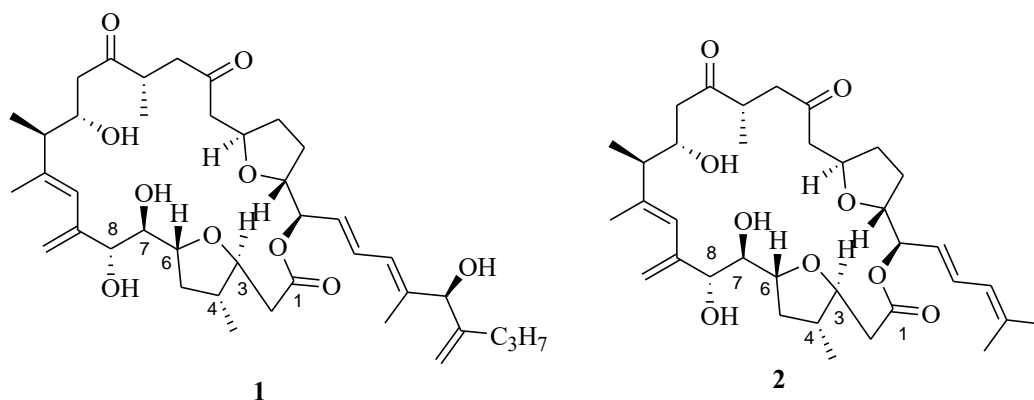


Рис. 1.

Ранее в нашей исследовательской группе (*R*)-2,3-О-циклогексилиденглицеральдегид (**3**) был впервые вовлечен в реакцию аллилирования по Барбье метил 3-(бромметил)бут-3-еноатом (**4**), 2-замещенным функционализированным аллилбромидом, полученным через ключевые циклопропанольные интермедиаты из этилового эфира 3,3-диэтоксипропионовой кислоты, при действии различных аллилирующих агентов [3]. Была продемонстрирована возможность применения полученного таким образом гомоаллильного спирта **5** в синтезе строительных блоков макроциклических противоопухолевых препаратов лаулималидов и их с синтетических аналогов (схема 1) [4].

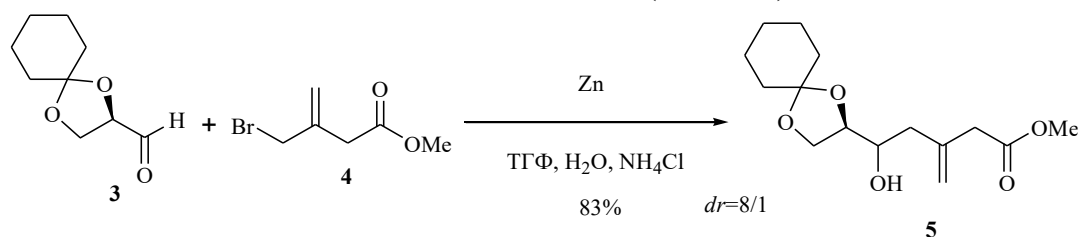


Схема 1.

В данной работе мы решили применить соединение **5** (в виде смеси диастереомеров) в синтезе C<sup>1</sup>-C<sup>8</sup> ключевого строительного блока амфинолидов С и F.

После лактонизации гидроксиэфира **5** при действии карбоната натрия в метаноле была получена смесь диастереомерных лактонов **6** и **7** в соотношении 1/8, которые без труда были разделены хроматографически. Структура полученных соединений была подтверждена спектроскопией ЯМР и экспериментом NOESY.

В *син*-лактоне **7** было проведено высоко диастереоселективное восстановление кратной связи и получен насыщенный лактон **8**, который был раскрыт в гидроксиэфир при действии триэтиламина в метаноле с последующей постановкой защитной силильной группы. После этого в эфире **9** восстановили сложноэфирную группу в спиртовую. Выбор такого сочетания реагентов обусловлен присутствием в структуре *трет*-бутилдиметилсилильной защитной группы, которая удаляется, если реакцию проводить стандартным методом с использованием алюмогидрида лития, так как ему сопутствуют следовые количества хлорид ионов (схема 2).

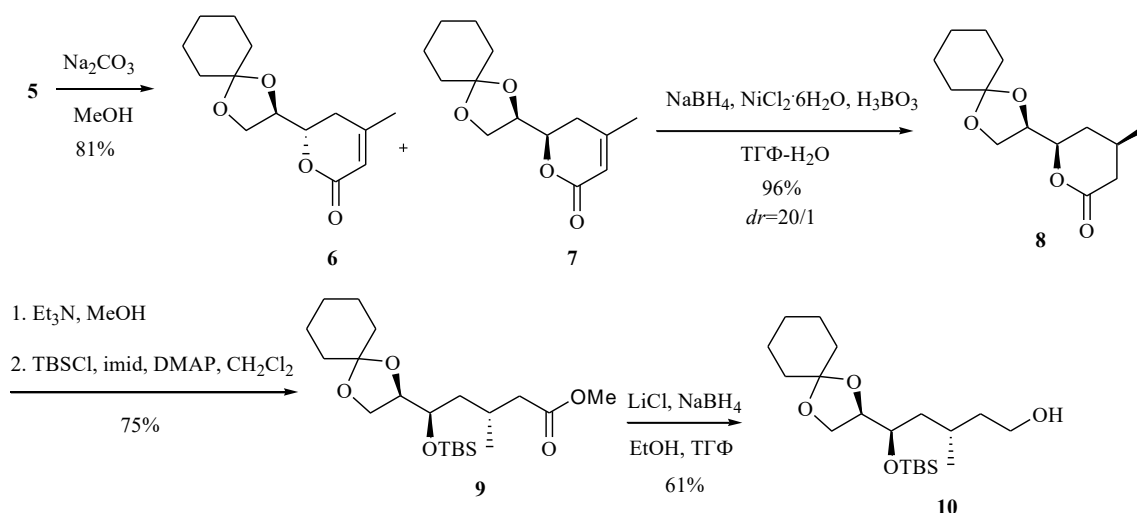


Схема 2.

Основным недостатком данной схемы являлся относительно небольшой выход первичного спирта **10**. В связи с этим, для увеличения выхода была опробована альтернативная методика, в которой восстановление лактона **8** осуществлялось при действии алюмогидрида лития. В полученном диоле **11** обе спиртовые группы были защищены *трет*-бутилдиметилсилильной защитой. Селективное удаление защитной группы в эфире **12** позволило получить первичный спирт **10** (схема 3). В соответствии со схемой 3 выход спирта **10** значительно выше (46 % по схеме 2 и 70 % по схеме 3).

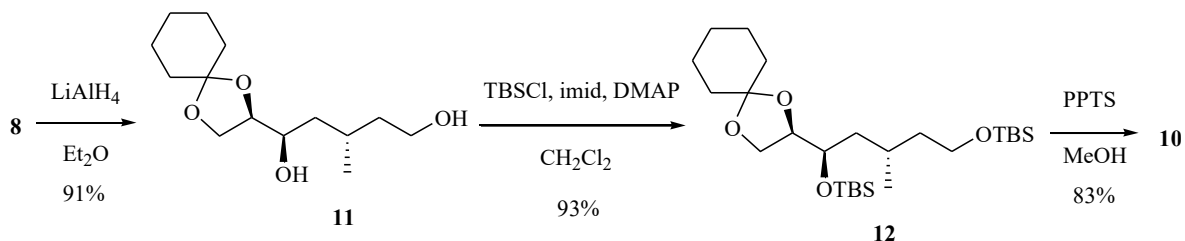


Схема 3.

Спирт **10** после мезилирования и нуклеофильного замещения на иод был превращен в лабильный иодид **13**, который в реакции элиминирования *трет*-булатом калия дал алкен **14**. Образовавшийся алкен **14** был подвергнут озонолузу с восстановлением реакционной смеси. Промежуточный альдегид без выделения ввели в реакцию олефинирования илидом фосфора, в результате которой был получен  $\alpha,\beta$ -ненасыщенный сложный эфир **15**. При действии десилилирующего агента создавался активный центр, индуцировавший реакцию внутримолекулярной циклизации по механизму *оксо*-Михаэля, в результате чего было сформировано производное тетрагидрофуранового ряда **16**, которое и является синтезируемым C<sup>1</sup>-C<sup>8</sup> строительным блоком амфинолидов С и F (схема 4).

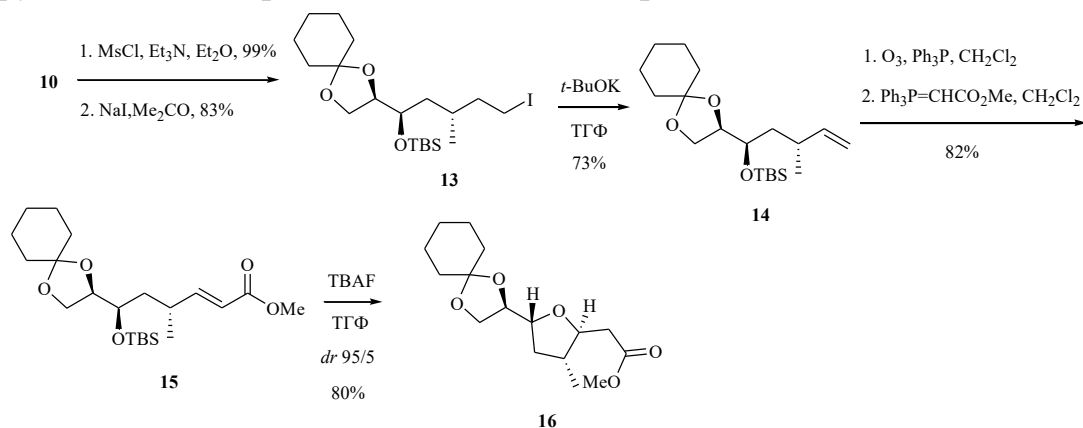


Схема 4.

Таким образом, на основе природного соединения *D*-маннита и коммерчески доступного этилового эфира 3,3-диэтоксипропионовой кислоты были разработаны две схемы синтеза C<sup>1</sup>-C<sup>8</sup> строительного блока амфинолидов С и F **16** в 14 и 15 линейных стадий с общим выходом 12 % и 18 %, соответственно.

#### Библиографические ссылки

1. Kobayashi, J., Tsuda, M. Amphidinolides, bioactive macrolides from symbiotic marine dinoflagellates // Nat. Prod. Rep. 2004. Vol. 21, № 1. P. 77-93.
2. Concise total syntheses of amphidinolides C and F / G. Valot [et al.] // Chem. Eur. J. 2015. Vol. 21, № 6. P. 2398-2408.
3. Минеева И. В., Кулинкович О. Г. Получение метил 3-бромметил-3-бутеноата и его реакции с альдегидами и трибутилхлорстаннаном в присутствии цинка // Журнал органической химии. 2008. Т. 44, №. 9. С. 1277-1282.
4. Минеева И. В. (*R*)-2,3-*O*-циклогексилденглицеральдегид в реакциях аллилирования метил 3-(бромметил)бут-3-еноатом. Метил 3-{(2*S*)-2-[(2*R*)-1,4-диоксаспиро[4.5]дец-2-ил]-2-гидроксиэтил}бут-3-еноат как удобный универсальный строительный блок для получения ключевых фрагментов биоактивных соединений // Журнал органической химии. 2019. Т. 55, №. 8. С. 1203–1214.

# ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТ/МАГНЕТИТ ДЛЯ ИММУНОАНАЛИЗА

**А. И. Гурова**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
ГНУ "Институт химии новых материалов Национальной академии  
наук Беларуси", г. Минск  
alexhgurova@gmail.com*

*науч. рук. – Т. Г. Шутова, канд. хим. наук,  
В. В. Паньков, д-р хим. наук, проф.*

Разработана методика получения магнитных субмикронных частиц полиметилметакрилат/магнетит методом безэмульгаторной эмульсионной полимеризации метилметакрилата. В качестве стабилизатора эмульсии использован сополимер поли(метилметакрилата-со-метакриловой кислоты), дополнительно деметилированный в концентрированной серной кислоте. Полученные композитные частицы содержат 1,7-3,8 % мас. магнитной фазы, стабилизированной олеиновой кислотой. Показано, что карбоксильные группы на поверхности частиц полиметил-метакрилат / магнетит могут быть использованы для конъюгирования с белками.

**Ключевые слова:** полиметилметакрилат; поли(метилметакрилат-со-метакриловая кислота); магнетит; магнитные полимерные микрочастицы.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитные полимерные нано- и микрочастицы представляют интерес для биологии, биотехнологии, медицины и фармацевтики. Магнитные микросферы используются в магнитной сепарации биохимических продуктов, в клеточной сортировке, для адресной доставки лекарственных веществ и контрастирования изображений магнитно-резонансной томографии.

Магнитные микросферы, конъюгированные с антителами, применяют в различных методах иммуноанализа в качестве оптических и магнитных меток. Это позволяет значительно увеличить чувствительность анализа, а также упростить процессы обнаружения, выделения и концентрирования интересующих биообъектов [1].

Целью данной работы являлось получение и исследование физико-химических свойств субмикронных частиц полиметилметакрилат (ПММА)/магнетит с карбоксильными группами на поверхности, пригодными для ковалентного связывания с макромолекулами белков.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Магнитные наночастицы (МНЧ) получали методом совместного осаждения солей железа (II) и (III), взятых в соотношении 1:2, раствором щелочи NaOH [2]. Полученный осадок магнетита диспергировали погружным ультразвуковым диспергатором УЗГ в водном растворе и стабилизировали цитратом натрия. Для повышения сродства МНЧ к органической фазе, их стабилизировали олеиновой кислотой. Диаметр полученных МНЧ равен 32,5 нм.

Кислотный гидролиз сополимера поли(метилметакрилат-со-метакриловая кислота) (ПИ), соотношение мономерных звеньев метилметакрилата (ММА) и метакриловой кислоты в котором составляет 1:0,016, проводили в концентрированной серной кислоте при температуре 40-45 °С в течение 2 ч [3]. Полученный частично деметилированный полимер (ПГ) после отмывки до pH 7,0 и сушки использован в качестве стабилизатора эмульсии ММА. Концентрацию карбоксильных групп в ПИ и ПГ оценивали спектрофотометрически (СМ2203, Solar), используя раствор родамина 6G в бензоле [4].

Субмикронные частицы ПММА и ПММА/МНЧ получали безэмульгаторной эмульсионной полимеризацией. Органическую фазу эмульсии готовили добавлением к ММА заданного объема 150 мг/мл раствора ПГ в мономере. Стабилизированные олеиновой кислотой МНЧ (~1,19 мг) диспергировали в 0,1 мл ММА, содержащего ПГ. Водная фаза эмульсии представляла собой 0,001 г/мл раствор  $K_2S_2O_8$  с pH ~ 7-8. Водную фазу эмульсии (0,9 мл) смешивали с органической фазой и диспергировали в ультразвуковой ванне 2 мин. Синтез проводили в микроцентрифужных пробирках Эппендорф объемом 1,5 мл на водяной бане при температуре 70-75 °С в течение 2 ч. Концентрацию магнетита в ПММА определяли с использованием о-фенантролина [5].

Конъюгирование белков (бычий сывороточный альбумин (БСА), альбумин человеческой сыворотки (САЧ) и протамин сульфат (ПрС)) с карбоксильными группами на поверхности частиц ПММА и ПММА/МНЧ проводили с помощью 1-этил-3(3-диметиламинопропил)карбодиимида (ЭДК) по модифицированной одностадийной методике [6]. Количество белка в дисперсии частиц ПММА-белок проводили с использованием Кумасси G250 с детектированием при двух длинах волн [7].

Гидродинамический диаметр по светорассеянию ( $Z_{av}$ ), среднечисловой диаметр ( $d_N$ ) и индекс полидисперсности (PDI) частиц определяли методом динамического лазерного светорассеяния (ДЛС) на приборе *Zetasizer Nano ZS, Malvern*. ИК-спектры получали на приборе *Tensor 27, Bruker* в таблетках KBr.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке ПИ серной кислотой концентрация карбоксильных групп увеличивается с 8,9 до 269,8 мкмоль/г, или в 30,5 раза. Использование данного полимера для эмульгирования ММА позволяет повысить содержание карбоксильных групп на поверхности микрочастиц и избежать неполной отмывки от ПАВ в случае использования других реагентов.

Для ИК спектра частиц ПММА/МНЧ (рис.1) характерна широкая полоса поглощения с максимумом при  $3434\text{ см}^{-1}$ , которая представляет собой суперпозицию валентных колебаний гидроксильных групп  $-\text{OH}$  воды и карбоксильных групп. Пик поглощения с максимумом при  $1732\text{ см}^{-1}$  и  $1731\text{ см}^{-1}$  в спектрах частиц ПММА и ПММА/МНЧ, соответственно, является характеристическим для группы  $>\text{C}=\text{O}$  в сложных эфирах и карбоновых кислотах. Наличие широкой полосы поглощения в области  $500\text{-}600\text{ см}^{-1}$  в ИК спектре частиц ПММА/МНЧ соответствует интенсивной полосе ассиметричных валентных колебаний связей  $\text{Fe}-\text{O}$  в магнетите при  $576\text{ см}^{-1}$  и свидетельствует о наличии магнетита в полимерной матрице. Концентрация МНЧ в материале композитных частиц ПММА/МНЧ составляет 1,7-3,8 % мас.

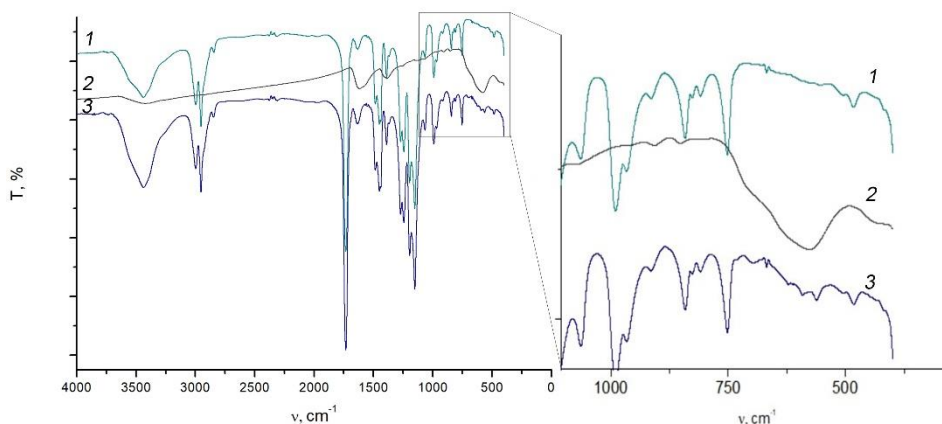


Рис. 1. ИК-спектры микрочастиц ПММА (1), наночастиц магнетита (2) и микрочастиц ПММА/МНЧ (3)

Концентрации ПГ в органической фазе влияет на характеристики частиц ПММА/магнетит (Таблица 1). С уменьшением количества используемого ПГ закономерно увеличиваются средний диаметр и полидисперсность частиц ПММА. Величина  $\xi$ -потенциала субмикронных частиц в воде составляет  $-42,1 - -45,3$  мВ для разных образцов. Так как значение  $\xi$  – потенциала является отрицательным и достаточно большим, можно сделать вывод о присутствии на поверхности частиц карбоксильных групп.

Характеристики частиц ПММА/МНЧ\*

Таблица	$S_{\text{ПГ}}$ , мг/мл	$Z_{\text{ав}}$ , нм	$d_N$ , нм	PDI	$\xi$ – потенциал, мВ
ПММА	30	498,7 ± 7,9	33 7,4	0,248 ± 0,003	-32,3 ± 1,1
ПММА/М НЧ	50	172,9 ± 3,3	11 3,2	0,218 ± 0,008	-45,3 ± 1,6
	40	250,9 ± 9,3	18 5,5	0,194 ± 0,051	-42,1 ± 1,0
	30	276,0 ± 13,1	18 2,2	0,384 ± 0,043	-43,8 ± 0,1
	20	416,5 ± 66,5	22 3,5	0,429 ± 0,048	-44,1 ± 2,5

\* $V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{орг}}=10$ ,  $C_{\text{Fe}_3\text{O}_4}=11,9$  мг/мл

Карбоксильные группы на поверхности частиц ПММА и ПММА/МНЧ могут быть ковалентно связаны с молекулами белков. В Таблице 2 приведены результаты определения БСА, САЧ и ПрС, связанных ковалентно с поверхностью субмикронных частиц ПММА и ПММА/МНЧ. Масса белка, связанного с частицами, зависит от его структуры и свойств. На поверхности частиц могут быть иммобилизованы белки различной молекулярной массы, имеющие изоэлектрические точки как в растворах с высоким, так и с низким рН. Микрочастицы ПММА с карбоксильными группами на поверхности могут быть использованы для конъюгирования с иммуноглобулинами.

Таблица 2

Содержание белка, связанного с поверхностью частиц ПММА/МНЧ

Частицы	Белок	$M_w$ , кг/моль	pI	$m_{\text{белок}}/m_{\text{частиц}}$ , мкг/мг
ПММА	БСА	64,0	4,9	3,0±0,2
	ПрС	4,5	12-13	1,7±0,3
ПММА/М НЧ	САЧ	66,4	4,7	7,5±1,8

#### Библиографические ссылки

1. *Осипов, А.П.* Наночастицы металлов как новый класс меток в быстрых методах иммуноанализа/ А.П. Осипова, Ж.В. Самсонова, С.Э. Кондаков// Вестн. Моск. ун-та. сер. 2. химия. – 2015. – Т. 56. – С. 164-174.
2. *Laurent, S.* Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis, Stabilization, Vectorization, Physicochemical Characterizations, and Biological Applications Sophie/ S. Laurent [et al.]// Chem. Rev. – 2008. – V. 108. – P. 2064-2110.
3. *Semen, J.* The Acid Hydrolysis of Isotactic and Syndiotactic Poly (methyl methacrylate)/ J. Semen, B. Lando// Macromolecules. – 1969. – V. 2. – P. 570 - 575.



4. *Palit, S.R.* Quantitative determination of carboxyl endgroups in vinyl polymers by the dye-interaction method/ *S.R. Palit, P. Ghosh*// *J.Polym.Sci.*–1962.–V.58.–P.1225-1232.
5. Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа: ГОСТ 4011-72. – Введ. 01.04.1974. – М.: Госстандарт, 1972. – 8 с.
6. *Hermanson, G.T.* Bioconjugate Techniques. 3rd Edition/ *G.T. Hermanson*// Academic Press. – 2013.
7. *Zor, T.* Linearization of the Bradford Protein Assay Increases Its Sensitivity: Theoretical and Experimental Studies/ *T. Zor, Z. Selinger*// *Anal. Biochem.* – 1996. – V. 236. – P. 302-308.

# СИНТЕЗ АЗОКРАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНЬЮГАЦИИ С БИОМОЛЕКУЛАМИ

А. А. Кмит

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*che.kmit@bsu.by;*

*науч. рук. – В. В. Шманай, канд. хим. наук, доц.*

На основе двух последовательных реакций азосочетания синтезирован тушитель флуоресценции ВВQ-ОН для дальнейшего конъюгирования с биомолекулами с целью внедрения в олигонуклеотидные гибридизационные зонды, использующиеся в анализе методом полимеразной цепной реакции в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** азокрасители; тушение флуоресценции; полимеразная цепная реакция; гибридизационные зонды; биоконъюгация.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод полимеразной цепной реакции в режиме реального времени – один из наиболее популярных методов лабораторной диагностики в настоящее время [1]. Детекцию результатов в данном методе анализа часто осуществляют с использованием гибридизационных зондов – олигонуклеотидов, меченных в разных сочетаниях одним или несколькими флуоресцентными красителями и тушителями флуоресценции по концам и/или внутри цепочки, которые функционируют по отдельности или в паре, обеспечивают «включение-выключение» флуоресценции и дают изменение интенсивности флуоресцентного сигнала за счет процессов внутри- и межмолекулярного переноса энергии при образовании вторичных структур [2].

Спектр используемых на практике флуоресцентных красителей широк. Подбираемые к ним в пару тушители флуоресценции должны удовлетворять ряду требований, таких как высокая стабильность, стойкость к обесцвечиванию, наличие широких спектров поглощения и инертность по отношению к биологическим системам. В связи с этим поиск и синтез новых универсальных тушителей остается актуальной задачей.

В течение последних десятилетий нефлуоресцентные азокрасители хорошо зарекомендовали себя в использовании в качестве тушителей флуоресценции [3]. Имея протяженную систему сопряжения, они демонстрируют широкие спектры поглощения в видимой и близкой к инфракрасной областям, вследствие чего могут работать в паре со многими известными флуоресцентными красителями. Одним из таких азокрасителей является тушитель ВВQ-650 (BlackBerry Quencher). Он устойчив по отношению к реагентам, использующимся для синтеза олигонуклеотидных цепочек, а

также подходит для создания гибридных зондов любой длины. Его спектр поглощения лежит в области от 550 до 750 нм. В патенте [4] метод синтеза тушителей типа ВВQ не представлен. Предлагаемый в статье [5] метод синтеза модифицированного тушителя ВВQ-ОН не имеет точного и воспроизводимого описания. Таким образом, на данный момент, фиксированные методы получения тушителя, чья практическая ценность заключается в его универсальности, отсутствуют. В связи с этим нами был разработан метод синтеза тушителя ВВQ-ОН, основанный на двух последовательных реакциях азосочетания.

Как показано на схеме, пара-нитроанилин (**1**) подвергается диазотированию. Полученная соль диазония (**2**) азосочетается с анилином (**3**). При этом образуется краситель (**4**), который, в свою очередь, подвергается диазотированию и азосочетанию с 8-гидроксиололидином (**6**), давая искомым базовый хромофор ВВQ-ОН (**7**). Содержащаяся в нём гидроксогруппа в дальнейшем будет использована для конъюгации с биомолекулами.

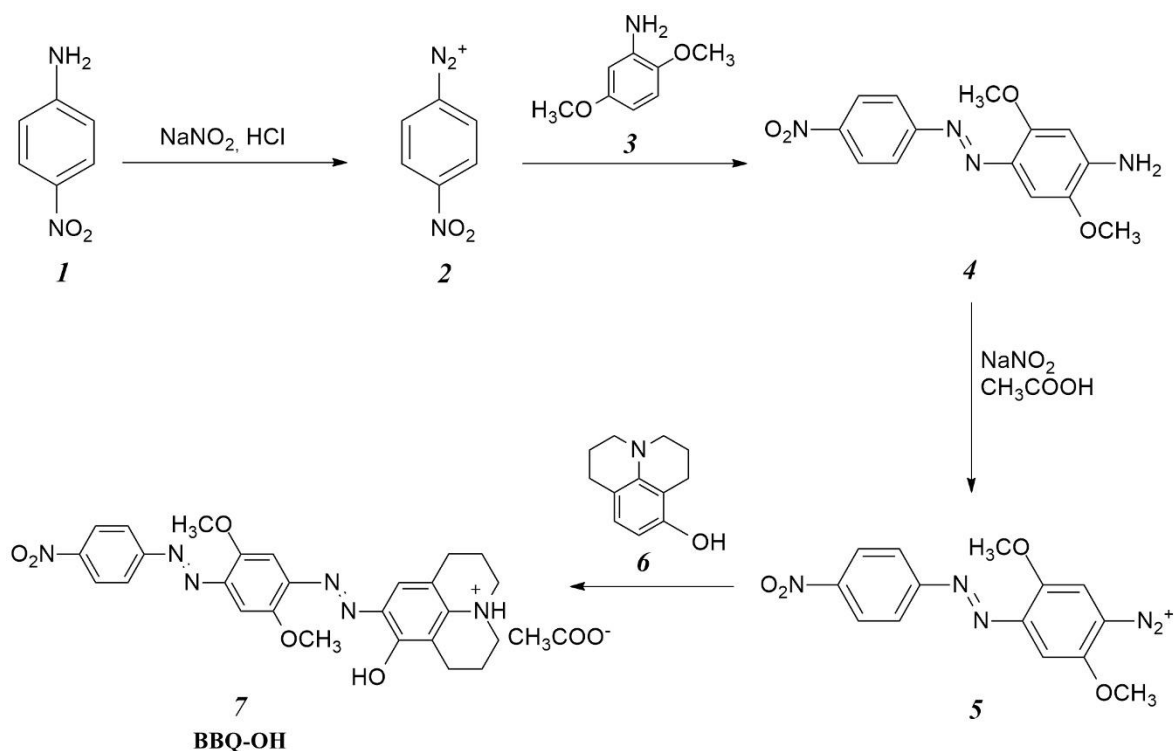


Схема 1. Метод синтеза тушителя ВВQ-ОН

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

**2,5-диметокси-4-(4-нитрофенилазо)анилин (4).** К раствору п-нитроанилина (**1**, 60 г, 435 ммоль) в смеси 600 мл холодной воды и 250 мл

HCl (конц) добавили раствор NaNO<sub>2</sub> (30 г, 435 ммоль) в 200 мл воды по каплям при 5 °С. Смесь перемешивали 30 минут, после чего внесли 4 г сульфаниловой кислоты. Перемешивали в течение 20 минут. Полученный раствор соли диазония (**2**) прикапывали к раствору 2,5-диметоксианилина (**3**, 66,5 г, 435 ммоль) в 560 мл воды, 80 мл HCl<sub>конц</sub>, 160 мл этилового спирта. Перемешивали сутки. Выпавший осадок фильтровали, промыли горячей водой, сушили. Перекристаллизовывали из этилового спирта. Выход 127 г (97%), кирпично-красный порошок, T<sub>пл</sub> > 250 °С.

**9-((2,5-диметокси-4-((4-нитрофенил)дiazенил)фенил)дiazенил)-2,3,6,7-тетрагидро-1H,5H-пиридо-[3,2,1-ij]хинолин-8-ол ацетат (7).** К раствору 2,5-диметокси-4-(4-нитрофенилазо)анилина (**4**, 1 г, 3,3 ммоль) в 20 мл уксусной кислоты при перемешивании добавляли порциями NaNO<sub>2</sub> (0,228 г, 3,3 ммоль). Реакционную смесь перемешивали 20 минут, после чего внесли 0,63 г 8-гидроксоюлолидина (**6**, 3,3 ммоль). Через 2 часа полученную суспензию медленно вливали в 500 мл холодной воды при перемешивании. Выпавший осадок фильтровали. Сушили на воздухе. Продукт очищали колоночной хроматографией на силикагеле (элюент: дихлорметан; градиент: метанол, 0,5-5,5%). Выход 0,663 г (40%), черный порошок, T<sub>пл</sub> > 250 °С, R<sub>f</sub> 0,74 (Py-MeOH-CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, 1:5:100).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 1,64 (3H, с, CH<sub>3</sub>); 1,94 (4H, м, CH<sub>2</sub>); 2,66 (4H, т, CH<sub>2</sub>); 3,26 (4H, м, CH<sub>2</sub>); 4,00 (3H, с, OCH<sub>3</sub>); 4,1 (3H, с, OCH<sub>3</sub>); 6,69 (1H, уш. с, H Ar); 7,35 (2H, д, H Ar); 7,43 (1H, с, H Ar); 7,47 (1H, с, H Ar); 7,90 (2H, д, H Ar); 8,31 (2H, д, H Ar); 16,75 (1H, с, H<sup>+</sup>). Спектр ЯМР <sup>13</sup>C, δ, м. д.: 22,1; 22,4; 22,8; 27,6; 51,7; 55,8; 110,3; 110,7; 114,8; 115,2; 120,9; 123,2; 124,2; 126,7; 145,8; 148,2; 150,1; 155,5.

#### Библиографические ссылки

1. *Seifi M.* Overview of real-time PCR principles // Polymerase chain reaction (Chapter 19): InTech, 2012. 566 p.
2. *Бикбулатова С. М.* Способы детекции результатов полимеразной цепной реакции в режиме реального времени // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17. №1. с. 59–67.
3. *Chevalier A.* Azo-Based Fluorogenic Probes for Biosensing and Bioimaging: Recent Advances and Upcoming Challenges // Chem. Asian J. 2017. Vol. 12. I. 16. P. 2008-2028.
4. Пат. 7879986 США, C09B 31/153, C07H 19/04, C12Q 1/68. Dark quenchers, probes and other conjugates incorporating the same, and their use. / D. A. Berry, W. H. Pearson; Berry & Associates, Inc. № 11/346688; Заявлено 03.02.2006; Опубл. 01.02.2011. 19 с.
5. *Chevalier, A.* Straightforward synthesis of bioconjugatable azo dyes. Part 2: Black Hole Quencher-2 (BHQ-2) and BlackBerry Quencher 650 (BBQ-650) scaffolds // Tetrahedron Lett. 2014. Vol. 55. I. 50. P. 6764-6768

# ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЭТИЛ-2-ЦИАНО-3-(2-ФУРИЛ)-2-ПРОПЕНОАТА И ЕГО БЕНЗОЛ ПРОИЗВОДНОГО В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А.Ю.Орлович

*Белорусский государственный университет;*

*arlovicha@mail.ru;*

*науч. рук. – А. В. Блохин, д-р хим. наук, проф.*

Данная работа посвящена теоретическому расчету энтальпии образования в газовой фазе этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата и его бензол-производного.

Предложен способ, позволяющих определить энтальпию образования в газовой фазе с большей точностью по сравнению с аддитивной схемой Джобака. Применение метода проиллюстрировано на производных этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата.

Отмечена роль этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата и его бензол производного в расчете парциальных вкладов в аддитивной схеме Бенсона, которые могут использоваться для расчета энтальпии образования в газовой фазе других соединений.

С использованием квантово-химического метода G4 на основе набора гомодесмических реакций рассчитаны стандартные энтальпии образования в газовой фазе этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата  $-(232.2 \pm 1.3)$  кДж/моль и его бензол производного  $-(111.2 \pm 12.6)$  кДж/моль. Наблюдается хорошая сходимость расчетного и экспериментального значений.

**Ключевые слова:** энтальпия образования; этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноат; этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноат; аддиционные схемы; квантовая химия; G4; метод гомодесмических реакций.

## ВВЕДЕНИЕ

Химия производных фурана является одной из наиболее перспективных областей химии гетероциклических соединений, что связано с доступностью исходного сырья для их получения и уникальной биологической активностью, что широко применяется в фармацевтике.

Энтальпия образования – фундаментальная характеристика соединения, которая может быть использована для решения большого количества теоретических и практических задач. Термодинамические расчеты при наличие достаточных термодинамических данных позволяют определять закономерности фазовых равновесий, вычислять пределы устойчивости изучаемого соединения, определять возможность протекания химических процессов, а также подбирать оптимальные условия осуществления превращений.

Наблюдается зависимость между строением вещества и его реакционной способностью (Quantitative Structure-Activity Relationship).

Как только будут разработаны эффективные методы предсказания свойств соединений исходя из их структуры, станет возможным целенаправленный синтез веществ с заданными свойствами.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Значение стандартной энтальпии образования вещества в газообразном состоянии может быть рассчитано как сумма стандартных энтальпии образования вещества в кристаллическом состоянии и энтальпии сублимации.

$$\Delta_f H_{298}(\text{газ.}) = \Delta_f H_{298}(\text{тв.}) + \Delta_{\text{sub}} H_{298}$$

Энтальпия образования вещества в кристаллическом состоянии находится методом бомбовой калориметрии, а энтальпия сублимации - интегральным эффузионным методом Кнудсена.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Существует ряд теоретических аддитивных схем, позволяющих прогнозировать свойства вещества, которое находится в состоянии идеального газа при температуре 298,15 К (25 °С) и при давлении 1 атм. (101,325 кПа).

### АДДИЦИОННАЯ СХЕМА ДЖОБАКА

На основе метода Линдемана, Джобаком разработана система инкрементов. Методика расчета заключается в представлении соединения в виде отдельных функциональных групп.

Среднеквадратичное отклонение энтальпии образования в газовой фазе для 20 производных фурана, полученных по методу Джобака, составляет 35,12 кДж/моль. Максимальное отклонение - 66,85 кДж/моль.

В ходе анализа полученных данных установлено, существует линейная зависимость между рассчитанной и экспериментально полученной величиной (рис.) ; выведено уравнение:  $y=0,9544x+ 19,058$  ( $R^2 = 0,9954$ ). Среднеквадратичное отклонение составляет 16,18 кДж/моль. Максимальное отклонение - 32,06 кДж/моль.

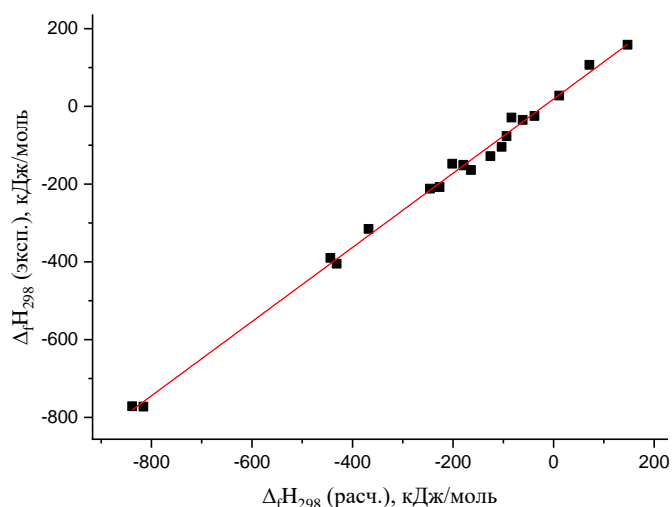


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и теоретически рассчитанных по методу Джобака энтальпий образования производных фурана в газовой фазе

Выведенное уравнение позволяет найти более точное значение энтальпии образования производного фурана в газовой фазе (табл. 1). Самое большое отклонение наблюдается для этил-2-циано-3-[5-(2-нитрофенил)-2-фуран]-2-пропеноата, что может быть объяснено наличием орто-эффекта.

Таблица 1

Сопоставление экспериментальных и теоретически рассчитанных энтальпий образования в газовой фазе бензол производных этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата

$\Delta_f H_{298}(\text{газ.}),$ эксп., кДж/моль	Метод Джобака		Метод Джобака + линейная зависимость	
	$\Delta_f H_{298}(\text{газ.}),$ кДж/моль	$\Delta,$ кДж/моль	$\Delta_f H_{298}(\text{газ.}),$ кДж/моль	$\Delta,$ кДж/моль
Этил-2-циано-3-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-113.4±7.5 [1]	-140.6	27.17	-115.1	1.70
Этил-2-циано-3-[5-(4-метилфенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-149.0±8.6 [1]	-172.7	23.68	-145.7	-3.25
Этил-2-циано-3-[5-(2-нитрофенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-99.2±8.3 [2]	-162.8	63.60	-136.3	37.12
Этил-2-циано-3-[5-(3-нитрофенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-123.2±9.0 [1]	-162.8	39.60	-136.3	13.12
Этил-2-циано-3-[5-(4-нитрофенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-118±13 [2]	-162.8	44.80	-136.3	18.32
Этил-2-циано-3-[5-(4-метил-3-нитрофенил)-2-фуран]-2-пропеноат				
-155.3±10 [1]	-194.9	39.61	-167.0	11.66

## АДДИЦИОННАЯ СХЕМА БЕНСОНА

Аддитивная схема Бенсона - один из самых распространённых методов расчета энтальпии образования органических веществ в газовой фазе. В качестве структурной единицы в методе принят атом с его первым окружением.

В отличие от метода Джобака, метод Бенсона учитывает вклад не только функциональной группы, но и ее взаимодействие с другими функциональными группами.

Энтальпия образования этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата и его бензол-производного позволила рассчитать значения парциальных вкладов для групп  $C_d-(CN)(C_d)(CO)$  и  $C_d-(C_d)(O)(C_b)$  соответственно. Вклады составили 158.75 кДж/моль и 59.65 кДж/моль [1].

Для предсказания энтальпии образования в газообразном состоянии можно использовать квантово-химические методы. Для расчета энтальпий образования в газообразном состоянии применялся метод гомодесмических реакций, или метод изодесмических реакций с групповым балансом. Составлялись гипотетические реакции, где сохраняется одинаковое количество связей одного типа в продуктах и реагентах, а также окружение для всех атомов в соединениях.

В ходе анализа структуры этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноата можно сделать вывод, что в молекуле наблюдается наличие системы сопряжения, а также что циано-, этоксикарбонил- и 2-фенил- группы связаны с  $sp^2$  - гибридизированными атомами углерода; все углеродные атомы в фенольном кольце  $sp^2$ - гибридизированные. Это позволяет составить гомодесмические реакции, в которых учувствуют вещества, в которых сохраняется связывание с  $sp^2$ - гибридизированным атомом углерода.

Подбор гомодесмических реакций для расчета стандартной энтальпии образования этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноата проводился исходя из доступных экспериментальных данных. В качестве реагентов выбраны этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноат и соединения, содержащие в своем составе бензольное кольцо. Особое внимание уделялось соединениям, в которых бензольное кольцо связано с другим циклом. Важно подобрать такие реакции, которые учитывали процесс внутреннего вращения вокруг связи между бензойным и фурановым кольцами.

Применялся композитный квантово-химический метод G4. Результаты расчета приведены в таблице (табл. 2). Рассчитанные энтальпии образования в газообразном состоянии хорошо согласуются с экспериментально полученными значениями.



Таблица 2

**Сопоставление экспериментальных и теоретически рассчитанных энтальпий образования в газовой фазе**

Название соединения	$\Delta_f H_{298}(\text{газ.})$ эксп., кДж/моль	$\Delta_f H_{298}(\text{газ.})$ расч., кДж/моль
этил-2-циано-3-(2-фурил)-2-пропеноат	-230.0±8.5 [1]	-232.2±1.3
этил-2-циано-[3-(5-фенил)-2-фуран]-2-пропеноат	-113.4±7.5 [1]	-111.2±12.6

**Библиографические ссылки**

1. *Kos R., Sobechko I., Horak Y., Sergeev V., Dibrivnyi V.* Thermodynamic Characteristics of Ethyl-2-cyano-3-(furan-2-yl)-prop-2-enoate Derivatives //Modern Organic Chemistry Research. 2017. Т. 2(2). С. 74–80. DOI: 10.22606/mocr.2017.22006.
2. *Kos, P. B.* Термодинамічні властивості етилових естерів 3-(5-арил-2-фурил)- 2-ціанакрилових кислот та їх розчинів // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата хімічних наук. 2017. С.153.

# КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КАТАЛИЗАТОРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА НА ОСНОВЕ $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Рагойжа Е.Г

*Белорусский государственный университет,  
KateRagozja@yandex.ru  
науч. рук. – В. Э. Матулис, канд. хим. наук, доц.*

В настоящее время системы  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  вызывают большой интерес в связи с их способностью катализировать процесс восстановления оксидов азота. Однако в литературе имеются лишь разрозненные экспериментальные и немногочисленные расчетные данные о структуре данного катализатора и предполагаемом механизме протекающего на нем процесса. В соответствии с этим целью данной работы является разработка расчетной методики и соответствующих моделей поверхности катализатора, а также последующее исследование строения каталитических центров и процесса адсорбции частиц серебра на поверхности  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Результаты работы являются значимыми для изучения механизма реакции восстановления оксидов азота на системах  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , выяснение которого позволит оптимизировать условия процесса удаления вредных веществ выхлопных газов.

**Ключевые слова:** DFT; катализатор  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ; адсорбция; квантово-химические расчеты; кластеры серебра; восстановление оксидов азота.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особенно остро стоит проблема ухудшения качества воздуха, вызванная увеличением количества выхлопных газов автомобильного транспорта. Поэтому по всему миру ведется активный поиск эффективных катализаторов дожигания остатков топлива и восстановления оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). В частности, экспериментально было показано [1], что частицы серебра, адсорбированные на поверхности оксида алюминия, способны селективно катализировать процессы восстановления оксидов азота. В литературе встречаются немногочисленные расчетные и экспериментальные данные о протекании подобных процессов, однако их механизм, а также основные факторы, влияющие на эффективность восстановления  $\text{NO}_x$ , до сих пор не выяснены. Для решения этой проблемы ключевое значение имеют сведения о структуре поверхности катализатора, а также о процессах адсорбции, протекающих на ней. Для получения этой информации, в рамках данной работы были проведены соответствующие квантово-химические расчеты.

## РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ

Моделирование процессов взаимодействия частиц серебра с поверхностью  $\text{Al}_2\text{O}_3$  проводилось в рамках теории функционала плотности (DFT). Разработка расчетной методики велась в соответствии со стремлением найти метод, позволяющий точно предсказывать энергетические и геометрические характеристики как изолированных, так и адсорбированных на подложке кластеров серебра. Нами исследована применимость двенадцати наиболее перспективных (согласно литературным данным) функционалов. С учетом того, что для систем, содержащих атомы тяжелых элементов получение точных расчетных данных более проблематично, чем для систем с исключительно легкими атомами, на первом этапе были проведены расчеты геометрических характеристик кластеров  $\text{Ag}_2$  с использованием двенадцати функционалов. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными и данными, полученными на более высоком уровне теории – теории связанных кластеров (метод CCSD). На основании полученных результатов, для дальнейших исследований были отобраны четыре функционала, дающие наиболее точные результаты: TPSSh, M06, B3PW91 и PBE0.

На втором этапе с использованием указанных функционалов были рассчитаны энергетические характеристики кластеров  $\text{Ag}_2$ . Расчеты проводились с использованием четырех базисных наборов различного размера. При расчетах энергии диссоциации учитывалась поправка на ошибку суперпозиции базисного набора (BSSE). Результаты расчетов, а также экспериментальные данные, приведены в таблице 1. Как видно из данных таблицы 1, наиболее точные значения колебательной частоты и энергии диссоциации  $\text{Ag}_2$  были получены с использованием функционала TPSSh с базисным набором SDD. В то время как при расчетах потенциала ионизации и сродства к электрону димера серебра, M06 и TPSSh дали близкие результаты. Для сравнения точности TPSSh и M06 были рассчитаны энергии перехода в фотоэлектронных спектрах анионных кластеров серебра, а также энергии диссоциации некоторых кластеров.

В целом по совокупности всех полученных данных TPSSh оказался точнее. К тому же, при оптимизации геометрии кластера  $\text{Ag}_3$ , M06, в отличие от TPSSh, предсказывал геометрию, отличную от общепризнанной в литературе. Среди проанализированных базисных наборов предпочтение было отдано набору SDD, так как он при меньшем, в сравнении с остальными, размере позволяет получать довольно точные результаты.

## СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ

Согласно экспериментальным данным [1], поверхность подложки катализатора в основном представлена плоскостями (110)  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Поэтому при моделировании подложки использовался указанный срез кристалла. Исследование поверхности катализатора проводилось в рамках кластерной модели. Данный подход позволяет при меньших затратах компьютерного времени получить результаты, сопоставимые по точности с периодическими расчетами.

В ходе работы было предложено пять различных моделей, включая две модели, встроенные в массив точечных зарядов (для учета влияния атомов массива кристалла на моделируемый участок поверхности). Был проведен сравнительный анализ значений энергии адсорбции и геометрических характеристик кластеров  $\text{Ag}_2$  и  $\text{Ag}_2^+$  на поверхности  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также зазора ВЗМО-НСМО (как аналога ширины запрещенной зоны кристалла), рассчитанных в рамках пяти предложенных моделей. Этот анализ показал, что наилучшее воспроизведение геометрии сайта адсорбции, а также природы и энергетики поверхности дают модели с массивом точечных зарядов в сочетании с базисным набором 6-311G\* для легких атомов.

Таблица 1.

**Сравнение рассчитанных и экспериментальных энергетических характеристик различных кластеров серебра.**

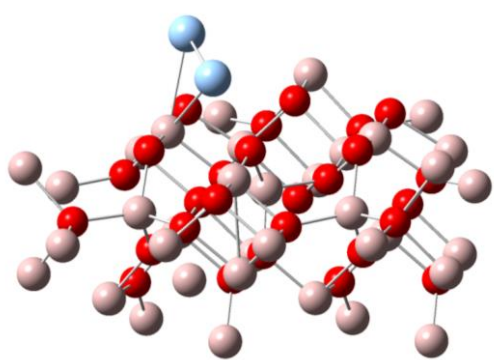
Метод расчета		Энергетическая характеристика кластера Ag <sub>2</sub>				
Функционал	Базисный набор	Колебательная частота, см <sup>-1</sup>	D <sub>e</sub> , ккал/моль	D <sub>0</sub> , ккал/моль	Потенциал ионизации, эВ	Сродство к электрону, эВ
B3PW91	LANL2DZ	184,8	32,92	32,66	7,63	0,87
	LANL2TZ	183,2	32,6	32,34	7,66	0,91
	SDD	186,4	34,08	33,81	7,78	1,00
	cc-pVTZ-PP	186,0	34,95	34,68	7,77	0,94
PBE0	LANL2DZ	183,3	33,82	33,56	7,53	0,80
	LANL2TZ	182,6	33,54	33,28	7,55	0,85
	SDD	185,8	34,95	34,68	7,67	0,94
	cc-pVTZ-PP	185,0	35,78	35,52	7,65	0,86
TPSSh	LANL2DZ	189,5	36,31	36,04	7,55	0,73
	LANL2TZ	188,3	35,94	35,67	7,58	0,78
	SDD	191,5	37,38	37,11	7,71	0,90
	cc-pVTZ-PP	191,4	38,42	38,15	7,70	0,82
M06	LANL2DZ	185,49	40,74	40,47	7,71	0,87
	LANL2TZ	179,89	40,10	39,84	7,80	0,92
	cc-pVTZ-PP	183,3	41,98	41,72	7,85	1,01
	SDD	184,3	41,02	40,76	7,84	1,03
CCSD(T,Full)/ cc-pVTZ-PP		191,9	33,86	33,59	-	-
Экспериментальное значение		192,4 [2]	38,3 [2]	38.0±0.7 [2]	7,61±0,15 7.3 ± 0.1 6.4 ± 0.7	1.100 ± 0.050 1.00 ± 0.20
Реакция		Значение энергии диссоциации, ккал/моль		Экспериментальное значение [2], ккал/моль		
		в M06	TPSSh			
(C <sub>2v</sub> ) Ag <sub>3</sub> * → 3Ag		62,11	58,11	60,7±3,1		
(C <sub>2v</sub> ) Ag <sub>3</sub> → Ag <sub>2</sub> + Ag		19,98	19,57	20,8 (CCSD [2])		
(D <sub>∞h</sub> ) Ag <sub>3</sub> <sup>-</sup> → Ag <sub>2</sub> + Ag <sup>-</sup>		44,53	44,18	48,7±2,3		
(D <sub>∞h</sub> ) Ag <sub>3</sub> <sup>-</sup> → Ag <sub>2</sub> <sup>-</sup> + Ag		52,47	46,99	55,9		
(D <sub>2h</sub> ) Ag <sub>4</sub> <sup>-</sup> → Ag <sub>3</sub> <sup>-</sup> + Ag		33,37	32,27	31,8±5,5		
(D <sub>2h</sub> ) Ag <sub>4</sub> <sup>-</sup> → Ag <sub>2</sub> <sup>-</sup> + Ag <sub>2</sub>		43,37	40,73	38,5±9		
(C <sub>2v</sub> ) Ag <sub>5</sub> <sup>-</sup> → Ag <sub>4</sub> <sup>-</sup> + Ag		46,86	51,28	41,8±4,6		

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДСОРБЦИИ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ

Согласно экспериментальным данным, на поверхности катализатора преобладают атомы и катионы серебра, а также небольшие нейтральные и положительно заряженные кластеры. В ходе работы были рассчитаны энергии адсорбции подобных частиц с использованием кластерной модели с точечными зарядами (таблица 2). Из данных таблицы 2 видно, что адсорбция небольших кластеров серебра на поверхности  $Al_2O_3$  протекает экзотермично, что говорит о термодинамической выгодности образования таких каталитических центров на поверхности подложки. Согласно проведенным расчетам, процессы диссоциации адсорбированных кластеров на более мелкие частицы являются эндотермическими, что говорит о высокой вероятности нахождения малых кластеров серебра на поверхности реального катализатора.

Таблица 2.

### Рассчитанные значения энергии адсорбции кластеров серебра на поверхности подложки.

Адсорбированная частица	Энергия адсорбции, кДж/моль	Оптимизированная структура кластера $Ag_2$ на поверхности $Al_2O_3$
Ag	-66,04	
$Ag_2$	-119,50	
$Ag_3$ (конформер 1)	-161,93	
$Ag_3$ (конформер 2)	-178,55	
$Ag_3$ (конформер 3)	-166,65	
$Ag_4$	-278,42	
$Ag^+$	-340,66	
$Ag_2^+/Al_2O_3$	-357,56	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящего исследования были разработаны расчетная методика и модели поверхности катализатора  $Ag/Al_2O_3$ , проведены исследования геометрических и энергетических характеристик каталитических центров, а так же показано, что адсорбция и присутствие на поверхности катализатора небольших кластеров серебра являются энергетически выгодными. Разработанные в ходе работы модели будут использоваться нами при исследовании механизма реакции восстановления оксидов азота на поверхности  $Ag/Al_2O_3$ .

### Библиографические ссылки

1. Deng, H. The role of AgOAl entities in adsorption of NCO species and reduction of NO<sub>x</sub>// Catal. Today. – 2015. – Vol.258. – P.35-40.
2. Duanmu, K. Validation of methods for computational catalyst design: geometries, structures, and energies of neutral and charged silver clusters // J. Phys. Chem. C. – 2015. – Vol. 119, №. 17. – P. 9617-9626.

# СИНТЕЗ, ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И АНАЛИЗ БИОАКТИВНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ

**А.Ю. Раковец**

*ИОНХ НАН Беларуси,*

*Белорусский государственный университет, г. Минск;*

*rakovets.ana@gmail.com;*

*науч. рук. – О.Н. Мусская, канд. хим. наук, доц.*

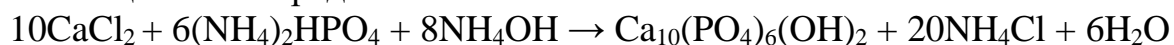
Заболевания, сопровождающиеся деструктивными изменениями костной ткани, являются распространенным явлением в современной хирургии. В связи с этим, актуальной проблемой становится получение синтетических остеопластических материалов, которые бы максимально точно имитировали поведение костной ткани организма. Основными компонентами костной ткани являются различные формы фосфатов кальция, придающие кости твердость и жесткость, а также белок коллаген, обеспечивающий эластичность, высокую трещиностойкость и необходимую скорость резорбции и обновления костной ткани [1]. При создании синтетических остеопластических материалов наиболее перспективными в качестве полимерной матрицы являются полилактиды [2]. Данные полимеры удобны в эксплуатации, обладают высокой механической прочностью и, что самое главное, биodeградируемостью, то есть полностью выводятся из организма после использования в течение 2-36 месяцев. В данной работе были синтезированы фосфаты кальция с различным соотношением кальция к фосфору и на их основе получены композиционные материалы с полилактидом в виде пленок и нитей. Изучена термическая устойчивость полученных материалов, а также их биологическая активность, путём выдерживания в искусственной среде, имитирующей плазму крови человека [3].

**Ключевые слова:** фосфаты кальция; полилактид; композиционные материалы; биоактивность; термическая устойчивость; гидроксиапатит; брусит.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Методики синтезов фосфатов кальция

Гидроксиапатит синтезировали путем добавления по каплям к раствору хлорида кальция раствора гидрофосфата аммония при мольном соотношении Ca/P=1,67 в течение 40 мин при постоянном перемешивании в щелочной среде:

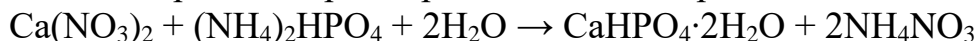


Осадок промывали разбавленным раствором фосфорной кислоты до pH=7.

Кроме того, проводили синтез по описанной выше методике в присутствии полилактидной плёнки.



Брушит синтезировали путем медленного приливания к раствору нитрата кальция раствора гидрофосфата аммония при мольном соотношении Ca/P=1,00 в нейтральной среде при постоянном перемешивании:



Осадок был тщательно промыт дистиллированной водой, а затем высушен при 50–70 °С в течение 4 ч.

### **Получение композиционных материалов на основе фосфатов кальция и полилактида**

Материалы на основе полилактида (*L*-форма, марка «Ingeo 4043») и его композита с фосфатами кальция (ФК) (ГА, брушитом) получали в виде нитей и пленок, которые вытягивали на портативном экструдере «NoztekPro» (Великобритания) при 200 °С. Содержание ФК в композитах составляло от 1 до 5%. Полилактидные пленки дополнительно модифицировали 4% гелем ГА в несколько циклов после высыхания каждого слоя. Число циклов модифицирования составило 6.

### **Физико-химические методы исследования фосфатов кальция и композиционных материалов на их основе**

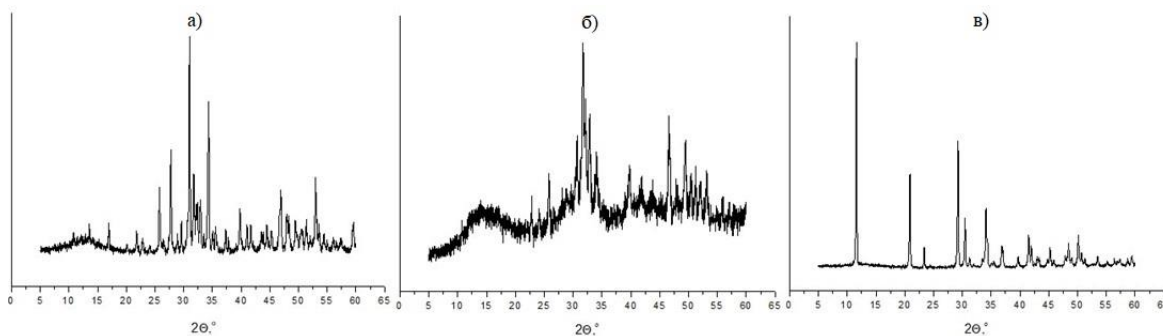
Рентгенофазовый анализ (РФА) полилактида и композиционных материалов на его основе проводили на дифрактометре «ADVANCE D8» (Bruker, Германия) при  $\text{Cu}_K=1,5405 \text{ \AA}$ . Дифференциальный термический анализ (ДТА) и термогравиметрию (ТГ) образцов проводили в воздушной атмосфере на совмещенном термическом анализаторе «NETZSCH STA 409 PC LUXX» (Германия); скорость нагрева составляла 5,0 °С/мин, масса навески – 21–80 мг.

Оценку биологической активности образцов проводили при их выдерживании в искусственной среде, имитирующей плазму крови человека (Simulated Body Fluid – SBF) [3] при 37 °С в течение 1 месяца.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

### **Идентификация фосфатов кальция**

Фосфат кальция (ГА), синтезированный при соотношении Ca/P=1,67 из водного раствора соли кальция и гидрофосфата аммония, – слабо кристаллизованное вещество. В связи с этим ФК подвергали дополнительному прогреву при 800 °С. В результате на рентгенограмме (рисунок 1а) четко видны пики, характерные для ГА ( $2\Theta$ : 25,795; 31,787; 46,854; 53,012) и трикальцийфосфата (ТКФ) ( $2\Theta$ : 27,759; 30,990; 34,310). Можно



сделать вывод, что синтезированный ГА содержит ТКФ в качестве сопутствующего продукта в значительном количестве.

*Рис. 1.* Рентгенограммы фосфатов кальция, синтезированных при соотношении Ca/P=1,67 (а); 1,0 (в), а также в присутствии полилактида (б)

На рентгенограмме ФК, синтезированного при мольном соотношении Ca/P=1,0 (рисунок 1в), после высушивания при 70°C, проявляются пики, характерные для однофазного брушита ( $2\Theta$ : 11,681; 20,935; 23,503; 29,309; 47,915°).

На рентгенограмме ФК, синтезированного в присутствии полилактида (рисунок 1б) хорошо видны пики, характерные для ГА ( $2\Theta$ : 31,732; 32,848; 46,668; 49,444°). Гораздо менее выражены пики, характерные для ТКФ ( $2\Theta$ : 30,668; 39,773; 34,089°). Вероятно, продукты разложения полимера в щелочной среде ингибируют образование сопутствующих фаз.

### **Композиционные материалы на основе полилактида**

Пленочные материалы на основе полилактида и ГА являются эластичными, гибкими. Сами пленки прозрачные, однако при введении ФК становятся матовыми. ФК распределён на полимерной матрице однородно. Нити на основе полилактида и ФК (ГА и брушита) – хрупкие, с увеличением содержания ФК хрупкость увеличивается. При введении небольшого количества брушита (до 1%) нить однородная, а при увеличении количества до 5% уже не удаётся получить однородную нить. Данное явление, вероятно, обусловлено особенностями кристаллов брушита.

Термический анализ исходной полилактидной нити (рисунок 2) показал, что стеклование происходит при 60–90°C, а плавление – в температурном интервале 160–200°C. Деструкция полимера начинается около 305°C и сопровождается экзоэффектами. Введение фосфата кальция в состав полимерной матрицы незначительно сдвигает температурные эффекты в низкотемпературную область. Можно предположить, что при непрерывном нагревании ГА образует с полимером прочные связи, деструкция которых затрудняется в отличие от полимера без наполнителя.

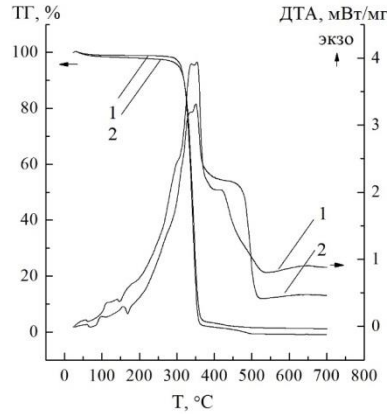


Рис. 2. Кривые термического анализа: 1 – исходный полилактид; 2 – полилактидная нить, содержащая 5% ГА.

Полилактидные пленки предварительно обезжировали выдерживанием в этаноле, затем обрабатывали 4% гелем ГА при перемешивании в течение 10 мин. Образцы извлекали из суспензии, излишки которой удаляли на фильтровальной бумаге, затем высушивали при 60°C в течение 10 минут. Обработку гелем ГА проводили в несколько циклов после высыхания каждого слоя. Максимальное число циклов модифицирования составило 6. В результате массы образцов линейно возрастали, что видно на рисунке 3.

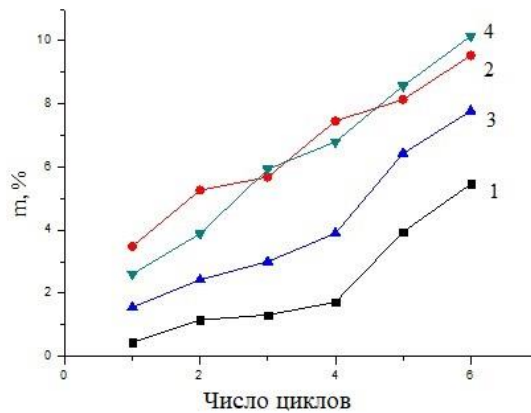


Рис. 3. Зависимость прироста массы биоактивного ГА на полимерной пленке от числа циклов модифицирования гелем ГА: 1-полилактид; 2-полилактид с 1% ГА; 3-полилактид с 3% ГА; 4-полилактид с 5% ГА

При обезжиривании образцов масса уменьшается на 0,0001–0,0011 ( $\pm 0,0002$ ) г. Модифицирование гелем ГА позволяет нанести биоактивный слой (до 5%) на полилактидные пленки. Установлено, что с ростом числа циклов модифицирования (от 1 до 6), содержание биоактивного ГА повышается на 5–10%. Характерно, что максимальный прирост массы наблюдается для полилактида с 5% ГА.

При выдерживании образцов в растворе SBF изменялся рН в зависимости от состава.

Таблица 1

**Характеристики пленок на основе полилактида и фосфатов кальция**

материал	$m_{\text{исх}}$	$m_{\text{обезж}}$	рН
плёнка поли- лактид	0,0369	0,0367	7,86
плёнка поли- лактид 1% ГА	0,0170	0,0170	7,73
плёнка поли- лактид 5% ГА	0,0139	0,0136	7,48
нить 5% ГА	0,0265	0,0263	7,40
нить 10% ГА	0,0605	0,0602	7,62
нить 5% бру- шит	0,0181	0,0180	7,45
нить 10% брушит	0,0321	0,0318	7,36

Изменение рН свидетельствует о взаимодействии компонентов плёнки с раствором. В связи с этим можно предположить, что такие материалы на основе полилактида и ГА будут проявлять биоактивные свойства в биологических жидкостях. Небольшое превышение физиологического значения рН (7,4) обусловлено особенностями эксперимента, в ходе которого не обеспечивалось постоянное обновление раствора SBF, в отличие от плазмы крови, которую он моделирует. Вследствие этого, предполагается, что в организме будет поддерживаться постоянство рН в пределах физиологической нормы.

**Библиографические ссылки**

1. Мусская О.Н, Кулак А.И, Крутько В.К, Лесникович Ю.А, Казбанов В.В, Житкова Н.С. Получение биоактивных мезопористых кальцийфосфатных гранул // Неорганические материалы. – 2018. – Том 52, №2. – стр. 130-137.
2. Kokubo T., Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? // Biomaterials. – 2006. – V. 27. – P. 2907-2915.
3. Rezwana K., Chena Q.Z., Blakera J.J. Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering // Biomaterials. – 2006. – Vol. 27. – P. 3413–3431.
4. Lasprilla A.J., Martinez G.A., Lunelli B.H. Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices – A review // Biotechnology Advances. – 2012. – Vol. 30. – P. 321–328.

# ВЛИЯНИЕ ДЕЙТЕРООБМЕНА НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРОПАНДИОЛА-1,2 В ДЕАЭРИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРИ pH 7

О. В. Урбанович и А. В. Савко

*Белорусский государственный университет, Минск;  
olga.urbanovich@gmail.com; annasavavvv@gmail.com;  
науч. рук – Р. Л. Свердлов, канд. хим. наук, доц.*

В рамках работы была исследована устойчивость пропандиола-1,2 и его дейтерированного по второму атому углерода производного к свободнорадикальной фрагментации и деструкции в деаэрированных водных растворах при pH 7, определены состав и радиационно-химические выходы продуктов их превращений. Было показано, что 1,2-пропандиол-2-D обладает большей радиационной стойкостью, чем его протиевый аналог. Полученные результаты указывают на перспективность использования дейтерообмена для получения устойчивых по отношению к индуцируемым ионизирующим излучением свободнорадикальным реакциям фрагментации и деструкции гидроксилсодержащих участков биомолекул.

**Ключевые слова:** радиопротекторы; радиолиз; свободные радикалы; фрагментация; изотопный обмен; дейтерообмен; 1,2-пропандиол.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиозащитные средства востребованы как в связи с динамичным развитием отрасли ядерной энергетики, так и значительным расширением сфер использования источников ионизирующих излучений в промышленности и медицине (радиотерапия, производство радиофармпрепаратов, диагностика заболеваний). Новым направлением в разработке радиопротекторов является пересмотр подхода к защите живых организмов от радиации: вместо введения в организм чужеродного и, в этой связи часто токсичного, радиозащитного вещества, в последние годы активно исследуется возможность введения в организм «стабилизированных» изотопами  $^{13}\text{C}$  или  $^2\text{H}$  компонентов биомолекул – полиненасыщенных жирных кислот, аминокислот, азотистых оснований. Такие «модифицированные» молекулы, попадая в пищу, встраиваются в структуру биомолекул, повышая их устойчивость в отношении индуцируемых ионизирующим излучением свободнорадикальных реакций повреждения [1-4].

В настоящей работе было проведено исследование по изучению возможности использования дейтерообмена для получения устойчивых по отношению к индуцируемым ионизирующим излучением свободнора-

дикальным реакциям фрагментации и деструкции гидроксилсодержащих участков биомолекул на примере пропандиола-1,2 и его дейтерированного по второму атому углерода производного.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предметом исследования в настоящей работе являлись радиационно-иницируемые превращения 1,2-пропандиола и 1,2-пропандиол-2-D (рис. 1) в водных деаэрированных растворах.

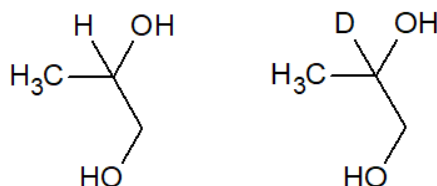


Рис. 1. Структурные формулы использованных соединений

Для приготовления водных растворов исследуемых соединений и используемых реактивов применялась свежеприготовленная бидистиллированная вода. В работе без предварительной очистки использовали 1,2-пропандиол ( $\geq 99,5\%$ , Aldrich), ацетон ( $\geq 99,9\%$ , AppliChem), гидроксиацетон ( $\geq 95\%$ , Alfa Aesar), пропаналь ( $\geq 98\%$ , Fluka), водный раствор формальдегида ( $\omega=37\%$ , содержащий 10-15% метанола в качестве стабилизатора, Sigma-Aldrich), высокочистый ацетальдегид получали методом кислотного гидролиза паральдегида, дигидрофосфат калия ( $\geq 99,0\%$ , Sigma Life Sciences) и гидрофосфат натрия ( $\geq 99,0\%$ , Sigma-Aldrich). 1,2-пропандиол-2-D ( $\geq 95\%$ ) был синтезирован в Лаборатории химии биоконъюгатов (ИФОХ НАН Беларуси). Перед использованием 2,4-динитрофенилгидразина (ДНФГ) (Sigma-Aldrich) его подвергали перекристаллизации из ацетонитрила [5]. Для приготовления растворов 1,2-пропандиола и 1,2-пропандиола-2-D с концентрацией 0.1 моль/л, вещества растворяли в 50 мМ фосфатном буфере (pH = 7.00 $\pm$ 0.01).

Продувка стеклянных ампул с растворами исследуемых веществ для удаления кислорода проводилась аргоном (объемная доля Ar не менее 99,993%) в течение 60 минут. Приготовленные растворы облучались на установке МРХ- $\gamma$ -25М ( $\gamma$ -излучение изотопа <sup>60</sup>Co). Мощность поглощенной дозы составляла 0.0894  $\pm$  0.007 Гр/с, интервал поглощенных доз – 0.11-0.64 кГр.

Для анализа карбонильных продуктов радиационно-химических превращений 1,2-пропандиола и 1,2-пропандиол-2-D использовали дериватизирующий раствор ДНФГ (0.03 г ДНФГ, 6.2 мл 36% HCl, до 100 мл разбавляли метанолом). Растворы исследуемых веществ после облучения смешивали с раствором ДНФГ в соотношении 1:1, виалы оставляли

для протекания реакции на 15 минут в защищённом от света месте, после чего проводили хроматографический анализ.

Качественный и количественный анализ образующихся ацетона, пропаналя, гидроксиацетона, ацетальдегида и формальдегида проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе «Shimadzu» (Япония) с использованием детектора на диодной матрице SPD-M20A при длине волны 365 нм. Условия хроматографирования: колонка Shim-pack VP-ODS (длина – 150 мм, внутренний диаметр – 4.6 мм, размер зёрен – 4.6 мкм); элюент – ацетонитрил:вода (50:50 об./об.); скорость подачи элюента 0.8 мл/мин; температура термостата составляла 40 °С; объём вводимой пробы – 1 мкл.

Радиационно-химические (G) выходы образования продуктов реакций рассчитывали на линейных участках зависимости концентраций веществ от поглощенной дозы. Статистическую обработку результатов эксперимента и расчёт значения ошибки определения радиационно-химических выходов проводили методом наименьших квадратов с использованием коэффициента доверительной вероятности 0.95.

## 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 1,2-пропандиола и 1,2-пропандиол-2-D, как ацетон, пропионовый альдегид, гидроксиацетон, ацетальдегид и формальдегид. В таблице 1 приведены полученные в ходе эксперимента радиационно-химические выходы продуктов превращения исходных молекул.

Таблица 1

### Радиационно-химические выходы продуктов радиолиза превращений

#### 1,2-пропандиола и 1,2-пропандиол-2-d<sub>1</sub>

	1,2-пропандиол	1,2-пропандиол-2-d <sub>1</sub>
Ацетон	7,44±0,36	0,55±0,12
Пропаналь	0,91±0,07	0,61±0,21
Гидроксиацетон	0,97±0,14	–
Ацетальдегид	0,47±0,04	0,33±0,1
Формальдегид	0,33±0,04	0,27±0,08

При радиолизе 1,2-пропандиола первоначально образуются два углерод-центрированных радикала (I и II), превращения которых дают два

продукта дегидратации исходного соединения – ацетон и пропионовый альдегид и два продукта окисления – оксиацетон и  $\alpha$ -оксипропионовый альдегид (рис. 2) [6]. При замещении атома водорода на дейтерий у второго атома углерода в молекуле 1,2-пропандиола углерод-центрированный радикал **I** образуется путём расщепления связи C–D, которая имеет большую энергию, чем связь C–H. Кроме того, радикал, образующийся после дегидратации радикала **I** или **II**, может отрывать атом водорода от исходной молекулы 1,2-пропандиола, чем объясняется большой короткоцепой выход ацетона. На этой стадии проявляется селективность отрыва от дейтерированного и не дейтерированного атома C, в результате наблюдается уменьшение радиационно-химического выхода ацетона по сравнению с не дейтерированным 1,2-пропандиолом примерно в 13,5 раз (табл. 1). Радиационно-химический выход гидроксиацетона при радиоллизе 1,2-пропандиола-2-D, не определялся, однако логично будет предположить наблюдение такой же тенденции снижения выхода относительно 1,2-пропандиола. Радиационно-химический выход пропионового альдегида снижается примерно на 30%, что подтверждает механизм его образования в результате дегидратации углерод-центрированного радикала **II**, так как реакции не затрагивают связь C–D.

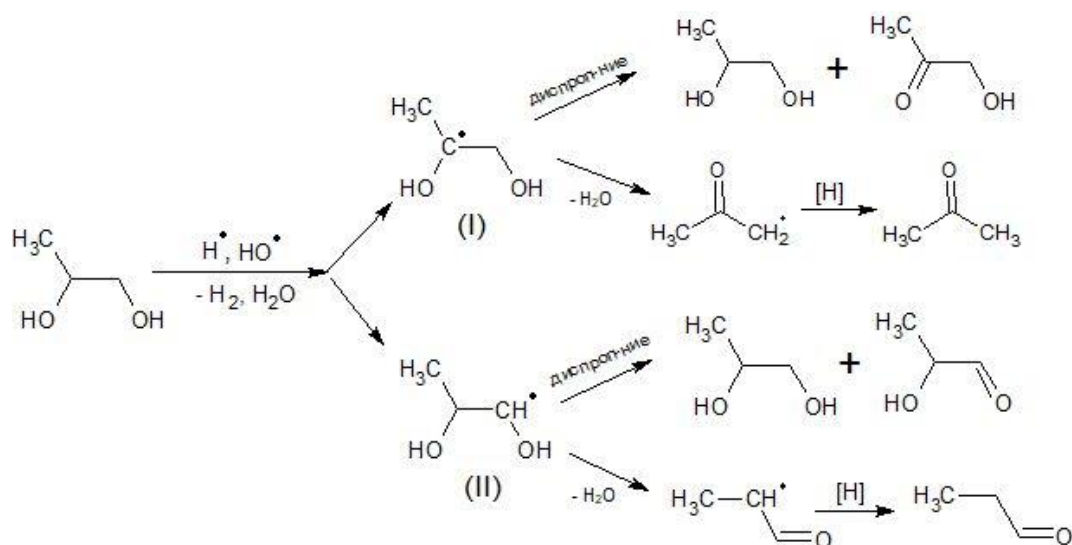


Рис. 2. Механизм образования продуктов окисления и дегидратации 1,2-пропандиола

Формальдегид и ацетальдегид образуются путём деструкции кислород-центрированных радикалов **III** и **IV** (рис. 3). Наличие дейтерия у второго атома углерода в молекуле 1,2-пропандиола-2- $d_1$  уменьшает выходы ацетальдегида на 30%, а формальдегида всего на 20%. При образовании продуктов деструкции не происходит разрыва связи C–H или C–D у второго атома углерода.



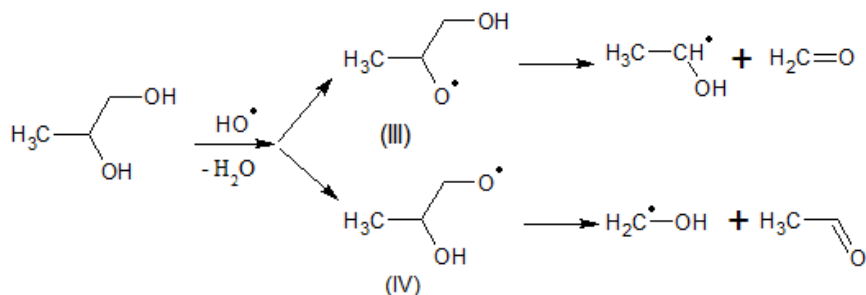


Рис. 3. Механизм образования продуктов деструкции 1,2-пропандиола

Таким образом, введение в молекулу 1,2-пропандиола атома дейтерия у второго атома углерода приводит к заметному ингибированию свободнорадикальных реакций фрагментации и в меньшей степени деструкции 1,2-пропандиола-D по сравнению с его противевым аналогом.

### Библиографические ссылки

1. Пат. 9616042 США. Isotopically modified compounds and their use as food supplements/ *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2017.
2. Пат. 0082208 США. Therapies for cancer using isotopically substituted lysine/ *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2011.
3. Пат. 8901102 США. Therapeutic substances that modulate genome methylation/ *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2014.
4. Пат. 2701695 США. Neurodegenerative disorders and muscles diseases implicating PUFAs / *Shchepinov*; Retrotope, Inc. 2019.
5. *Armarego, W.L.F.* Purification of Laboratory Chemicals (Sixth Edition) / *W.L.F. Armarego, C. Chai.* – U.S.A.: Butterworth-Heinemann, 2009.
6. *Петряев, Е. П.* Радиационная химия бифункциональных органических соединений/ *Е. П. Петряев, О. И. Шадыро.* – Минск: Университетское, 1986.

# СИНТЕЗ (3Z,6Z,9Z)-1,3,6,9-НОНАДЕКАТЕТРАЕНА – ПОЛОВОГО ФЕРОМОНА ЗИМНЕЙ ПЯДЕНИЦЫ (*OPEROPHTERA BRUMATA*)

А. В. Швайба, В. Е. Исаков

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
*shvaiba.nastya@gmail.com*  
науч. рук. – В. Е. Исаков, доц.

В настоящей работе предложен новый подход к синтезу полового феромона зимней пяденицы (*Operophtera brumata*) с использованием реакций Виттига и восстановления титанацклопропановыми реагентами для стереоселективного формирования кратных связей в молекуле целевого соединения. Разработанный способ синтеза предполагает применение доступных реагентов, растворителей и пригоден для обработки мультиграммовых количеств целевого продукта.

**Ключевые слова:** феромоны, метилен разделённые диены, кросс-сочетание

Феромоны насекомых используют для мониторинга численности насекомых-вредителей. Применение феромонов позволяет значительно сократить объём обработки инсектицидами и сохранить многие полезные виды насекомых. Феромоны видоспецифичны, не загрязняют окружающую среду, безвредны для человека и животных, применяются в небольших количествах, что делает их использование экологически безопасным и экономически выгодным.

Зимняя пяденица (*Operophtera brumata*) – опасный листогрызущий вредитель-полифаг, повреждающий как ряд плодовых культур, так и лиственных древесных пород в Евразии и Северной Америке [1].

Половой феромон зимней пяденицы идентифицирован как (3Z,6Z,9Z)-1,3,6,9-нонадекатетраен (**1**) [2,3]. В настоящее время существует достаточно много подходов к синтезу данного соединения, однако описанные в литературе методы достаточно трудоёмкие, а общий выход продукта в большинстве схем небольшой.

Целью настоящей работы являлась разработка эффективной схемы синтеза тетраена **1** с использованием коммерчески доступных реагентов.

Для синтеза соединения **1** мы использовали последовательность превращений, см. схему 1, которая предполагает стереоселективное парциальное восстановление ацетиленового полупродукта с помощью титанацклопропановых реагентов.

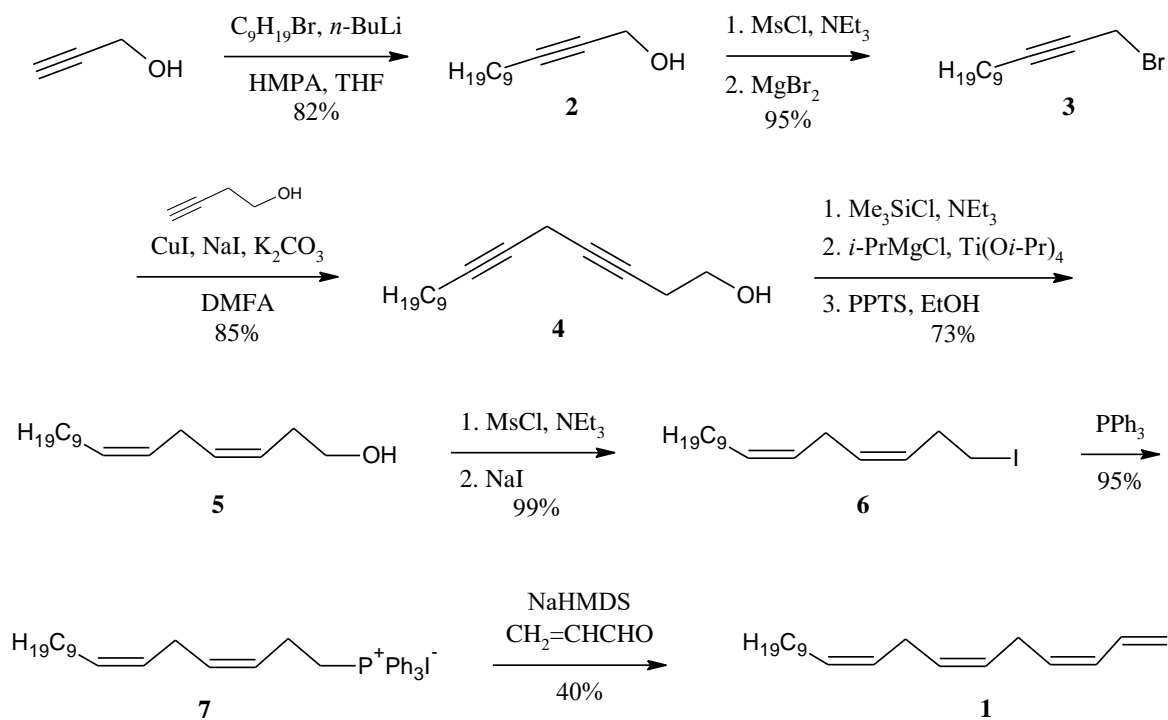


Схема 1

В качестве исходного соединения нами был выбран доступный пропаргиловый спирт, который алкилировали нонилбромидом в смеси гексаметапол - тетрагидрофуран с использованием *n*-бутиллития в качестве основания. При наработке значительных количеств спирта **2** более экономичным может быть применение в этой реакции амида лития в жидком аммиаке, несмотря на то, что выход продукта **2** при этом составляет 62 %. Обработка спирта **2** метансульфохлоридом, а затем эфирным раствором бромида магния в одну синтетическую стадию давала бромид **3**, который использовали в медь(I)-катализируемой реакции кросс-сочетания с гомопропаргиловым спиртом. Диенол **4** далее стандартным образом переводили в соответствующий ТМС-эфир и восстанавливали путем обработки избытком изопропилмагнийхлорида в присутствии изопропоксида титана(IV) при температуре  $-78 \rightarrow -40$  °C (*Z/E* > 99 : 1). Удаление защитной группы давало диенол **5**, который в две стадии переводили соответствующий йодид **6**. Из йодида **6** получали соль фосфония **7**, которую использовали в реакции Виттига с акролеином. Для достижения высокой стереоселективности в реакции олефинирования в качестве основания использовался NaHMDS.

Следует отметить, что нами также отработаны способы превращения спирта **4** в диенол **5** и спирта **5** в соль фосфония **7** без очистки промежуточных продуктов.

Разработанная схема синтеза позволяет получать тетраен **1** с высоким общим выходом (18 %), предполагает применение доступных реагентов

и растворителей и пригодна для наработки мультиграммовых количеств целевого продукта.

#### Библиографические ссылки

1. *Е.Н. Усанова, Н.С. Блинова, Е.А. Матюшенко, Ю.Ю. Козырьков, В.Е. Исаков, Ю.А. Коник.* Создание синтетических феромонных препаратов для мониторинга численности зеленой дубовой листовёртки и зимней пяденицы // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. научн. трудов ИЛ НАН Беларуси, Выпуск 73. - Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 2013. – 620 с. С. 562-571.
2. *R. Albert, H. Bogenschütz, E. König.* Untersuchungen zum Einsatz von Sexuallockstoff – Fallen zur Überwachung des Massenwechsels von *Operophtera brumata* L (Lepid, Geometridae) // Zeitschrift für angew. entomol.-1984.-V. 98, № 3.-P. 286-298.
3. *W.L. Roelofs, A.S. Hill, C.E. Linn, J. Meinwald, S.C. Jain, H.J. Herbert, R.F. Smith.* Sex pheromone of the winter moth, a geometrid with unusually low temperature pre-copulatory responses // Science.-1982.-V. 217, №. 13.-P. 657-659.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В АЛКОГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Е. Д. Шевченко, С. В. Черепица, С. Н. Сытова, А. Н. Коваленко

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
shauchenkayauheni@gmail.com; lidia.sobolenko@gmail.com;  
svcharapitsa@tut.by; s\_sytova@mail.ru; anton.kavalenka@gmail.com  
науч. рук. – Л. Н. Соболенко, ассист.*

В работе описана сравнительная характеристика методов количественного анализа в газовой хроматографии в рамках определения количественного содержания летучих компонентов в различных алкогольных напитках.

**Ключевые слова:** количественный анализ; этанол – внутренний стандарт; газовая хроматография.

Контроль качества и безопасности алкогольной продукции является неотъемлемой частью работы лабораторий по анализу пищевой продукции. Одним из наиболее важных показателей безопасности, регламентируемых во всем мире, является количественное содержание летучих компонентов (токсичных микропримесей). Одним из наиболее опасных исследуемых компонентов является метиловый спирт, величина предельного содержания которого нормируется для всех алкогольных продуктов [1-3]. Анализ алкогольной и этанолсодержащей продукции выполняется преимущественно газохроматографическим методом с пламенно-ионизационным детектированием. Для количественных расчетов в странах ЕАЭС применяется метод внешнего стандарта [4], в остальных странах – метод внутреннего стандарта [5, 6]. В качестве вещества внутреннего стандарта используются изомеры амилового спирта [5, 6]. В работах [7-10] был предложен инновационный метод количественного определения летучих компонентов в этанолсодержащей продукции, основанный на использовании этанола, который заведомо присутствует во всех спиртосодержащих продуктах, в качестве внутреннего стандарта.

Целью работы являлось сравнение традиционного и разработанного методов внутреннего стандарта для количественного определения летучих компонентов в широком спектре алкогольных напитков и этанолсодержащих продуктов.

Все индивидуальные летучие компоненты (ацетальдегид, метилацетат, этилацетат, метанол, 2-пропанол, 1-пропанол, изобутанол, 2-пентанол, 1-бутанол, изоамилол) с чистотой не менее 99,5% были приобретены в Sigma Aldrich (США). Алкогольные напитки были приобре-

тены в коммерческих источниках. Описание образцов, приобретенных для исследования, представлено в таблице 1.

Таблица 1.

**Образцы алкогольной и этанолсодержащей продукции.**

Объемное содержание этанола, %												
Виски	Бренди	Ром	Джин	Граппа	Текила	Спирт этиловый	Водка	Саке	Бурбон	Ракия	Скотч	Кальвадос
43	40	40	47	40	38	96	40	14,5	40	40	40	96

Приготовление стандартных водно-этанольных растворов выполнялось гравиметрическим методом в соответствии с требованиями стандарта ASTM 4307 [11]. Концентрации летучих компонентов в стандартных растворах *SS-A*, *SS-B*, *SS-C*, *SS-D*, *SS-E*, *SS-F*, *SS-G* и *SS-H* составили порядка 5000, 1000, 500, 250, 200, 50, 25 и 10 мг/л АА (Absolute Alcohol – АА), соответственно. Во все стандартные растворы и исследуемые образцы алкогольной продукции вносился 2-пентанол таким образом, чтобы его концентрация составила порядка 500 мг/л АА.

Измерения стандартных растворов и образцов алкогольной продукции проводились на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.1 по аналогии с [8]. Измеренные хроматограммы стандартных растворов и некоторых алкогольных напитков представлены на рис 1 и 2, соответственно.

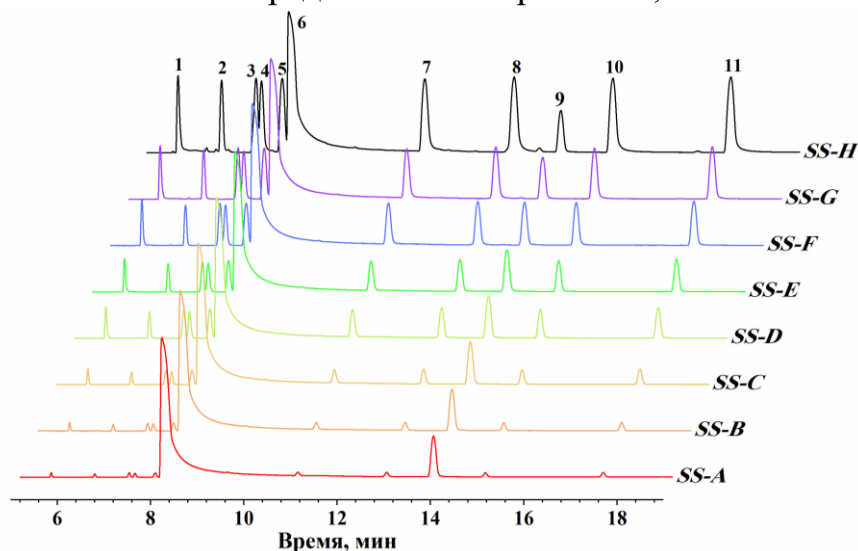


Рис. 1 Хроматограммы стандартных растворов. 1 – ацетальдегид, 2 – метилацетат, 3 – этилацетат, 4 – метанол, 5 – 2-пропанол, 6 – этанол, 7 – 1-пропанол, 8 – изобутанол, 9 – 2-пентанол, 10 – 1-бутанол, 11 – изоамилол

Обработка полученных результатов и дальнейший расчет значений концентраций в случае традиционного метода осуществлялся согласно

[5, 6], в случае разработанного метода согласно алгоритму, описанному в [7-10]. Результаты сравнения традиционного и разработанного методов, полученные в ходе эксперимента, представлены в таблице 2.

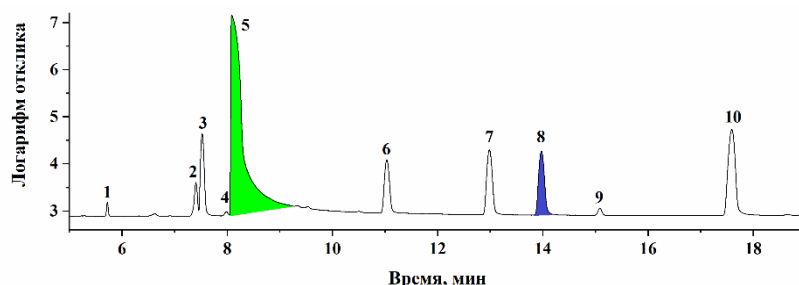


Рис. 2 Хроматограмма образца текилы. 1 – ацетальдегид, 2 – этилацетат, 3 – метанол, 4 – 2-пропанол, 5 – этанол, 6 – 1-пропанол, 7 – изобутанол, 8 – 2-пентанол, 9 – 1-бутанол, 10 – изоамилол

Таблица 2.

**Результаты сравнения разработанного и традиционного методов внутреннего стандарта**

Компонент	Относительная разность между результатами, %												
	Виски	Бренди	Ром	Джин	Граппа	Текила	Спирт этиловый	Водка	Саке	Бурбон	Ракия	Скотч	Кальвадос
ацетальдегид	-0.2	0.3	-0.1	0.9	-1.3	1.8	-1.6	0.2	-0.5	-0.9	0.1	0.7	0.2
метилацетат	-*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
этилацетат	-0.3	0.3	-0.2	0.8	-1.4	1.6	-	-	-0.5	-0.9	0.1	0.7	0.1
метанол	-0.2	0.3	-0.1	0.9	-1.3	1.8	-1.7	-	-0.4	-0.8	0.2	0.7	0.2
2-пропанол	-0.2	0.3	-0.1	0.9	-1.3	1.7	-1.6	0.2	-	-0.9	0.1	0.7	0.1
1-пропанол	-0.2	0.3	-0.1	0.9	-1.3	1.7	-	0.1	-0.5	-0.8	0.1	0.7	0.2
изобутанол	-0.2	0.3	-0.1	0.9	-1.4	1.7	-	-	-0.5	-0.9	0.1	0.7	0.1
1-бутанол	-0.2	0.3	-0.1	1.0	-1.4	1.7	-	-	-0.5	-0.9	0.1	0.7	0.1
изоамилол	-0.2	0.3	-0.1	1.0	-1.3	1.7	-	-	-0.5	-0.8	0.2	0.7	0.2

\* «->» летучий компонент отсутствовал в исследуемом образце

Предложенный метод продемонстрировал следующие преимущества перед традиционным методом внутреннего стандарта:

- отсутствие необходимости проведения процедуры внесения вещества внутреннего стандарта, что позволяет снизить материальные, трудовые и временные затраты при испытаниях образцов алкогольной продукции;

- отсутствие необходимости проведения процедуры предварительного установления объемного содержания этилового спирта в исследуемом этанолсодержащем образце, поскольку метод позволяет получать значения концентраций летучих компонентов в

законодательно требуемой размерности мг/л АА напрямую из газохроматографических измерений.

Анализ результатов, полученных для традиционного и разработанного методов внутреннего стандарта, при исследовании широкого спектра различных типов алкогольной продукции (виски, бренди, граппы, водки, скотча, бурбона, ракии, кальвадоса, sake, спирта этилового ректифицированного, рома, джина и текилы), содержавших этиловый спирт в объемном количестве от 14,5 до 96%, показал, что различие в результатах измерений, полученными двумя методами – разработанным и традиционным методом внутреннего стандарта – не превышает  $\pm 2$  % относительных.

#### Библиографические ссылки

1. Commission Regulation (EC), 2008. No 110/2008 of 15 January 2008 on the definition, description, presentation, labelling and the protection of geographical indications of spirit drinks and repealing Council Regulation (EEC) No 1576/89
2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (утверждён решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года №880). Москва, – 2011.
3. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 047/2018 «О безопасности алкогольной продукции» (принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 5 декабря 2018 года №98). – 2018.
4. СТБ ГОСТ Р 51698-2001. Водка и спирт этиловый из пищевого сырья. Газохроматографический экспресс-метод определения содержания токсичных микропримесей. – Введ. 01.11.2002 – Минск: Гос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов, 2002. – 20 с.
5. Commission Regulation (EC), 2000. No 2870/2000 of 19 December 2000 laying down Community reference methods for the analysis of spirits drinks
6. AOAC Official Methods 972.10. Alcohol (higher) and ethyl acetate in distilled liquors. Alternative gaschromatographic method.
7. Charapitsa, S. V. Direct determination of volatile compounds in spirit drinks by gas chromatography / S.V. Charapitsa [et. al.]. – J. Agric. Food Chem., 2013. – Vol. 61, №1. – 2950-2956 p.
8. Charapitsa, S. V. Single-laboratory validation of a gas chromatographic method of direct determination of volatile compounds in spirit drinks: need for an improved interlaboratory study / S. V. Charapitsa, S. N. Sytova, A. L. Korban, L. N. Sobolenko – Journal of AOAC International, 2019. – Vol. 102, №2 – 669-672 p.
9. Charapitsa, S. Interlaboratory study of ethanol usage as an internal standard in direct determination of volatile compounds in alcoholic products / S. Charapitsa [et. al.]. – BIO Web Conf., 2019. – Vol. 15. – 8 p.
10. Черепица, С. В. Прямое определение летучих компонентов в алкогольной продукции/ С. В. Черепица [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2020. – №1. – С. 74-87.
11. ASTM D4307-99. Practice for preparation of liquid blends for use as analytical standards. Philadelphia, PA, USA. 3 p.



# ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА ФИБРИН И ПРОЦЕССЫ ЕГО ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА

М. А. Шевченко, Е. А. Болотина, Е. А. Чернявский

*Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», г. Минск;*

*marias3753@gmail.com*

*науч. рук. – Е. А. Болотина*

Сердечно-сосудистые патологии такие, как например тромбозы, входят в топ самых распространенных в мире, трудно поддаются профилактике и не редко приводят к летальному исходу. На сегодняшний день разработаны прогрессивные методы локального воздействия на патологические зоны, в которых свободной циркуляции крови препятствуют тромбы. Одним из подходов является использование импульсного низкочастотного ультразвука для разрушения кровяного сгустка [1, 2]. Целью данной работы являлось изучение процессов, происходящих при разрушении плазменного сгустка низкочастотным импульсным ультразвуком (25,3 кГц) *in vitro*. Проведен анализ продуктов разрушения сгустка белковой природы методами капиллярного электрофореза (КЭ), гель-проникающей высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и электрофореза в полиакриламидном геле (ПААГ-электрофорез).

**Ключевые слова:** низкочастотный ультразвук; плазменный сгусток; фибриновая сеть; протеолиз.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАТЬ

К 3 мл донорской плазмы прибавляли 600 мкл раствора тромбина (25 ед/мл) и термостатировали при 37 °С в течении часа. Полученный сгусток отмывали 5 раз в 5 мл буфера 10 мМ NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,15 М NaCl (рН 7,4) и помещали в полипропиленовую пробирку, содержащую равный исходной плазме объем данного буфера при 37 °С. Обработку проводили при помощи ультразвуковой системы «Пульсар» частотой 25,3 кГц и мощностью 80 Вт (БНТУ, Минск). Через 15, 30, 45 и 60 минут после начала обработки отбирали пробы для анализа методами КЭ, ПААГ-электрофореза и ВЭЖХ. Перед анализом методом ПААГ-электрофореза пробы обрабатывали диссационной смесью с и без β-меркаптоэтанола (β-МЭ).

Оставшуюся после ультразвукового воздействия часть сгустка отмывали в 5 мл изотонического раствора NaCl. После этого сгусток переносили в полипропиленовую пробирку, содержащую 1 мл 1 М NaOH и медленно нагревали при 60 °С в течение 30 минут.

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ВЫВОДЫ

В ходе визуального контроля процесса воздействия низкочастотного ультразвука (УЗ) на плазменный сгусток, было замечено, что исследуемый объект значительно уменьшался в размерах, теряя порядка 3/4 своего объема через 60 минут обработки. Уменьшение размеров могло являться следствием разрушения фибриновой сети плазменного сгустка.

Для анализа высвобождающихся белково-пептидных продуктов был проведен анализ методом КЭ. Результаты анализа проб, отобранных в процессе УЗ обработки представлены на рисунке 1.

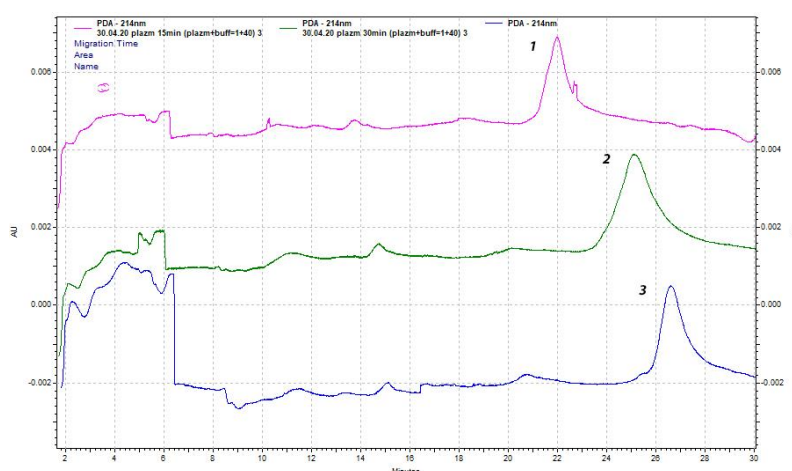


Рис. 1. Электрофореграммы продуктов разрушения плазменного сгустка:

спустя 15 (1), 30 (2) и 45 минут (3) ультразвукового воздействия. Условия: капилляр 50 мкм ×32 см ×21 см (эффективная длина), нанесение (0,5 psi, 7 сек), 0,1 М боратный буфер с pH 10,2, нормальный режим, напряжение 8 кВ, детекция при 214 нм.

Из представленных данных видно, что увеличение времени обработки плазменного сгустка УЗ, приводило к увеличению времени удерживания пика, соответствующего основной белковой фракции на электрофореграммах продуктов разрушения (рисунок 1). Так как время удерживания пиков белковых компонентов на электрофореграммах обуславливается их электрофоретической подвижностью, которая зависит от молекулярной массы, а также от заряда, увеличение времени удерживание могло являться следствием того, что:

- в процессе УЗ обработки происходила агрегация белковых молекул, высвобождающихся из фибринового сгустка в раствор;
- в УЗ поле происходило увеличение поверхностного заряда белковых молекул.

Для установления возможности агрегации белковых молекул в УЗ поле был проведен анализ продуктов разрушения плазменного сгустка

методом гель-проникающей ВЭЖХ. Хроматограммы образцов, отобранных в процессе УЗ обработки, приведены на рисунке 2.

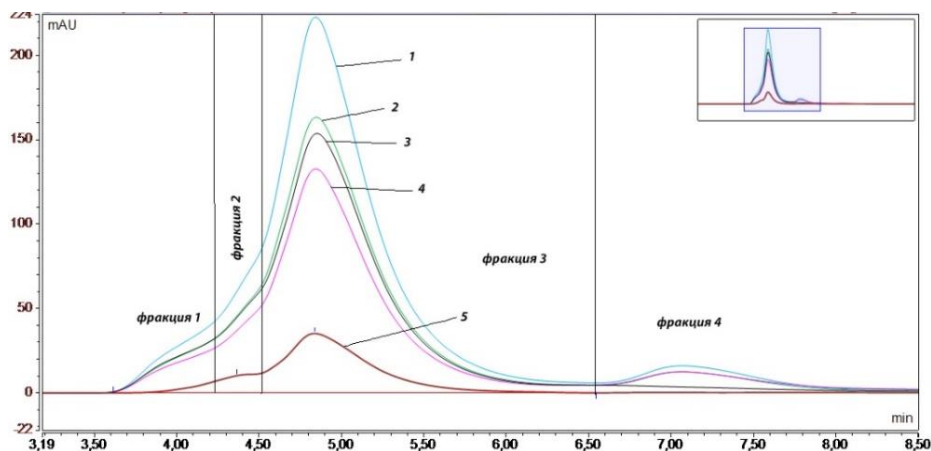


Рис. 2. Хроматограммы продуктов разрушения плазменного сгустка:

спустя 15 (4), 30 (3), 45 (2) и 60 минут (1) после начала ультразвуковой обработки, хроматограмма бычьего сывороточного альбумина (5). Колонка «Zorbax GF-250» 250×4,6 мм, буфер 0,04 М  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 0,01 М  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , 0,5 М  $\text{NaCl}$ , скорость потока 0,5 мл/мин, объем пробы – 20 мкл, температура 20 °С. Детекция при 280 нм.

В ходе анализа методом ВЭЖХ проб, отобранных в процессе озвучивания модельного плазменного сгустка, были выделены 4 основные белковые фракции, переходящие в буферный раствор из плазменного сгустка. Анализ хроматограмм показал, что с течением времени озвучивания увеличивалась концентрация белка в растворе, при этом процентное соотношение различных фракций практически оставалось неизменным и составляло в среднем 7,24, 9,70, 75,03 и 8,03 % для фракций 1, 2, 3 и 4, соответственно. Такое соотношение белковых фракций характерно для всех проанализированных проб (риунок 2).

Как видно из представленных выше хроматограмм, в процессе ультразвукового воздействия не происходило изменение молекулярных масс белковых компонентов, что подтверждается одинаковыми временами удерживания указанных выше белковых фракций всех исследуемых образцов. Агрегации/лизиса белковых фракций со временем также не происходило, однако, наблюдалось их накопление в процессе озвучивания.

Для того, чтобы определить, происходило ли разрушение фибриновой сети под действием ультразвука или инициирование процессов протеолитической деградации фибринового сгустка, был проведен анализ исследуемых образцов методом ПААГ-электрофореза. Результаты представлены на рисунке 3.

Из электрофореграммы видно, что количество отдельных фракций превышало количество, полученное методом гель-проникающей хрома-

тографии (на хроматограммах различимы лишь 4 фракции). К примеру, на дорожке 9 четко различимы 8 отдельных фракций (рисунок 3).

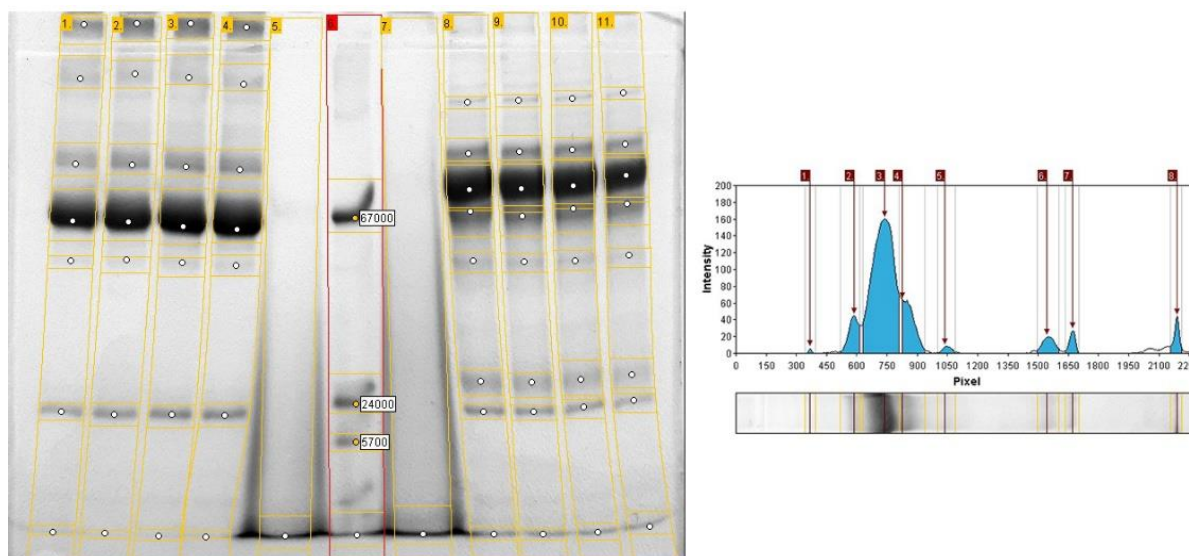


Рис. 3. Электрофореграмма (слева) проб без  $\beta$ -МЭ (полосы 1-5) и с  $\beta$ -МЭ (полосы 7-11).  
Справа – денситограмма полосы 9:

Электрофореграммы образцов спустя 15 (полосы 1,8), 30 (полосы 2,9), 45 (полосы 3,10) и 60 (полосы 4,11) мин после начала УЗ обработки. Полосы 5,7 – сгусток, оставшийся после УЗ обработки – не наблюдалось четко выраженных белковых фракций, не удалось определить их состав. Полоса 6 - смесь стандартов (сверху вниз): альбумин (67 кДа), трипсин (24 кДа) и инсулин (5,7 кДа).

Видно, что течением времени озвучивания молекулярная масса полученных фракций не изменялась, что также говорит о том, что в процессе УЗ воздействия не происходило разрушения пептидных связей фибрина фибриновой сети и/или других белков плазмы крови. Возможно, воздействие УЗ приводило преимущественно к высвобождению белков плазмы крови, которые оказались внутри фибриновой сети в процессе формирования плазменного сгустка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что уменьшение физического размера плазменного сгустка в УЗ поле происходило в результате высвобождения в раствор находящихся в порах фибриновой сети белков плазмы. В процессе УЗ-воздействия не наблюдалось изменения молекулярной массы высвобождающихся из плазменного сгустка белковых фракций, что свидетельствовало об отсутствии разрушающего действия УЗ на пептидную связь и/или инициирования процессов протеолиза.

### Библиографические ссылки

1. *Минченя В.Т. и др.* Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов // Доклады БГУИР. 2016. № 101 (7). С. 300–303.
2. *Калинин Р. Е. и др.* Ультразвуковая динамика лизиса тромба как объективный критерий эффективности антикоагулянтной терапии при венозных тромбозах // Хирургия. 2016. № 2. С. 61–65.
3. *Sambrook J., Russell D.* SDS-Polyacrylamide Gel Electrophoresis of Proteins // Cold Spring Harbor Protocols, 2006.

# КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПОЛИМОЛИБДАТОВ С ФУНКЦИЕЙ АККУМУЛИРОВАНИЯ ФОТОГЕНЕРИРОВАННОГО ЗАРЯДА

В. Б. Щербакова, Л. Ю. Садовская, А. С. Логвинович

Белорусский государственный университет, г. Минск;  
valya1998@mail.ru.

науч. рук. – Т. В. Свиридова, д-р хим. наук, проф.

Показано, что модификация частиц диоксида титана и оксидных систем  $TiO_2$ - $h$ - $MoO_3$  гетерополимолибдатами разных составов и в разных комбинациях придает фотокатализаторам способность сохранять окислительную активность в течение длительного времени после прекращения ультрафиолетового облучения, путем накопления фотосгенерированного заряда. При этом гетерополимолибдаты не только приводят к накоплению фотоиндуцированного заряда, но и к конвертированию пероксида водорода, образующегося при окислении восстановленных форм гетерополимолибдатов кислородом воздуха, в высокоактивные гидроксильные радикалы.

**Ключевые слова:** диоксид титана; триоксид молибдена; фотохимия; поликонденсация оксокислот переходных металлов; гетерополимолибдаты; ультрафиолетовое излучение.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка *ecologically-friendly* методов очистки гидро- и атмосферы от стойких органических загрязнителей – одно из основных направлений современной химии. Процессы классического фотокатализа соответствуют всем принципам технологий синтеза. К тому же основным преимуществом фотокатализа по сравнению с альтернативными (классическими химическими) способами очистки является использование неисчерпаемого ресурса солнечного излучения. Диоксид титана модификации анатаз – наиболее часто используемый в настоящее время фотокатализатор для создания систем безреагентной очистки водных и воздушных сред. Исследования, проводимые на протяжении последних лет на химическом факультете БГУ, продемонстрировали возможность создания на основе  $TiO_2$ , модифицированного оксидами переходных элементов выражено слоистого строения ( $h$ - $MoO_3$ ,  $h$ - $WO_3$ , *xerogel*- $V_2O_5$ ) фотоаккумулирующих систем [1]. Накопление фотогенерируемого в  $TiO_2$  в ходе актиничного облучения заряда в системах такого рода происходит в матрице оксида переходного металла за счет образования в катионной подрешетке частично восстановленных центров, способных в темновых условиях к реверсивному окислению кислородом воздуха с образованием соединений пероксидного типа [2, 3]. Можно предположить, что комбинирование композита  $TiO_2$ - $h$ - $MoO_3$  с гетерополиметаллатом (содержащим ионы  $Ni^{2+}$ ) в рамках единой системы позволит расширить границы практического

применения композита, обеспечив возможность его функционирования в рамках механизма фентоновского типа, результатом реализации которого будет генерация на гетерооксидной поверхности свободных ОН-радикалов (высокоактивных окислительных агентов).

Целью настоящего исследования являлось изучение возможности создания на основе диоксида титана и гетероструктур  $\text{TiO}_2$ -*h*- $\text{MoO}_3$ , модифицированных гетерополимолибдатом никеля, композитных систем с выраженной способностью к аккумулялированию фотогенерированного заряда.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве основы гибридной системы использовались золи  $\text{TiO}_2$ , полученные гидролизом  $\text{TiCl}_4$  в водно-аммиачной среде, представляющие собой, по данным рентгенографического исследования (дифрактометр PANalytical), анатаз с размером областей когерентного рассеяния 3–4 нм, в виде частиц со средним размером 30 нм (электронный микроскоп LEO 906E). Золи дисперсного триоксида молибдена (размер частиц 3-10 мкм) получали из водных растворов полимолибденовой кислоты в процессе сольвотермического синтеза [1]. Синтез молибдоникколата аммония выполняли по методике [4]. Исследование морфологии поверхности фотокаталитических слоев проводили с помощью атомно-силовой микроскопии (микроскоп NT-206). Фотокаталитическую и наведенную окислительную активность индивидуального диоксида титана и гетерооксидных систем на его основе определяли в условиях облучения ртутной лампой ( $\lambda_{\text{макс}} = 365$  нм), измеряя величину диффузного отражения (денситометр ДО-1) в области поглощения красителя Родамина 6G, нанесенного непосредственно на поверхность фотокатализатора; полученные значения оптической плотности пересчитывали по формуле Кубелки-Мунка в величины, пропорциональные поверхностной концентрации красителя и нормировались на величину исходной концентрации ( $\Gamma/\Gamma_0$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что хемосорбция гетерополимолибдатов на поверхности частиц нанодисперсного диоксида титана существенно сказывается на его гидрофильности: гидрофильность пленкококазывается в 2 раза ниже гидрофильности, характерной для пленок индивидуального  $\text{TiO}_2$ . Следует отметить, что если в процессе облучения гидрофильность последних растет (вплоть до значений краевого угла смачивания 2, характерных для супергидрофильных поверхностей), то гидрофильность поверхности пленок на основе модифицированного  $\text{TiO}_2$  даже несколько уменьшается

(рисунок 1), что делает покрытия такого рода перспективными с точки зрения адсорбции микроорганизмов.

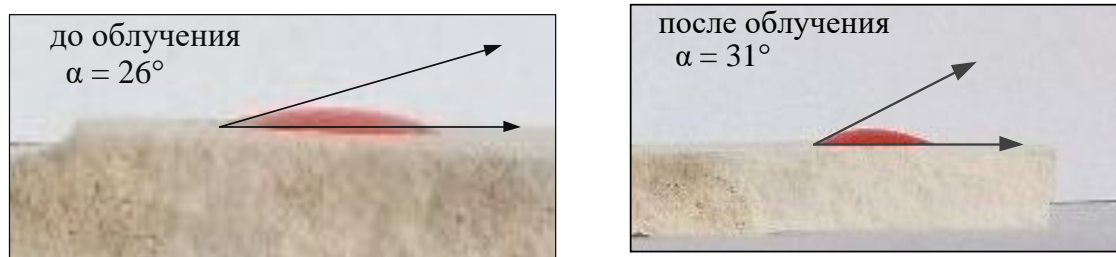


Рис. 1. Изображение капли красителя на поверхности фотокатализатора «TiO<sub>2</sub>-гетерополимолибдат никеля» до и после облучения

Результаты исследования микрорельефа композитных пленок «TiO<sub>2</sub>-гетерополимолибдат» свидетельствуют о наличии у фотокатализаторов высокоразвитой поверхности (средняя высота отклонения профиля для которой составляет 425 нм – рисунок 2), а относительно высокие значения краевого угла позволяют предположить наличие гидрофобного вклада со стороны адсорбированных полиоксометаллатов.

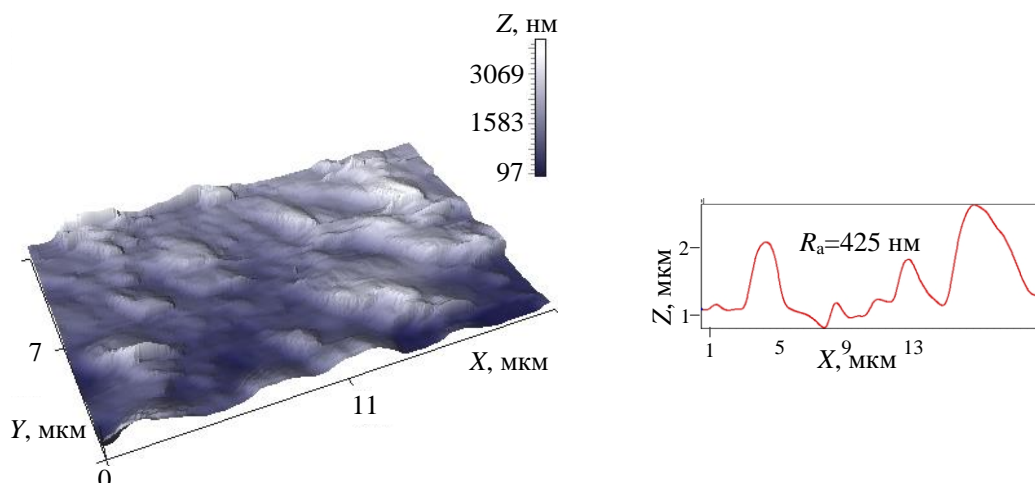


Рис. 2. Микрорельеф поверхности фотокаталитических слоев, полученных из суспензионных растворов «TiO<sub>2</sub>-гетерополимолибдат никеля»

Эффективное межфазное разделение заряда удастся обеспечить только при использовании в рамках единой системы как гетерооксидного композита TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>, так и химически иммобилизованного гетерополимолибдата. Действительно, как показало выполненное исследование (рисунок 3), комбинирование в рамках единой системы как гетерооксидного композита TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>, так и гетерополимолибдата никеля способствует эффективному накоплению фотогенерированного заряда (фотогенерируемый в диоксид-титановой матрице заряд в процессе акти-



ничного излучения в такого рода системах не расходуется на прямое фотохимическое окисление красителя, а эффективно накапливается).

С другой стороны, если в условиях актиночного облучения система «TiO<sub>2</sub>–MoO<sub>3</sub>–гетерополимолибдат» характеризуется высокой собственной фотоактивностью по отношению к адсорбированному зондовому красителю, то система TiO<sub>2</sub>–NiMo<sub>6</sub>O<sub>24</sub>H<sub>6</sub><sup>4-</sup>/MoO<sub>3</sub>–NiMo<sub>6</sub>O<sub>24</sub>H<sub>6</sub><sup>4-</sup> практически не проявляет фотокаталитической активности (рисунок 3 а), и в то же время демонстрирует высокую окислительную активность в темновых условиях (рисунок 3 б), что свидетельствует о высокой эффективности разделения заряда и перспективности использования фотокатализаторов такого рода для создания фотоаккумулирующих самоочищающихся и самодезинфицирующих систем.

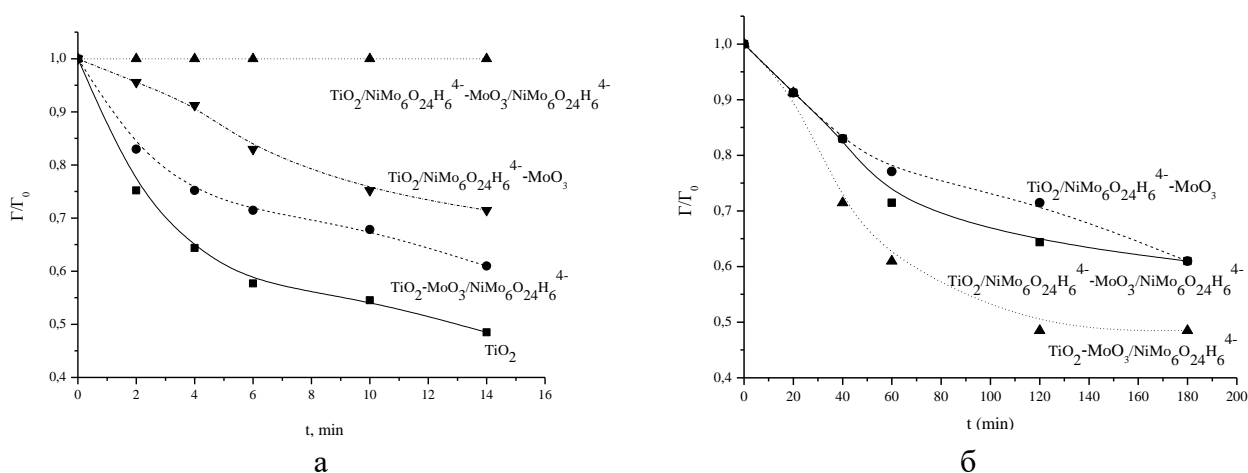


Рис. 3. Окислительная активность пленок на основе нанодисперсного TiO<sub>2</sub> и гетерооксидных композитов TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>, модифицированных гетерополимолибдатами в условиях актиночного облучения (а) и в темновых условиях (б)

Система TiO<sub>2</sub>–NiMo<sub>6</sub>O<sub>24</sub>H<sub>6</sub><sup>4-</sup>/MoO<sub>3</sub>–NiMo<sub>6</sub>O<sub>24</sub>H<sub>6</sub><sup>4-</sup>, в которой как диоксид-титановая фаза, так и фаза триоксида молибдена модифицированы гетерополимолибдатом оказывается в своем роде «чистым» аккумулятором фотогенерированного заряда без его расходования на прямой фотохимический процесс. Последнее оказывается возможным при условии блокирования свободных ОН-групп на поверхности оксид-титановой фазы свободным гетерополимолибдатом при условии отсутствия блокирования гетерооксидных контактов TiO<sub>2</sub>–MoO<sub>3</sub>.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность создания перспективных фотокатализаторов с пролонгированной активностью за счет комбинации нанодисперсного диоксида титана и триоксида молибдена с полимолибдатами, содержащими ионы металлов, способные к участию в реверсивных процессах «окисление-восстановление».

### Библиографические ссылки

1. *Sviridova T.V., Stepanova L.I., Sviridov D.V.* Nano- and microcrystals of molybdenum trioxide and metal-matrix composites on their basis In: *Molybdenum: Characteristics, Production and Applications* / Ed. by M. Ortiz et al. Nova Sci. Publishers. NY, 2012. P. 147–179.
2. *Shchukin D.G., Sviridov D.V.* Photocatalytic processes in spatially confined micro- and nanoreactors // *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 2006. V.7. P. 23–26.
3. *Sviridova T.V., Sadovskaya L.Yu., Shchukina E.M., Logvinovich A.S., Shchukin D.G., Sviridov D.V.* Nanoengineered thin-film  $\text{TiO}_2/h\text{-MoO}_3$  photocatalysts capable to accumulate photoinduced charge // *J. Photochem. Photobiol. A:Chem.* 2016 V.327. P.44-50.
4. Руководство по неорганическому синтезу: в 6 т. / Под редакцией Г. Брауэр. – М.: Мир, 1985-1986. – 6 т.

# СТАНДАРТНЫЕ ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕМОЗОЛОМИДА В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ И ГАЗООБРАЗНОМ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Я. Н. Юркштович

Белорусский государственный университет, г. Минск;

*yanayurksht@gmail.com*

науч. рук. – А. В. Блохин, д-р хим. наук, проф.

В рамках приведенного исследования были получены значения стандартных энтальпий образования цитостатического препарата темозоломида в кристаллическом и газообразном агрегатных состояниях. Для сравнения и анализа полученных значений энтальпий образования была выполнена параметризация модели электростатического потенциала для расчета и оценки энтальпий сублимации темозоломида и родственных ему соединений.

Энергия и энтальпия сгорания темозоломида в кристаллическом агрегатном состоянии были определены методом бомбовой калориметрии сгорания. Рассчитанное с учетом поправок Уошборна [1] на базе полученных экспериментальных данных значение энтальпии образования составило  $\Delta_f H_{298}^\circ(\text{кр}) = -(63.47 \pm 0.99) \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

Энтальпия образования темозоломида в состоянии идеального газа была определена с использованием композитного квантово-химического метода G4 [2]. Расчет осуществлялся в рамках полуэмпирического метода гомодесмических реакций. Полученное значение энтальпии образования составило  $\Delta_f H_{298.15}^\circ(\text{г}) = 75.9 \pm 8.8 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

Стандартная энтальпия сублимации темозоломида была рассчитана в рамках модели электростатического потенциала [3]. Для параметризации модели были использованы параметры молекулярной поверхности 40 модельных соединений, структурно подобных темозоломиду. Характеристики модели были получены в результате кросс-валидации Монте-Карло. Полученное значение энтальпии сублимации темозоломида составило  $\Delta_{\text{sub}} H_{298.15}^\circ = 125.2 \pm 8.0 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

Полученные результаты согласуются между собой в пределах погрешностей, что говорит об их достоверности.

**Ключевые слова:** темозоломид; энтальпия образования; энтальпия сублимации; G4; энтальпия сгорания.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач физической химии является определение термодинамических свойств веществ. Значения термодинамических параметров, таких как энтальпия сгорания и образования, энергия Гиббса, энтропия, теплоемкость и др. используются на практике для оценки теплотворной способности топлива, принципиальной возможности протекания химической или электрохимической реакции, расчета химических равновесий, составления

тепловых и материальных балансов реакторов и эксергетического анализа систем. Наравне с экспериментальными методиками определения вышперечисленных параметров актуальна разработка и поиск методов расчета свойств вещества на основе структурных данных его молекулы. Возможность *ab initio* расчета свойств веществ позволяет перейти к направленному синтезу соединений, что существенно сокращает время и затраты, выделенные на проведение исследований.

Темозоломид – это цитостатический препарат, широко применяемый в терапии трудно поддающихся лечению хирургическим путем злокачественных образований [4]. В рамках настоящего исследования были определены энтальпии образования темозоломида в кристаллическом и газообразном агрегатных состояниях, а также выполнена параметризация модели для расчета энтальпии сублимации темозоломида при  $T = 298.15$  К. Следует также отметить, что в литературе не имеется сведений о термодинамических параметрах темозоломида, что актуализирует их определение.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Энтальпия сгорания темозоломида определена в автоматическом калориметре сгорания В-08-МА («Эталон», г. Алма-Ата) с изотермической оболочкой и стационарной бомбой. Объем калориметрической бомбы –  $320$  см<sup>3</sup>, калориметрического сосуда –  $5.250$  дм<sup>3</sup>. Температуры термостатируемой оболочки калориметра и содержащейся в калориметрическом сосуде воды измерялись платиновыми термометрами сопротивления ( $R = 500$  Ом). Точность поддержания температуры термостата составляла  $\pm 0.02$  град. Энергетический эквивалент калориметра при подъеме температуры  $0.81$  К был определен из серии опытов по сжиганию эталонной бензойной кислоты. По результатам градуировки калориметра точность определения энтальпии сгорания оценивается в  $\pm 0.02$  %. Взвешивание платинового тигля, платиновой запальной проволоки и сжигаемых веществ производилось на электронных весах «Mettler-ToledoAG-245» с точностью до  $10^{-5}$  г.

Перед проведением опытов по сжиганию порошок темозоломида выдерживался в эксикаторе над пятиокисью фосфора. Навеска порошка темозоломида сжигалась в герметично запаянном пакете из полимерного материала, помещенном на платиновую запальную проволоку диаметром  $d = 0.05$  мм. Все операции по подготовке образца к сжиганию проводились на воздухе. До начала опыта в калориметрическую бомбу добавлялся  $1$  см<sup>3</sup> воды для насыщения системы водяным паром. Сжигание образца проводилось в атмосфере кислорода ( $\sim 30$  атм). Точное давление кислорода в системе определялось по разности масс пустой и заполненной калориметрической бомбы (точность взвешивания составила  $\pm 0.02$  г). Для введения поправки на тепло-

ту окисления азота, являющегося примесью в кислороде и входящего в состав темозоломида, конденсат, образовавшийся в бомбе, количественно переносился в химический стакан и оттитровывался 0.1 н раствором NaOH.

Все данные считывались с калориметра при помощи персонального компьютера. Начальный и конечный периоды составили 20 отсчетов, а главный – 25 (интервал между отсчетами 30 с).

## РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Для расчета энтальпии образования темозоломида в состоянии идеального газа была составлена группа гомодесмических (ГДР) реакций с участием различных производных тетразолов и азотистых оснований. Для каждой молекулы-участницы ГДР имеются надежные литературные данные по энтальпиям образования в состоянии идеального газа. С использованием ПО Gaussian 09 и композитного квантово-химического метода G4 [2] была выполнена оптимизация геометрий всех участвующих в реакциях молекул, расчет их полных энергий и наборов частот нормальных колебаний. Для учета ангармоничности колебаний был использован масштабирующий множитель  $SF = 0.9854$ .

Пересчет на энтальпию реакции при температуре  $T = 298.15$  К выполнен с привлечением методов статистической термодинамики.

Вычисления производились на выделенной виртуальной машине в облачном сервисе Google cloud platform с использованием 8 вычислительных ядер Intel Xeon Processor с тактовой частотой 2.0 GHz (до 2.7 GHz при пиковой нагрузке) и 52 Гб оперативной памяти.

Стандартная энтальпия сублимации  $\Delta_{\text{sub}}H_{298.15}^{\circ}$  была рассчитана в рамках модели электростатического потенциала [3] по уравнению:

$$\Delta_{\text{sub}}H = a(SA)^2 + b\sqrt{\sigma_{\text{tot}}^2} + c\Pi + d,$$

где  $SA$  – площадь молекулярной поверхности;  $\sigma_{\text{tot}}^2$  – мера сбалансированности положительного и отрицательного зарядов;  $\Pi$  – мера локальной полярности.

Для параметризации модели было отобрано 40 CHN и CHNO соединений, схожих по структуре с темозоломидом. К отобраным соединениям относились соединения таких классов органических веществ, как амиды, тетразолы, триазолы, диазолы, азотистые основания и др.

Для расчета СКО построенной модели использовалась кросс-валидация на основе метода Монте-Карло (Monte Carlo cross-validation). Для этого исходный набор данных несколько раз случайным образом разбивался на тестовый (Test) и обучающий (Training) в отношении (1:4). Обучающий набор использовался для параметризации модели, а тестовый для ее проверки. По-

лученные значения СКО усреднялись, а параметры итоговой модели были найдены по всему набору данных. Характеристики молекулярной поверхности молекул были получены с использованием программного обеспечения Multiwfn 3.7. Перед количественным анализом молекулярной поверхности была произведена оптимизация геометрий и расчет энергий молекул на уровне теории DFT(B3LYP)/6-31G+(2df,p) в программе Gaussian 09.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения стандартных энергии и энтальпии сгорания темозоломида в кристаллическом состоянии составили:

$$\Delta_c U^\circ = -(3161.3 \pm 0.6) \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\Delta_c H^\circ = -(3155.1 \pm 0.6) \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

Значение стандартной энтальпии образования темозоломида в кристаллическом состоянии составило:

$$\Delta_f H_{298}^\circ(\text{кр}) = -(63.47 \pm 0.99) \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

Результаты кросс-валидации исходных данных и параметры модели для расчета энтальпии сублимации темозоломида представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1.

Результаты кросс-валидации исходного набора данных

№ п/п	Коэффициент				СКО, кДж·моль <sup>-1</sup>	
	a·10 <sup>4</sup> , ккал·моль <sup>-1</sup> ·А <sup>-4</sup>	b	c·10 <sup>2</sup>	d, ккал·моль <sup>-1</sup>	Training	Test
1	2.294	2.786	8.548	-0.8129	7.33	5.84
2	2.264	2.814	4.674	-1.227	7.15	9.79
3	2.237	2.828	3.169	-0.9655	8.37	5.52
4	3.173	2.397	34.08	-4.679	8.25	11.2
5	2.311	2.787	13.39	-1.971	8.72	5.88

Среднеквадратичное отклонение результирующей модели является усредненным значением СКО, полученных в процессе кросс-валидации и составляет 7.97 кДж·моль<sup>-1</sup>.

Таблица 2.

Параметры модели для расчета стандартной энтальпии сублимации темозоломида

Коэффициент				СКО, кДж·моль	СКО, %
a·10 <sup>4</sup> , ккал·моль <sup>-1</sup> ·А <sup>-4</sup>	b	c	d, ккал·моль <sup>-1</sup>		
2.3797	2.7430	0.11646	-1.7052	7.97	8.09

Отклонения рассчитанных величин стандартных энтальпий сублимации от экспериментальных представлены на рисунке.

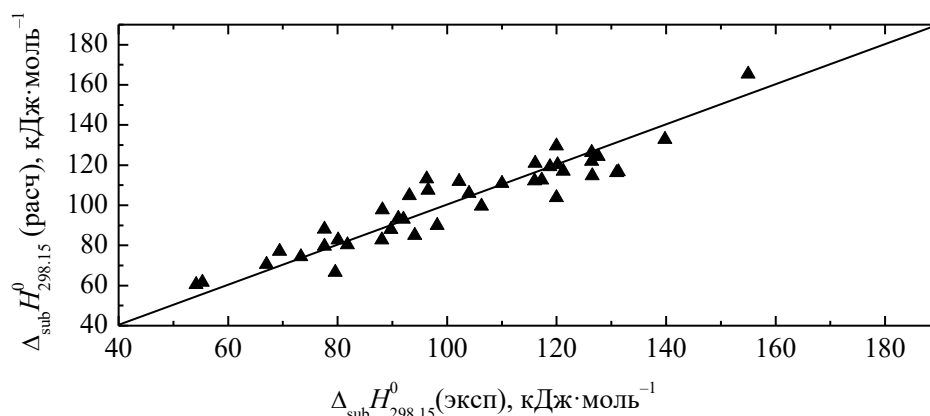


Рис. 1. Отклонения рассчитанных значений стандартных энтальпий сублимации от экспериментальных

На основании полученных параметров модели была рассчитана стандартная энтальпия сублимации темозоломида:

$$\Delta_{\text{sub}} H_{298.15}^{\circ} = 125.2 \pm 8.0 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$$

Тогда, по закону Гесса с учетом полученных ранее величин:

$$\Delta_f H_{298.15}^{\circ}(\Gamma) = 61.7 \pm 8.1 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$$

Усредненное значение энтальпии образования темозоломида в состоянии идеального газа, рассчитанное по методу ГДР (14 уравнений), составило:

$$\Delta_f H_{298.15}^{\circ}(\Gamma) = 75.9 \pm 8.8 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$$

Полученные величины энтальпий образования темозоломида согласуются в пределах погрешностей. Полученные значения энтальпий образования темозоломида в кристаллическом и газообразном агрегатных состояниях могут быть использованы при решении задач оптимизации процессов производства. Параметры модели электростатического потенциала, полученные в рамках исследования, могут быть использованы для оценки энтальпий сублимации темозоломида и родственных ему соединений.

#### Библиографические ссылки

1. Washburn E.W. Standard states for bomb calorimetry // J. Res. Nat. Bur. Standards. 1993. Т. 10. С. 525.
2. Curtiss L.A., Redfern P.C., Raghavachari K. Gaussian-4 theory // The Journal of Chemical Physics. 2007. Т. 126. № 8. С. 84108. DOI: 10.1063/1.2436888.
3. Peter Politzer, Jane S. Murray, M. Edward Grice. Calculation of heats of sublimation and solid phase heats of formation // Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics, 1997, 91(5), 923-928.
4. Friedman H.S., Kerby T., Calvert H. Temozolomide and Treatment of Malignant Glioma // Clin. Cancer Res., 2000, 6, 2585 - 2597.