

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

# ИНФОРМАТИКА

Специальный выпуск:  
«60 лет ОИПИ НАН Беларуси»

2025



## *Уважаемые коллеги!*

Первый специальный выпуск журнала «Информатика» в 2025 году приурочен к юбилейной дате – 60-летию образования государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси». В этом выпуске собраны разноплановые статьи по некоторым научным и научно-практическим направлениям деятельности института.

В статьях представлены как история, так и современные результаты, показывающие, что институт является лидером ряда важных направлений цифрового развития, информатики и искусственного интеллекта на постсоветском пространстве.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

---

# ИНФОРМАТИКА

## Informatika

---

---

Специальный выпуск: «60 лет ОИПИ НАН Беларуси», 2025

---

---

*Ежеквартальный научный журнал*

*Издается с января 2004 г.*

Учредитель и издатель – государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (ОИПИ НАН Беларуси)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

**Тузиков Александр Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,  
ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

З а м е с т и т е л ь г л а в н о г о р е д а к т о р а

**Ковалев Михаил Яковлевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,  
ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

**Абламейко Сергей Владимирович**, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, БГУ (Минск, Беларусь)

**Анищенко Владимир Викторович**, канд. техн. наук, доцент, ООО «СофтКлуб» (Минск, Беларусь)

**Бибило Петр Николаевич**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Бобов Михаил Никитич**, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

**Долгий Александр Борисович**, д-р техн. наук, проф., Высшая инженерная школа Бретани (Нант, Франция)

**Дудин Александр Николаевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Карпов Алексей Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, СПИИРАН (Санкт-Петербург, Россия)

**Килин Сергей Яковлевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик НАН Беларуси, Центр «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Краснопрошин Виктор Владимирович**, д-р техн. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Крот Александр Михайлович**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Кругликов Сергей Владимирович**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент, ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Лиходед Николай Александрович**, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Матус Петр Павлович**, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт математики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Скляр Валерий Анатольевич**, д-р техн. наук, проф., Университет Авейру (Авейру, Португалия)

**Сотсков Юрий Назарович**, д-р физ.-мат. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Стемпковский Александр Леонидович**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, ИПИМ РАН (Москва, Россия)

**Харин Юрий Семенович**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик НАН Беларуси, НИИ ППМИ БГУ (Минск, Беларусь)

**Черемисинова Людмила Дмитриевна**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Чернявский Александр Федорович**, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ (Минск, Беларусь)

**Ярмолик Вячеслав Николаевич**, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

## Редакционный совет

**Ефанов Дмитрий Викторович**, Российский университет транспорта (Московский институт инженеров транспорта) (Москва, Россия)

**Кумари Мадху**, Университетский центр исследований и разработок, Университет Чандигарха (Мохали, Пенджаб, Индия)

**Лазарев Александр Алексеевич**, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

**Лай Цунг-Чьян**, Азиатский университет в Тайчжуне (Китайская Народная Республика, Тайвань)

**Марина Нинослав**, Университет информационных наук и технологий им. Св. апостола Павла (Охрид, Македония)

**Меликян Вазген Шаваршович**, Национальный политехнический университет Армении (Ереван, Армения)

**Пеш Эрвин**, Зигенский университет (Зиген, Германия)

**Сингх Таджиндер**, Институт инженерии и технологий Сант Лонговал (Лонговал, Пенджаб, Индия)

**Ходаченко Максим Леонидович**, Институт космических исследований Австрийской академии наук (Грац, Австрия)

**Чиулла Карло**, Университет Эпока (Тирана, Албания)

**Штейнберг Борис Яковлевич**, Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия)

---

---

## ИНФОРМАТИКА

Специальный выпуск: «60 лет ОИПИ НАН Беларуси», 2025

---

---

Ответственный за выпуск *Мойсейчик Светлана Сергеевна*  
Редактор *Гончаренко Галина Борисовна*  
Компьютерная верстка *Бутевич Ольга Борисовна*

---

Сдано в набор 23.12.2024. Подписано в печать 27.01.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 19,6. Тираж 60 экз. Заказ 1.

---

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014. ЛП № 38200000016516 от 18.12.13. Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Беларусь.

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>Абламейко С. В.</b> Обработка изображений: 45 лет развития.....	7
<b>Андрианов А. М., Тузиков А. В.</b> Технологии молекулярного моделирования и искусственного интеллекта для разработки потенциальных лекарственных препаратов нового поколения, исследования в области биоинформатики и вычислительной биологии .....	20
<b>Бибило П. Н.</b> Логическое проектирование цифровых устройств .....	42
<b>Гецэвіч Ю. С., Лабанаў Б. М., Зяноўка Я. С., Латышэвіч Д. І.</b> Апрацоўка натуральнай мовы як аснова метадаў і алгарытмаў маўленчага ўзаемадзеяння камп’ютарных сістэм і чалавека .....	49
<b>Григянец Р. Б., Венгеров В. Н.</b> Автоматизация информационного обеспечения научных исследований и разработок в Национальной академии наук Беларуси .....	57
<b>Гущинский Н. Н., Ковалев М. Я., Розин Б. М., Сотсков Ю. Н., Шафранский Я. М.</b> Исследование операций.....	65
<b>Дмитриев В. А., Мартинович Т. С.</b> Лаборатория проблем защиты информации: основные результаты деятельности.....	77
<b>Залесский Б. А.</b> Актуальные результаты, полученные в лаборатории обработки и распознавания изображений .....	83
<b>Инютин А. В., Старовойтов В. В.</b> Лаборатория идентификации систем: основные результаты .....	88
<b>Кореняко С. А., Степура Л. В.</b> Научно-исследовательский отдел совместных программ космических и информационных технологий: основные результаты практической деятельности.....	94
<b>Крот А. М.</b> О лаборатории моделирования самоорганизующихся систем .....	101
<b>Кругликов С. В., Потетенко С. В.</b> Становление и развитие «умных регионов» .....	112
<b>Крючков А. Н.</b> Научно-технические разработки в области цифровой картографии и геоинформационных технологий .....	122
<b>Левкевич В. Е., Мильман В. А., Крючков А. Н.</b> Научно-технические разработки по анализу состояния водных объектов Беларуси для предотвращения чрезвычайных ситуаций .....	129

---

---

<b>Маршалович В. Е., Рымарчук А. Г., Чиж О. П., Мурашко В. В.</b> Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования.....	135
<b>Матюшкова Г. Л., Несенчук А. А., Самсонов В. Е.</b> Отдел технологий цифровой трансформации. Основные исторические вехи.....	141
<b>Муха Н. П., Губич Л. В.</b> Лаборатория автоматизации процессов проектирования.....	148
<b>Сычёв В. А.</b> Лаборатория робототехнических систем .....	157
<b>Том И. Э.</b> Лаборатория биоинформатики: 25 лет в науке и практике.....	163

## ВВЕДЕНИЕ

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (до 2002 г. – Институт технической кибернетики) – один из крупнейших научных институтов НАН Беларуси. Он был образован в 1965 г., когда кибернетика стала бурно развиваться в СССР и во всем мире. Институту сразу придали практическую направленность. Он был определен головной организацией, призванной развивать и координировать в СССР работы в области автоматизации проектирования в машиностроении.

В середине 1970-х гг. разработки института в области САПР и обработки графической информации стали широко известны в республике. В 1978 г. ученым института Е. В. Днепровскому, А. Г. Раковичу, О. И. Семенкову, В. Д. Цветкову, Н. А. Ярмошу была присуждена Государственная премия БССР за результаты по теории автоматизации проектирования в машиностроении. В 1977 г. руководство СССР по ходатайству Министерства обороны поручило институту работы особой государственной важности по созданию систем цифрового картографирования для подготовки полетных заданий крылатых ракет. Это стало серьезным испытанием для института, которое он выдержал с честью. Был развернут широкий фронт работ, создано СКТБ с ОП, привлечены лучшие специалисты республики. С 1977 по 1980 г. численность института выросла в два раза и достигла 1400 человек.

Были разработаны системы создания цифровых карт и поставлены на вооружение Советской Армии. За эти работы в 1984 г. институт награжден орденом Трудового Красного Знамени, а многие сотрудники удостоены правительственных наград. В 1985 г. сотрудникам Института технической кибернетики Б. С. Берегову, Г. Г. Маньшину, О. Г. Протопопову, О. И. Семенкову, А. В. Старцеву, А. К. Сутуруину присуждена Государственная премия СССР.

Вместе с решением особо важных задач институт успешно развивал и традиционное направление – САПР. В 1980-е гг. был создан ряд устройств и программных систем, которые успешно работали на многих предприятиях Советского Союза. Институт проводил семинары и конференции по САПР, представлял СССР в научных организациях СЭВ. В 1986 г. Государственная премия БССР была присуждена В. Е. Куконину, В. И. Петько и П. М. Чеголину за работы в области автоматизации испытаний конструкций на основе вычислительных систем.

Перестройка многое изменила в жизни института. В начале 1992 г. институт, имея 80 % военного финансирования и ориентируясь на заказы, необходимые СССР, оказался в новой маленькой стране. Практически все его заказчики остались в России, и деньги, даже за выполненные работы, не доходили до Беларуси. Началось резкое сокращение структур и сотрудников института, которое продолжалось до 1995 г. (численность уменьшилась в два раза). В это тяжелое время из института уходили лучшие специалисты, шла борьба за финансирование и заказы в России, осуществлялся поиск новых направлений деятельности, востребованных в республике. Многие были сделаны для того, чтобы смягчить эти болезненные процессы. Была проведена корректировка тематики, появились новые направления и лаборатории, усилилось международное сотрудничество.

Тем не менее институт оставался в середине 1990-х гг. крупной научной организацией, и для более гибкого реагирования на нужды страны руководство института приняло решение о преобразовании его в ряд самостоятельных юридических структур, объединив их в НИО «Кибернетика». Сохранился собственно институт в составе 330 человек, ориентированный в основном на теоретические исследования, и образовались четыре новых научно-инженерных предприятия, нацеленные на создание практических систем: «Научное приборостроение», «Геоинформационные системы», «Информационные технологии», «Системы автоматизации». В 1998 г. Государственной премии Республики Беларусь были удостоены М. Я. Ковалев, Ю. Н. Сотсков, В. А. Струсевич, В. С. Танаев и Я. М. Шафранский за научные результаты в области теории расписаний.

Большой импульс развитию института придало российско-белорусское сотрудничество в виде совместных программ Союзного государства по космическим и суперкомпьютерным исследованиям, которые стартовали в конце 1990-х гг. и продолжаются в настоящее время.

Все предприятия НИО «Кибернетика» также успешно развивались. В 2002 г. при реорганизации НИО «Кибернетика» они либо влились в состав института, либо переросли в самостоятельные структуры, играющие важную роль в жизни Академии наук и страны в целом. Институт технической кибернетики был переименован в Объединенный институт проблем информатики, что больше соответствовало направлениям развития информационных технологий. За работы в области обработки и распознавания изображений Государственная премия Республики Беларусь в 2003 г. была присуждена С. В. Абламейко, Р. Х. Садыхову, В. В. Старовойтову и А. В. Тузикову.

После реорганизации институт стал динамично развиваться. Был создан Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования.

Объединенный институт проблем информатики является головной организацией по выполнению государственных программ научных исследований, научно-технических программ, российско-белорусских программ по космической отрасли и суперкомпьютерным (высокопроизводительным) технологиям. Он является одним из крупнейших научных центров Беларуси в области информационных технологий.

20 января 2023 г. при открытии выставки «Беларусь интеллектуальная» Президент Республики Беларусь определил Национальную академию наук Беларуси, в лице института, ответственной за сопровождение интеллектуальных технологий и систем, а также искусственного интеллекта в Беларуси.

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 29.11.2023 № 381 «О цифровом развитии» институт определен «офисом цифровизации» Национальной академии наук Беларуси.

В целях объединения возможностей организаций Национальной академии наук Беларуси, осуществляющих деятельность в области информационных технологий, для решения актуальных задач социально-экономического и научно-технического развития Республики Беларусь на основе широкого использования наукоемких цифровых технологий в реальном секторе экономики страны, в том числе и технологий искусственного интеллекта, в Национальной академии наук Беларуси создан ИТ-Академград.

В структуре ИТ-Академграда проработаны вопросы создания Центров компетенций с использованием технологий искусственного интеллекта: по сельскому хозяйству; цифровому здравоохранению; биоинформатике; распознаванию образов; математическому моделированию; аэрокосмическому мониторингу; цифровым сервисам и услугам; информационной безопасности.

Данный выпуск журнала посвящается 60-летию образования института. В нем представлены разноплановые статьи о развитии некоторых важных направлений научных исследований института, о формировании и становлении новых научных направлений, об истории и деятельности ряда лабораторий и отделов института. Статьи не охватывают все сферы деятельности института, а повествуют только о некоторых из них.

Большой вклад в создание выпуска внесли руководители института, заведующие лабораториями и отделами, ведущие специалисты. Особо следует отметить вклад сотрудников редакционно-издательского отдела института под руководством С. С. Мойсейчик, которые подготовили журнал к публикации.

От имени руководства института мы поздравляем всех сотрудников Объединенного института проблем информатики с 60-летием института, желаем здоровья и творческих успехов, а родному институту – процветания и дальнейших достижений на благо нашей родины – Республики Беларусь.

Генеральные директора Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси:

С. В. Абламейко (2002–2008)

А. В. Тузиков (2008–2022)

С. В. Кругликов (2022 – н.в.)

УДК 004.932

## Обработка изображений: 45 лет развития

**Абламейко Сергей Владимирович**

*главный научный сотрудник отдела интеллектуальных информационных систем,  
профессор Белорусского государственного университета, доктор технических наук,  
профессор, академик НАН Беларуси  
E-mail: ablameyko@bsu.by*

**Введение. Начало.** В статье прослеживается история развития научного направления «Обработка изображений» за прошедшие 45 лет.

Все началось в августе 1978 г., когда С. В. Абламейко был принят на работу в Институт технической кибернетики АН БССР (ИТК АН БССР) на должность стажера-исследователя после окончания механико-математического факультета Белорусского государственного университета. 2 сентября 1977 г. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР ИТК АН БССР был назначен головным исполнителем по разработке автоматизированных картографических систем по заказу Министерства обороны СССР, целью которых было создание цифровых карт местности. Так наступил новый этап в истории ИТК АН БССР.

В первых системах цифрование карт осуществлялось полуавтоматическим способом с помощью дигитайзеров. В 1980 г. параллельно с выполнением ОКР, где применялось ручное цифрование карт, заказчик задумался об автоматическом вводе и распознавании карт. Весной 1980 г. директор ИТК АН БССР О. И. Семенов поручает молодому ученому младшему научному сотруднику С. В. Абламейко заняться вопросами обработки картографических изображений в рамках новой только что начавшейся НИР «Лиричность» и разработать методы и программное обеспечение обработки автоматически сканированных карт. Осенью 1980 г. С. В. Абламейко поступает в аспирантуру ИТК АН БССР. В том же 1980 г. он становится одним из первых в республике, кто стал заниматься вопросами обработки изображений. В декабре 1982 г. НИР «Лиричность» была успешно завершена. Был создан черно-белый сканер, получены и обработаны картографические изображения, а затем преобразованы в векторный вид, показана принципиальная возможность цифрования карт с помощью сканирующих устройств.

В 1984 г. в кандидатской диссертации, которую успешно защитил С. В. Абламейко, показана принципиальная возможность автоматической обработки и векторизации картографических изображений на имеющихся в то время компьютерах. Необходимо отметить, что это были пионерские работы не только в СССР, но и в мире по данной тематике. Работы были продолжены дальше, в частности, в рамках ОКР «Привада», и их результаты внедрены затем в производство.

В 1986 г. С. В. Абламейко возглавил образованную в институте лабораторию проблем обработки изображений. Одной из основных ее задач была разработка математических и программных средств для распознавания картографических изображений и снимков земной поверхности.

В 1989 г. была издана монография «Обработка информации в растровых графических системах» (соавторы: О. И. Семенов, В. И. Берейшик, В. В. Старовойтов), в 1990 г. С. В. Абламейко защищает докторскую диссертацию, которая была посвящена автоматическому вводу, обработке и распознаванию картографических изображений с целью создания цифровых карт (обе его диссертации были защищены в Институте кибернетики АН УССР).

С. В. Абламейко руководил лабораторией 26 лет. Научная школа, которой он занимался, затем трансформировалась и распространилась по разным организациям и странам. Основными направлениями исследований данной школы являются: теоретические вопросы обработки изображений, распознавание графических изображений, анализ медицинских изображений и изображений земной поверхности, мониторинг движения динамических объектов, анализ видеопоследовательностей и др.

## Результаты. Хронология

### 80-е годы 20-го века

*Обработка картографических изображений.* Работы по созданию автоматизированных картографических систем в ИТК НАН Беларуси велись с 1980 г. Технологии цифрования карт (дигитайзерная и сканерная) разрабатывались коллегами из лаборатории обработки и распознавания изображений С. В. Абламейко, В. И. Берейшиком, О. В. Францкевичем, Н. И. Парамоновой, М. И. Хоменко, О. А. Пацко, В. В. Старовойтовым, Г. П. Апариним и лаборатории автоматизированных картографических систем и технологий А. Н. Крючковым, Л. Н. Соболев, Е. Е. Сотиковой, С. Б. Бочаровым, С. П. Боричевым, В. А. Лазаревичем.

В 1980–1990-е гг. были созданы системы цифрования карт, основанные на сканерной технологии и работавшие также на СМ ЭВМ. В 1991–1995 гг. был осуществлен переход на IBM PC и созданы сканерные технологии, работавшие в операционной системе MS DOS. С 1996 г. стали разрабатываться технологии, работающие в операционной среде WINDOWS. За 20 лет было разработано множество систем для автоматизированного цифрования карт, которые по сей день успешно работают на многих предприятиях в различных странах.

Были заложены теоретические основы обработки и векторизации графических изображений. На базе экономного представления изображений модифицированными длинами серий создана технология векторизации двумерных изображений большого размера. Разработаны быстрые и эффективные алгоритмы фильтрации шумов, выделения контуров, утоньшения и векторизации бинарных изображений (рис. 1). Предложен способ представления векторизованных графических изображений, который позволяет компактно хранить всю необходимую информацию о графических объектах и их компонентах, и ориентирован на структурно-лингвистическое распознавание объектов.

Разработаны теоретические основы распознавания линейных, дискретных и площадных объектов графических изображений. Для распознавания линейных объектов предложен метод, использующий атрибутивную грамматику, сформулированы правила описания основных классов линейных объектов и представлены процедуры грамматического разбора с целью определения класса распознаваемого объекта. Для распознавания дискретных объектов предложены методы, основанные на скелетном и контурном представлении объектов. Для распознавания площадных объектов графических изображений разработаны эффективные алгоритмы на базе дистанционного преобразования.

### 1990-е годы 20-го века

*Обработка чертежно-графических изображений.* Одной из очень важных является проблема быстрого, точного и недорогого ввода технических чертежей в системы САПР. Сотрудники лаборатории обработки и распознавания изображений С. В. Абламейко, В. И. Берейшик, О. В. Францкевич, Н. И. Парамонова, М. И. Хоменко и О. А. Пацко разработали методы и создали ряд систем распознавания чертежно-графических изображений, которые позволили обрабатывать цветные изображения и преобразовывать их в векторный формат. Разработанные системы осуществляют следующие функции: бинаризацию и растр-векторное преобразование цветных изображений, распознавание некоторых классов объектов документа, редактирование объектов графического документа, формирование цифровой модели документа (рис. 2).

По результатам исследований было издано несколько книг на русском языке. Кроме того, в 1997 г. в США издана монография "An Introduction to interpretation of graphic images" и в 2000 г. в издательстве Springer в Англии – монография "Interpretation of line-drawing images" (совместно с Т. Pridmore). Это были первые в мире и ставшие классическими монографии в области распознавания графических изображений.

*Теория пиксельных силовых полей.* Совместно с В. В. Бучей была разработана теория пиксельных силовых полей для решения задач обработки изображений. По сравнению с традиционными методами предложенный подход предлагает простое и эффективное средство для выполнения операций обработки как цветных, так и полутоновых изображений. Рассмотрены основные свойства пиксельных силовых полей, их отличия от других скалярных и векторных полей, разработаны практические применения. Показаны применения пиксельного силового

поля для получения обобщенной дистанционной карты, поля направлений, утоньшения цветных изображений, сегментации цветных изображений, выделения линейных и площадных объектов на аэрокосмических изображениях и т. д. (рис. 3).

Совместно с А. М. Белоцерковским предложен способ описания изображения с помощью векторов ахроматической и хроматической области, позволяющий качественно выделять объекты, характеризуемые как «бесцветные» с точки зрения восприятия. Способ использует квазиполутоновое преобразование, сохраняющее информацию о цвете объектов с ярко выраженной хроматической компонентой и повышающее контраст полутоновых областей.

#### ***Первое десятилетие 21-го века***

*Анализ изображений земной поверхности.* Разработаны методы, алгоритмы и программные средства (2001–2010) для обработки оптических спутниковых изображений с целью обновления и создания цифровых карт (совместно с А. Н. Крючковым и его коллегами). Предложен способ оперативного совмещения цифровой карты и снимка, позволяющий ускорить процесс выбора снимка, определяющий снимок и карту за счет анализа и количественной оценки имеющихся на снимке искажений (рис. 4).

Совместно с Н. И. Мурашко и А. Н. Крючковым была решена задача оперативного совмещения цифровых одиночных аэрокосмоснимков центральной проекции и векторных карт по опорным точкам в специализированной геоинформационной системе. Разработан способ оперативного совмещения аэрокосмоснимков и карт, позволяющий ускорить процесс совмещения, повысить его точность и эффективность (рис. 4). Разработаны методы обнаружения изменений на аэрокосмоснимках.

Системы создавались сотрудниками лаборатории обработки и распознавания изображений В. В. Старовойтовым, Д. И. Самалем, Г. П. Апариным, А. М. Белоцерковским, лаборатории автоматизированных картографических систем и технологий А. Н. Крючковым, Л. Н. Соболев, Е. Е. Сотиковой, С. П. Боричевым и лаборатории системотехники Н. И. Мурашко, А. С. Лакерником, Л. В. Орешкиной, С. Л. Кравцовым. Созданные системы позволяют автоматизировать процесс дешифрирования снимков и обновления цифровых карт; повышать оперативность и эффективность информации, получаемой с аэро- и космоснимков; сокращать время получения оперативной обстановки на местности.

**Обработка медицинских изображений.** В лаборатории был выполнен большой цикл исследований по анализу медицинских изображений, разработано множество алгоритмов анализа разных видов медицинских изображений для постановки более четкого диагноза.

*Анализ цитологических изображений для постановки диагноза рака щитовидной железы.* В 2000–2003 гг. в рамках проекта МНТЦ были разработаны методика, методы, алгоритмы и экспертная система, предназначенные для помощи врачу-цитологу в постановке и верификации диагноза основных форм заболеваний щитовидной железы. Разработаны методы сегментации, выделения и оконтуривания объектов на цитологических изображениях (рис. 5). Для постановки диагноза выделены и проанализированы основные признаки объектов, такие как структура клеток (размеры) и их ядер, структура цитоплазмы, характер и состав клеточных агрегатов, наличие внеклеточных структур и др.

Была создана система анализа цитологических изображений для диагностики рака щитовидной железы. Ее особенностями являются предложенный перечень параметров, наиболее полно характеризующих патологические изменения клеток, ядер и агрегатов тироцитов и служащих для постановки диагноза, а также разработанные эффективные алгоритмы вычисления этих параметров. Основными разработчиками системы были сотрудники лаборатории обработки и распознавания изображений С. В. Абламейко, Н. И. Парамонова, О. А. Пацко, О. П. Чиж.

*Анализ гистологических изображений.* Совместно с А. М. Недзьведом в первом десятилетии 20-го века был разработан ряд методов обработки медицинских изображений.

Была разработана методика анализа гистологического препарата нервных клеток для определения герпетической инфекции. Анализ клеточного изображения рассматривается как образ задачи сегментации, где клетки и их ядра разделяются как отдельные объекты, для которых определяются геометрические характеристики, включая ядерно-цитоплазматическое отноше-

ние (рис. 6). Автоматизация процесса анализа препаратов с вирусным поражением позволяет оценить степень и стадию заболевания.

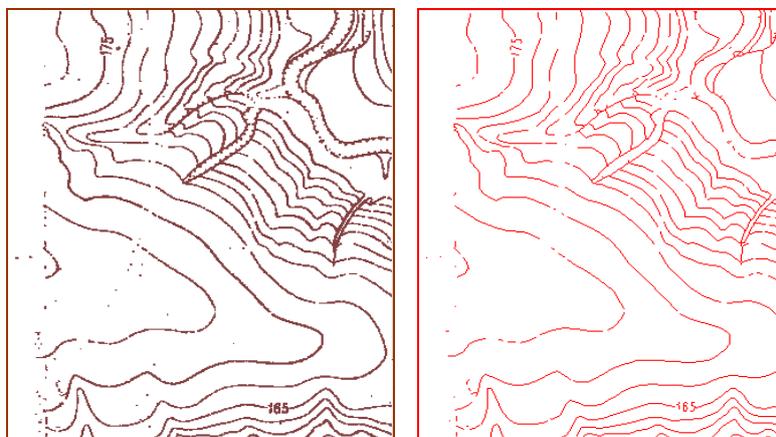


Рис. 1. Сканированная карта (оригинал «Рельеф») и результат векторизации

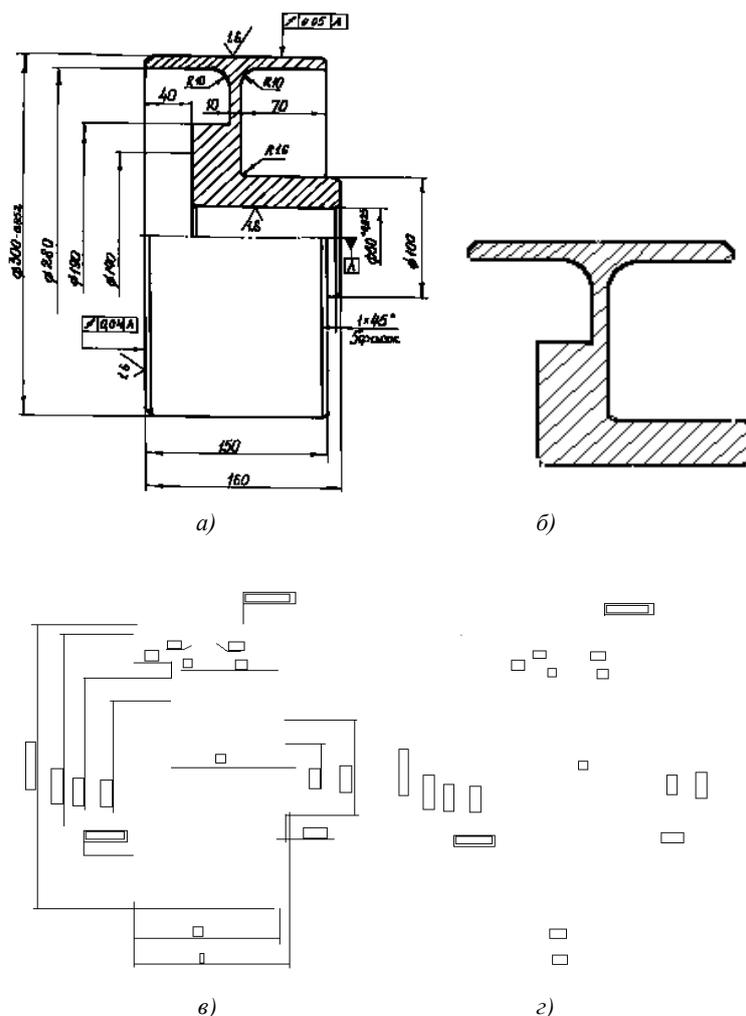


Рис. 2. Исходный чертеж (а) и результат распознавания штриховки (б), размерностей (в) и текста (г)

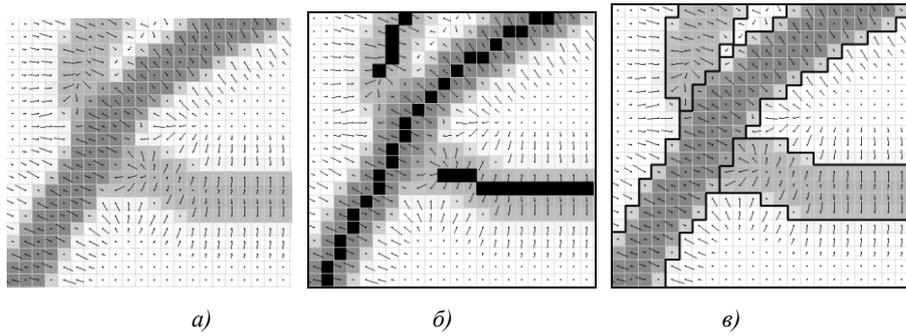


Рис. 3. Пиксельные силовые поля (а); пиксели покоя (б) и результат сегментации (в)

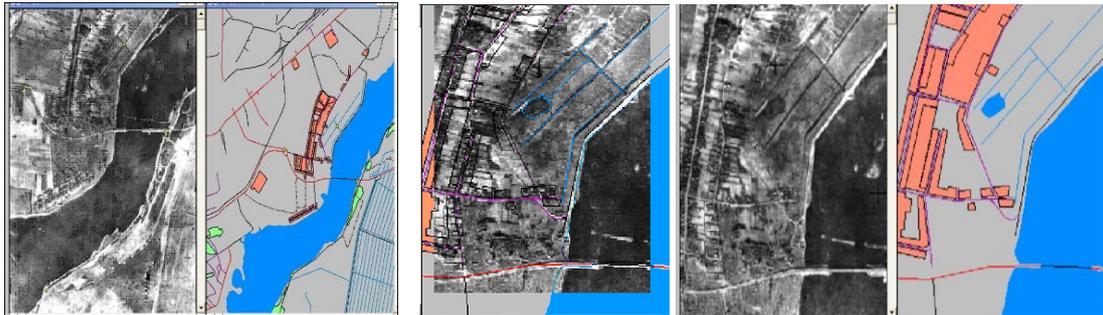


Рис. 4. Обновление карт по снимкам земной поверхности

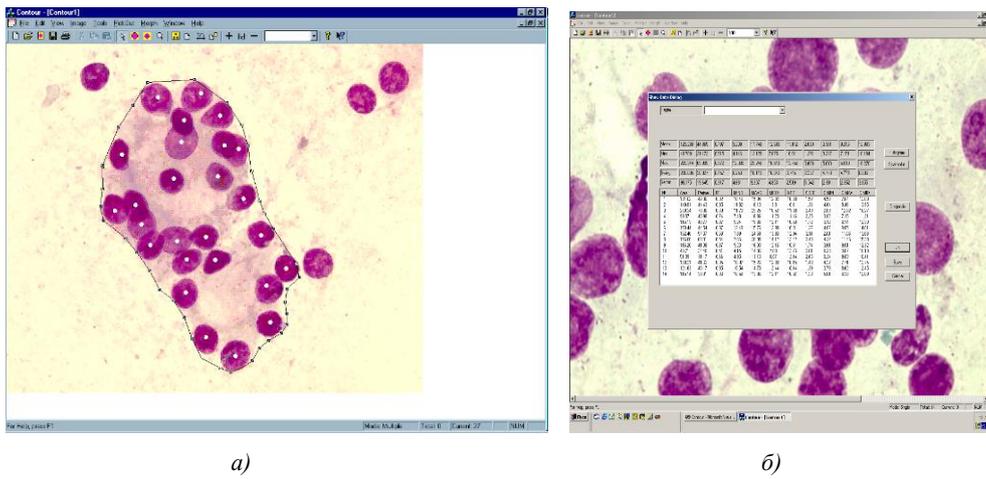


Рис. 5. Пример выделения клеток (а) и построения морфометрической базы данных (б)

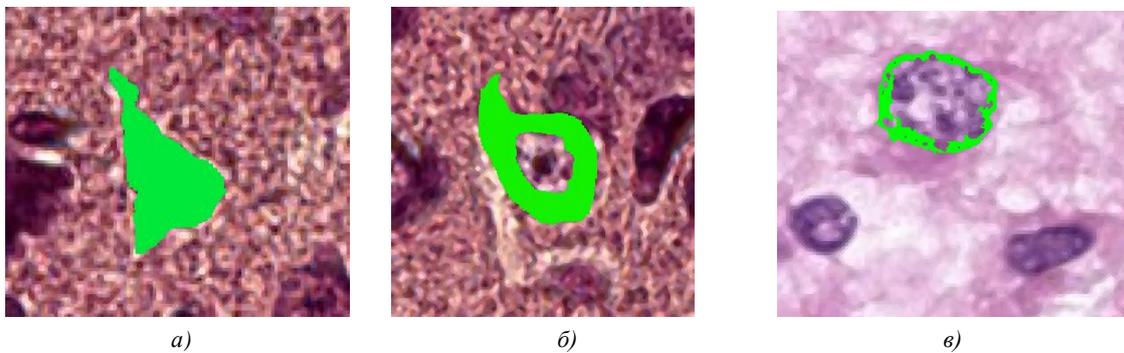


Рис. 6. Образцы нервных клеток: а) без вирусного поражения; б) с поражением первого типа; в) с поражением второго типа

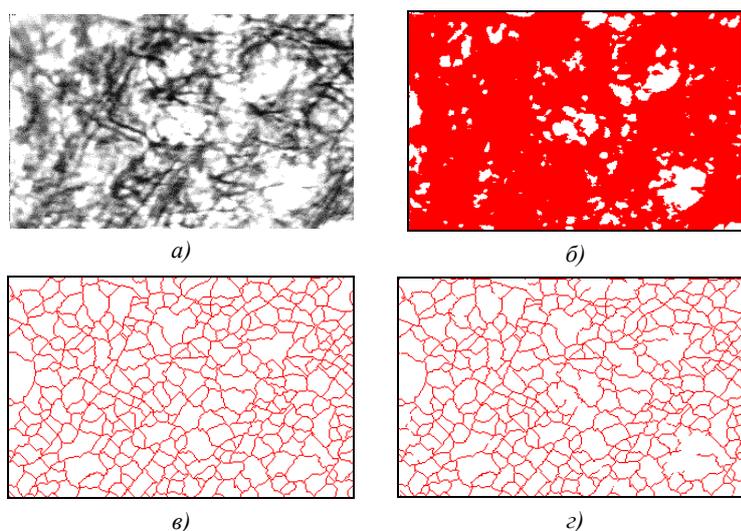


Рис. 7. Радиальные и тангенциальные волокна мозговой ткани: *а)* исходное изображение, светлые округлые участки – клетки с более светлым ядром и нечеткой цитоплазмой; *б)* результат адаптивной пороговой сегментации нервных волокон; *в)* результат полутонового утоньшения изображения волокон с последующей бинаризацией; *г)* бинарное изображение радиальных и тангенциальных нервных волокон головного мозга

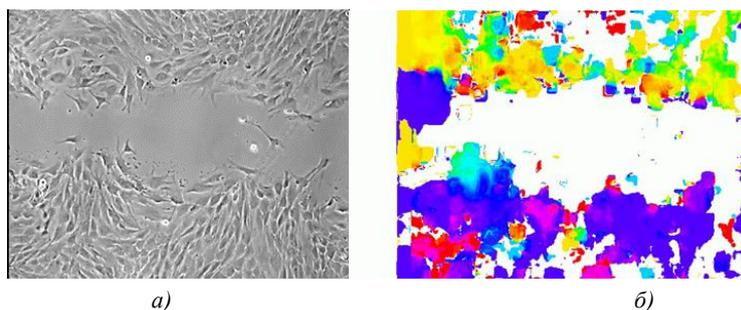


Рис. 8. Исходное изображение (*а)* и карта интегрального оптического потока для неравномерного роста клеточной популяции (*б)*)

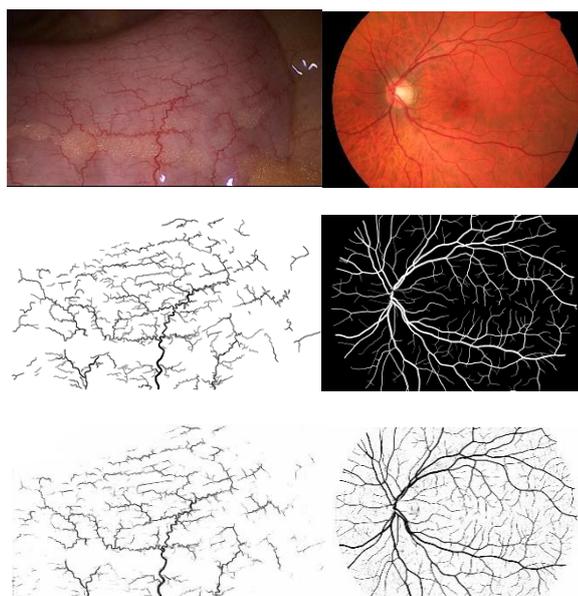


Рис. 9. Результаты сегментации сосудистого рисунка посредством сверточной нейронной сети на эндоскопическом изображении (первый столбец) и изображении глазного дна (второй столбец)

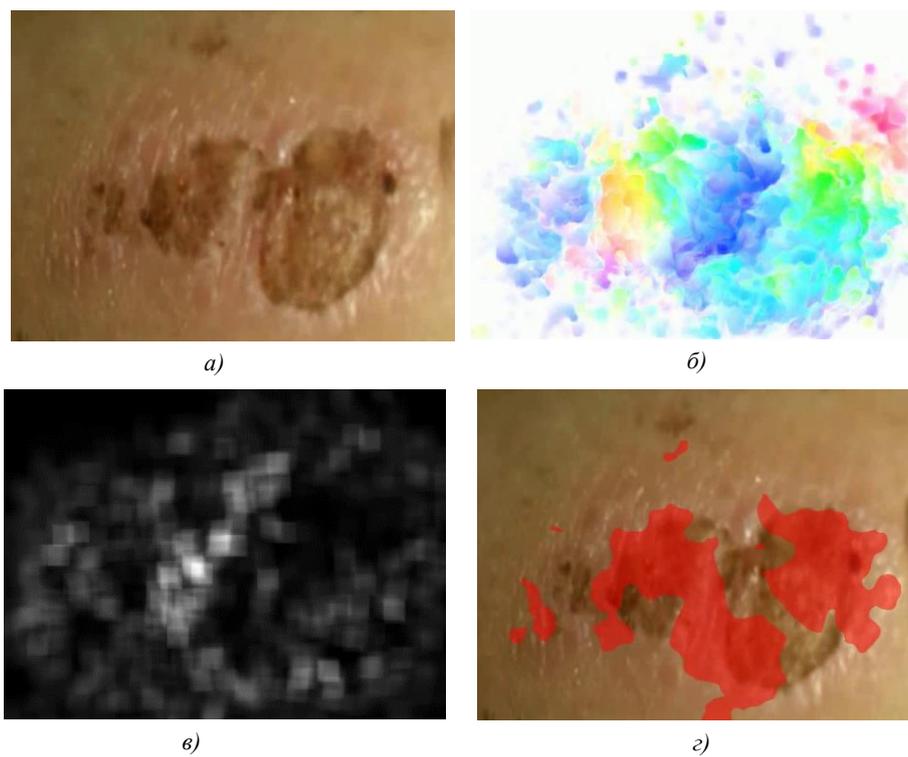


Рис. 10. Мониторинг заживления раны: *а)* исходное изображение; *б)* цветное изображение оптического потока; *в)* полутоновое изображение  $IRQ$ ; *г)* область интенсивной эпителизации

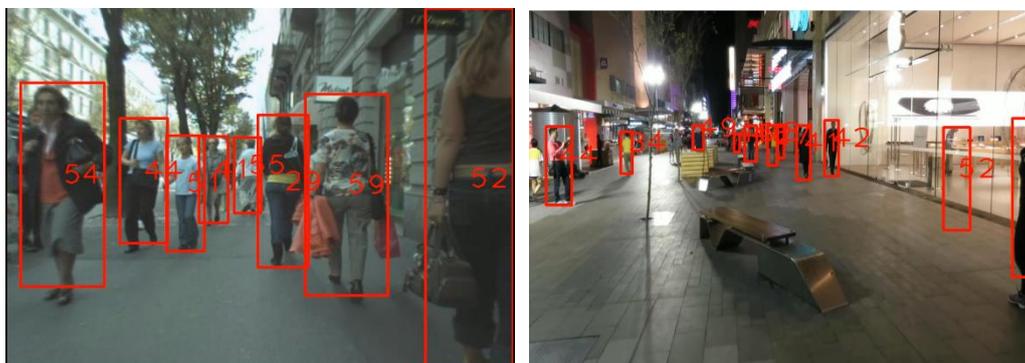


Рис. 11. Примеры сопровождения множества людей вне помещения



Рис. 12. Пример сопровождения людей с отображением их траекторий движения



Рис. 13. Примеры обнаружения и сопровождения людей:  
а) с использованием распознавания по лицу; б) по признакам изображения человека

*Сегментация гистологических изображений волокон мозговой ткани.* Изображение радиальных и тангенциальных волокон достаточно сложное (рис. 7, а). Волокна относятся к протяженным объектам, окружающий их фон неравномерен. В отдельных областях из-за близкого расположения волокон происходит затенение фона, что приводит к неправильному результату при пороговой сегментации (рис. 7, б).

Добиться улучшения результата можно, применив полутоновое утоньшение с последующей бинаризацией (рис. 7, в). Однако результат полутонового утоньшения также не является правильным, так как на светлых областях, которые принадлежат клеткам, находятся волокна. Отметим, что эти области отлично выделены на изображении, полученном с помощью пороговой сегментации (рис. 7, б) Если выполнить конъюнкцию изображений с результатом пороговой сегментации и полутонового утоньшения, получим бинарное изображение сети нервных волокон (рис. 7, г).

### ***Второе десятилетие 21-го века***

#### ***Анализ видеопоследовательностей***

*Анализ движения клеточной популяции.* Совместно с О. В. Недзьведь и А. М. Недзьведем разработаны теория и алгоритмы мониторинга движения клеток и клеточной популяции по видеопоследовательности и определения характеристик движения объектов, основанные на вычислении интегрального оптического потока. Алгоритмы позволяют установить тип движения и идентифицировать стадии развития, такие как рост, деление и распад. Для реализации алгоритмов предложено понятие интегрального оптического потока, на основе которого выделено несколько основных типов описания движения объектов в популяции, построена модель движения, описаны стадии развития и их взаимодействия друг с другом. Для описания движения на основе интегрального оптического потока строятся карты, которые дают возможность определить начальный момент изменения состояния и классифицировать основные типы движения в популяции: направленное движение, агрегацию (движение по направлению друг к другу), рассеивание (движение в разных направлениях от общего центра), деление (образование нескольких новых объектов в области расположения старого) и гибель (разрушение объекта) (рис. 8).

Был разработан метод определения степени равномерности роста клеточной культуры как альтернативный метод качественного контроля состояния клеточной популяции. Для анализа видеопоследовательности используется интегральный оптический поток. На основе построения карт оптического потока определяются области, в которых отмечается нарушение роста популяции. Данный метод относится к неразрушающим методам анализа. Он обладает меньшей точностью полученных результатов и значительно меньшей стоимостью.

*Определение характеристик кровотока в сосудах глазного дна по видеопоследовательности.* Совместно с А. М. Недзьведем разработан метод определения динамических характеристик кровотока в сосудах глазного дна, таких как изменение диаметра сосуда, линейная и объемная скорость кровотока. Данные характеристики позволяют определить изменения кровотока в микроциркуляторном русле, которые, в свою очередь, определяют изменения кровотока в сосудах мозга, почек и коронарных сосудах. Разработаны алгоритмы анализа изменения скорости

кровотока в микроциркуляторном русле, позволяющие определять параметры состояния организма человека. Алгоритмы основаны на определении оптического потока и сегментации на основе сверточной нейронной сети (СНС) (рис. 9).

*Анализ эпителизации ран и воздействия лечебных факторов.* Анализ изменения площади и скорости заживления раны позволяет изучать динамику развития раневых повреждений и оценивать эффективность лечения. Данный анализ может быть использован в доказательной медицине. Для определения характера эпителизации ран и воздействия лечебных факторов на основе анализа видеопоследовательности С. В. Абламейко совместно с А. М. Недзьведом был разработан метод, использующий понятие оптического потока. Метод основан на определении скорости и равномерности воздействия на различных участках ткани (рис. 10).

Разработанные и описанные выше алгоритмы, методы, методики и системы были использованы для диагностики основных форм злокачественных новообразований в Республиканском научно-практическом центре онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова, Республиканском научно-практическом центре детской онкологии и гематологии, Научно-исследовательском клиническом институте радиационной медицины и эндокринологии, Минском государственном медицинском университете.

### ***Третье десятилетие 21-го века***

*Обнаружение и отслеживание объектов на видео.* В третьем десятилетии начато широкое применение нейронных сетей для задач обработки изображений. Были получены новые теоретические результаты в области обнаружения и сопровождения объектов различных классов на видеопоследовательностях на основе анализа статических и динамических признаков, предложены новые архитектуры СНС и составных дескрипторов для описания объектов. Большой ряд результатов был получен совместно с Р. П. Богушем.

Разработаны методы обнаружения одиночных и групповых движущихся объектов на основе анализа оптического потока при пирамидальном представлении кадра с применением шаблонного поиска при построении предварительной карты векторов движения для сокращения временных затрат.

Создан алгоритм обнаружения на основе блочного метода оценки движения, который основан на вычислении оптического потока с применением иерархического представления кадров для обработки, шаблонного метода поиска блоков и фильтрации векторов движения. Здесь применяется комбинация различных приемов для сокращения вычислительных затрат и возможности обнаружения на нестабильном фоне (рис. 11).

Предложен алгоритм сопровождения движущихся объектов, который использует результаты обнаружения объектов на соседних кадрах; волновой алгоритм для локализации объектов, установления схожести между областями движения на основе аддитивной минимаксной функции, локализации движущихся объектов и формирования траектории движения.

Серьезные результаты получены по обнаружению и сопровождению множества людей на видеопоследовательностях с использованием СНС. Разработан алгоритм сопровождения людей, использующий СНС для их обнаружения, отличающийся тем, что установление соответствия между изображениями людей на кадрах выполняется с применением комплекса признаков, включая пространственные координаты, размеры, цветовые характеристики, а также признаки, сформированные на основе СНС (рис. 11). Для получения СНС-признаков используется предложенная архитектура СНС. Для обучения СНС синтезирована база данных.

Для решения задач отслеживания объектов на видео в системах «умный город» и «умный дом» разработана новая архитектура СНС, позволяющая учитывать вариативность схожих и отличающихся признаков людей на различных кадрах видеопоследовательности и обеспечивающая приемлемые вычислительные затраты. Она формирует 128 признаков изображения фигуры человека и позволяет определять траекторию его движения (рис. 12).

Для увеличения точности сопровождения людей предложено применять идентификацию по лицам (рис. 13). При этом включены стадии обнаружения людей, их идентификации по лицам, формирования комплексного вектора признаков для каждого на основе пространственных и СНС-признаков лица и фигуры человека, установления соответствия между людьми на кадрах и их индексации. Составной дескриптор изображения каждого человека включает признаки

лиц, вычисленные на основе СНС, и комплекс признаков изображения человека, что позволяет сопровождать людей при невозможности идентификации лиц.

### **Научно-организационная работа**

#### ***Подготовка научных кадров***

*Подготовка кадров высшей квалификации.* Многолетние исследования позволили создать интенсивно развивающуюся и широко известную в мире белорусскую научную школу в области обработки изображений.

За прошедшие 45 лет в лаборатории защищены пять докторских диссертаций (С. В. Абламейко, А. В. Тузиков, В. В. Старовойтов, А. М. Недзьведь, Р. П. Богуш) и более 20 кандидатских диссертаций (С. В. Абламейко, Б. С. Берегов, В. В. Старовойтов, Г. П. Апарин, А. Я. Кулешов, О. Г. Окунь, Д. М. Лагуновский, А. М. Недзьведь, Р. П. Богуш, Д. И. Самаль, И. П. Шумский, О. В. Недзьведь, В. В. Сорокина, А. М. Белоцерковский, В. В. Буча, С. Г. Алексеев, Д. В. Туиет и др.).

*Учебный процесс в вузах.* С конца 1980-х гг. сотрудники лаборатории начали преподавать обработку изображений в вузах Беларуси. Были разработаны и проводятся лекционные курсы и компьютерные практикумы по обработке изображений в ведущих вузах Республики Беларусь: Белорусском государственном университете, Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, Белорусском государственном технологическом университете. На основе достигнутых научных результатов учеными ОИПИ НАН Беларуси опубликован ряд учебных пособий.

*Организация научных конференций и участие в работе редколлегий журналов.* Ученые ОИПИ НАН Беларуси руководили организацией более 30 международных конференций в области обработки сигналов и изображений, проводившихся в Беларуси, Польше, Германии, Италии, и участвовали в работе программных комитетов более 100 международных конференций, проходивших в США, Германии, Италии, Франции, Англии, Австрии, Японии, Испании, Португалии, Польше, Чехии, Австралии, России, Беларуси и других странах.

Основные научные исследования и организационно-технические мероприятия в области обработки изображений проходят под эгидой Международной ассоциации распознавания образов (IAPR), объединяющей исследователей более 40 стран, включая все развитые страны. После распада СССР в 1992 г. научная деятельность заметно снизилась. Для того чтобы получать информацию о международной деятельности и самим принимать в ней активное участие, в конце 1992 г. группой белорусских ученых было принято решение о создании Белорусской ассоциации по анализу и распознаванию изображений (БААРИ). 14 декабря 1992 г. состоялось учредительное собрание БААРИ, на котором были избраны руководящие органы. В феврале 1993 г. БААРИ была зарегистрирована в Министерстве юстиции Беларуси как общественная научная организация. Базовой организацией БААРИ является Объединенный институт проблем информатики (ранее ИТК) НАН Беларуси.

БААРИ объединяет белорусских ученых, работающих в области обработки изображений. В марте 1993 г. БААРИ (первой из стран СНГ) была принята в Международную ассоциацию распознавания образов как представитель Беларуси. Основное мероприятие БААРИ – двухгодичная конференция «Распознавание образов и обработка информации» (Pattern Recognition and Information Processing, PRIP) – практически основано учеными ОИПИ НАН Беларуси. Конференция проводится раз в два-три года, получила широкую международную известность и стала признанным научным форумом в области обработки изображений. К настоящему времени уже состоялось 14 конференций.

Белорусские ученые были и являются членами редколлегий ряда периодических научных изданий: Pattern Recognition (США), Pattern Recognition Letters (Голландия), Machine Graphics and Vision (Польша), Доклады НАН Беларуси, Вести НАН Беларуси (серия физико-математических наук), Информатика (Беларусь) и др.

**Заключение.** Подводя итоги, можно сказать, что в ОИПИ НАН Беларуси создана сильная школа в области обработки изображений, которая широко признается мировой научной ответственностью. Внесен значительный вклад в развитие информатики в части распознавания и об-

работки изображений. Получены глубокие фундаментальные результаты, имеющие одновременно и важное прикладное значение.

На основе полученных результатов были созданы высокоэффективные компьютерные системы, используемые в промышленности, медицине, экономике и оборонной технике для решения важнейших прикладных задач обработки информации, распознавания и анализа цифровых изображений.

## Публикации

### Книги

1. Обработка и отображение информации в растровых графических системах / О. И. Семенков, С. В. Абламейко, В. И. Берейшик, В. В. Старовойтов ; науч. ред. Г. В. Римский ; АН БССР, Ин-т техн. кибернетики. – Минск : Наука и техника, 1989. – 189 с.
2. Ablameyko, S. Recognition of Graphic Images / S. Ablameyko. – Minsk : Institute of Engineering Cybernetics of the Academy of Sciences of Belarus, 1996. – 208 p.
3. Старовойтов, В. В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений / В. В. Старовойтов. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 284 с.
4. Ablameyko, S. Introduction to Interpretation of Graphic Images / S. Ablameyko. – Bellingham, Washington : SPIE – The International Society for Optical Engineering, USA, 1997. – 166 p.
5. Абламейко, С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С. В. Абламейко, Д. М. Лагуновский. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 301 с.; Минск : Амалфея, 2000. – 305 с.
6. Ablameyko, S. Machine interpretation of line-drawing images / S. Ablameyko, T. Pridmore. – Springer, 2000. – 284 p.
7. Абламейко, С. В. Географические информационные системы. Создание цифровых карт / С. В. Абламейко, Г. П. Апарин, А. Н. Крючков. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – 303 с.
8. Malina, W. Podstawy cyfrowego przetwarzania obrazow / W. Malina, S. Ablameyko, W. Pawlak. – Warszawa : Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2002. – 131 p.
9. Абламейко, С. В. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине / С. В. Абламейко, А. М. Недзьведь. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 155 с.
10. Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ / С. В. Абламейко, С. М. Абрамов, В. В. Анищенко [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 169 с.
11. Медицинские информационные технологии и системы / С. В. Абламейко, В. В. Анищенко, В. А. Лапицкий, А. В. Тузиков. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – 176 с.
12. Мальцев, С. В. Обработка сигналов и изображений средствами векторно-матричных вычислений / С. В. Мальцев, С. В. Абламейко, Р. П. Богущ. – Новополоцк : Полоцкий гос. ун-т, 2011. – 211 с.
13. Абламейко, С. В. Глобальные навигационные спутниковые системы : пособие для студентов факультета радиофизики и компьютерных технологий / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. – Минск : БГУ, 2011. – 146 с.
14. Недзьведь, А. М. Анализ изображений для решения задач медицинской диагностики / А. М. Недзьведь, С. В. Абламейко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – 240 с.
15. Абламейко, С. В. Спутниковые системы связи / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. – Минск : БГУ, 2012. – 146 с.
16. Абламейко, С. В. Малые космические аппараты : пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютерных технологий, механико-математического и географического / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. – Минск : БГУ, 2012. – 158 с.
17. Абламейко, С. В. Космонавтика Беларуси / С. В. Абламейко. – Минск : БГУ, 2014. – 255 с.
18. Ablameyko, S. University in modern world. Belarusian state university in the country and in the world / S. Ablameyko. – Barcelona : Real Academia de Ciencias Económicas y Financieras, Spain, 2016. – 98 p.
19. Ablameyko, S. Nghan Cong Nghe Vu Try Belarus / S. Ablameyko. – Vietnam : Nha Xuat Ban Thanh Nien, 2018. – 366 p. (на вьетнамском языке).
20. Белорусские суперкомпьютеры семейства СКИФ / Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж, А. Г. Рымарчук [и др.] ; ОИПИ НАН Беларуси. – Гомель : Вечерний Гомель-Медиа, 2020. – 268 с.
21. Абламейко, С. В. Математика и математики БГУ и Беларуси. 100 лет развития / С. В. Абламейко, М. А. Журавков. – Минск : БГУ, 2021. – 268 с.

**Издания под редакцией С. В. Абламейко**

22. Автоматизация обработки и распознавания изображений : сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси ; под ред. С. В. Абламейко. – Минск, 1995. – 220 с.
23. Pattern Recognition and Information Processing : proc. III Intern. Conf., Minsk, 19–21 Sept. 1995 ; ed.: J. Soldek, S. Ablameyko. – Minsk, Szczecin, 1995, Vol. 1. – 168 p., Vol. 2. – 180 p., Vol. 3. – 208 p.
24. Pattern Recognition and Information Processing : proc. IV Intern. Conf., Minsk, 20–22 May 1997 ; ed.: J. Soldek, S. Ablameyko, V. Krasnoproshin, V. Shmerko. – Minsk, Szczecin, 1997, Vol. 1. – 413 p., Vol. 2. – 358 p.
25. Цифровая обработка изображений : сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси ; под ред. С. В. Абламейко. – Минск, 1997. – Вып. 1. – 205 с.
26. Цифровая обработка изображений : сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси ; под ред. С. В. Абламейко. – Минск, 1998. – Вып. 2. – 227 с.
27. Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях : материалы Первой Междунар. конф., Минск, 22–25 сент. 1998 г. ; науч. редактор С. В. Абламейко. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси. – Т. 1. – 168 с., Т. 2. – 240 с., Т. 3. – 242 с.
28. Цифровая обработка изображений : сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси ; под ред. С. В. Абламейко. – Минск, 1999. – Вып. 3. – 264 с.
29. Pattern Recognition and Information Processing : proceedings V Intern. Conf., Minsk, 18–20 May 1999 ; ed.: J. Soldek, S. Ablameyko, R. Sadykhov, V. Shmerko. – Minsk, Szczecin, 1999. – Vol. 1. – 291 p., Vol. 2. – 408 p.
30. Цифровая обработка изображений : сб. науч. тр. / Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси ; под ред. С. В. Абламейко. – Минск, 2000. – Вып. 4. – 220 с.
31. Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях : материалы Второй Междунар. конф., Минск, 28–30 нояб. 2000 г. ; науч. редактор С. В. Абламейко. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – Т. 1. – 228 с., Т. 2. – 240 с.
32. Pattern Recognition and Information Processing – PRIP’2001= Распознавание образов и обработка информации : proc. 6th Intern. Conf., Minsk, 15–17 May 2001 ; ed.: S. Ablameyko, J. Soldek, V. Shmerko. – Minsk, Szczecin, 2001. – Vol. 1. – 230 p. ; ed.: S. Ablameyko, G. Aparin, J. Soldek, V. Shmerko. – Minsk, Szczecin, 2001. – Vol. 2. – 208 p.
33. Цифровая обработка изображений : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т техн. кибернетики; науч. ред. С. В. Абламейко. – Минск, 2001. – Вып. 5. – 230 с.
34. Анализ цифровых изображений : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики ; науч. ред. С. В. Абламейко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2002. – Вып. 1. – 176 с.
35. Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях : материалы Третьей Междунар. конф., Минск, 2002 г. ; науч. редактор С. В. Абламейко. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2002. – Т. 1. – 220 с., Т. 2. – 210 с.
36. Limitations and Future Trends in Neural Computation / ed.: S. Ablameyko, L. Goras, M. Gori, V. Piuri. – Amsterdam, Burke, VA : IOS Press; Tokyo : Ohmsha, 2003. – Vol. 186: NATO Science Series: Computer and Systems Sciences. – 245 p.
37. Neural Networks for Instrumentation, Measurement and Related Industrial Applications / ed.: S. Ablameyko, L. Goras, M. Gori, V. Piuri. – Amsterdam, Washington, DC : IOS; Tokyo : Ohmsha, 2003. – Vol. 185 : NATO Science Series: Computer and Systems Sciences. – 329 p.
38. Анализ цифровых изображений : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики ; науч. ред. С. В. Абламейко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – Вып. 2. – 198 с.
39. Pattern Recognition and Information Processing Processing – PRIP’2001= Распознавание образов и обработка информации : proc. 7th Intern. Conf., Minsk, 21–23 May 2003 ; ed.: V. Krasnoproshin, S. Ablameyko, J. Soldek. – Minsk : UPP NASB, 2003. – Vol. 1. – 229 p.; Minsk, Szczecin, 2003. – Vol. 2. – 325 p.
40. Первый Белорусский космический конгресс : материалы конгр., Минск, 2003 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики, Нац. совет по космосу при Совете Министров Респ. Беларусь ; науч. ред. С. В. Абламейко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – 275 с.
41. Суперкомпьютерные системы и их применение – SSA’2004 : доклады Первой Междунар. науч. конф., Минск, 26–28 окт. 2004 г. ; науч. ред.: С. В. Абламейко, В. В. Анищенко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2004.
42. Объединенный институт проблем информатики: 40 лет / Нац. академия наук Беларуси; сост.: С. В. Абламейко, А. И. Петровский, Н. П. Савик; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Тэхналогія, 2005. – 290 с.

43. Второй Белорусский космический конгресс : материалы конгр., Минск, 25–27 окт. 2005 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики, Нац. совет по космосу при Совете Министров Респ. Беларусь ; науч. ред. С. В. Абламейко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 398 с.
44. Advanced Information and Telemedicine Technologies for Health (АИТТН'2005) : in 2 vol. : proceedings Intern. Conf., Minsk, Nov. 8–10 2005 / sci. ed.: S. Ablameyko, Y. Beloenko, U. Anishchanka. – Minsk : UIIP NASB, 2005. – Vol. 1. – 284 p.; Vol. 2. – 242 p.
45. Pattern Recognition and Information Processing Processing – PRIP'2005= Распознавание образов и обработка информации : proc. 8th Intern. Conf., Minsk, 18–20 May 2005 ; ed.: R. Sadykhov, S. Ablameyko, A. Doudkin, L. Podenok. – Minsk : [Propilei], 2005. – 510 p.
46. Третий Белорусский космический конгресс : материалы конгр., Минск, 23–25 окт. 2007 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики ; науч. ред.: С. В. Абламейко, А. В. Тузиков. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – 419 с.
47. Суперкомпьютерные системы и их применение – SSA'2008 : доклады Второй Междунар. науч. конф., Минск, 27–29 окт. 2008 г. ; науч. ред.: С. В. Абламейко, В. В. Анищенко. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 315 с.
48. Современные информационные и телемедицинские технологии для здравоохранения = Advanced Information and Telemedicine Technologies for Health – АИТТН'2008 : материалы II Междунар. конф., Минск, 1–3 окт. 2008 г. ; науч. ред.: В. Ковалев, С. Абламейко [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 358 с.
49. Развитие информатизации и системы научно-технической информации (РИНТИ-2008) : доклады VII Междунар. конф., Минск, 5 нояб. 2008 г. ; науч. ред.: С. В. Абламейко, Р. Б. Григянец, В. Н. Венгеров. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 243 с.
50. Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies : материалы, Минск, 31 окт. – 3 нояб. 2011 г. : в 2 ч. / БГУ, Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси, Научно-технологическая ассоциация «Инфопарк» ; редкол.: С. В. Абламейко (отв. ред.) и др. – Минск : БГУ, 2011.
51. Pattern Recognition and Information Processing Processing – PRIP'2011 : proc. 11th Intern. Conf., Minsk, 22–20 May 2011 ; ed.: R. Sadykhov, S. Ablameyko, A. Doudkin, L. Podenok. – Minsk : BSUIR, 2011. – 470 p.
52. Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies : материалы, Минск, 4–7 нояб. 2013 г. ; редкол.: С. В. Абламейко, В. В. Казаченок (отв. ред.) и др. – Минск : БГУ, 2013. – 602 с.
53. Кибернетика и информатика в Национальной академии наук Беларуси: очерки развития / Объед. ин-т проблем информатики Нац. академии наук Беларуси ; науч. ред.: С. В. Абламейко, А. В. Тузиков, О. И. Семенов. – Минск : Тэхналогія, 2015. – 348 с.
54. Университет в современном обществе: БГУ в стране и мире / С. В. Абламейко, С. М. Артемьева, А. П. Богомазов [и др.] ; под общ. ред. акад. С. В. Абламейко. – Минск : БГУ, 2015. – 311 с.
55. Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies : материалы, Минск, 24–27 окт. 2016 г. ; редкол.: С. В. Абламейко (глав. ред.) и др. – Минск : БГУ, 2016. – 1 CD-ROM.
56. Pattern Recognition and Information Processing, Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers 13th Intern. Conf., Minsk, 21–23 Oct. 2016 ; ed.: V. Krasnoproshin, S. Ablameyko. – Springer International Publishing A&G, 2017. – Vol. 1055. – 324 p. (In English).
57. Pattern Recognition and Information Processing, Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers 14th Intern. Conf., Minsk, 21–23 May 2019 ; ed.: S. Ablameyko, V. Krasnoproshin, M. Lukashovich. – Springer International Publishing A&G, 2019. – Vol. 1055. – 328 p. (In English).
58. Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies : материалы, Минск, 27–28 окт. 2022 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) и др. – Минск : БГУ, 2022. – 1 CD-ROM.

УДК 51-76:577.322:539.19:004.94

## Технологии молекулярного моделирования и искусственного интеллекта для разработки потенциальных лекарственных препаратов нового поколения, исследования в области биоинформатики и вычислительной биологии

**Андрианов Александр Михайлович**

*главный научный сотрудник ИБОХ НАН Беларуси,  
доктор химических наук, профессор  
E-mail: alexande.andriano@yandex.ru*

**Тузиков Александр Васильевич**

*заведующий лабораторией математической кибернетики,  
член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор  
E-mail: tuzikov@newman.bas-net.by*

**Введение.** В настоящее время компьютерный дизайн лекарств является эффективным инструментом в фармацевтических технологиях, позволяющим значительно сократить время и затраты, необходимые для разработки новых терапевтических средств [1, 2]. Важную роль в компьютерном скрининге лекарств играет молекулярный докинг, который широко используется для предсказания пространственной структуры комплекса белок-лиганд и наиболее выгодной ориентации лиганда в активном центре целевого белка, оценки энергии связывания и исследования профиля взаимодействия молекул – кандидатов в лекарственные средства с терапевтической мишенью [3]. Последние разработки полуэмпирических квантово-химических методов и методов теории функционала плотности, а также применение *ab initio* расчетов к дизайну молекул-кандидатов в контексте идентификации и оптимизации их структур показывают растущую важность квантовой химии в фармакологических исследованиях [4–6]. Молекулярная динамика (МД) также является мощным методом для скрининга потенциальных лекарств на основе структуры целевого белка [7, 8]. В отличие от молекулярного докинга МД моделирует перемещения каждого атома в силовом поле остальных атомов при явном задании растворителя и более эффективно, чем другие алгоритмы, отражает гибкость как лиганда, так и белка, что позволяет получать более корректные оценки свободной энергии связывания. Примеры успешных применений методов молекулярного докинга, квантовой химии и МД наглядно демонстрируют возможности вычислительных подходов для идентификации соединений с желаемыми свойствами и создания новых лекарств [3–8].

В последние годы при разработке лекарств все чаще используются методы машинного обучения, и в частности глубокого обучения, которые необходимы на каждом этапе этого сложного многоэтапного процесса не только для ускорения исследований, но и для оценки рисков и затрат в клинических исследованиях [9, 10]. Методы машинного обучения могут успешно применяться для решения задач перепрофилирования лекарств [11, 12], прогнозирования структуры белков [13], виртуального скрининга потенциальных лекарств и прогнозирования аффинности связывания белок-лиганд [14, 15]. В недавних работах методы глубокого обучения использовались для скрининга химических баз данных с целью выявления антибактериальных и противовирусных ингибиторов, в том числе терапевтических агентов, потенциально активных против ВИЧ-1 и SARS-CoV-2 [16–19]. Применение этих методов в сочетании с виртуальным скринингом молекулярных библиотек, содержащих одобренные Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA, США) препараты, при-

вело к открытию ряда потенциальных препаратов против SARS-CoV-2 [19]. Кроме идентификации потенциальных лекарств в химических базах данных и прогнозирования их свойств, машинное обучение используется также для создания новых соединений с заданными фармакологическими характеристиками [20–25]. В последние годы глубокие генеративные модели нашли широкое применение в исследованиях по разработке лекарств *de novo* [20–25]. Благодаря стремительному развитию методов глубокого обучения в настоящее время разработаны генеративные модели с различной архитектурой и разными алгоритмами обучения, использующие разные типы и структуры данных. Применение глубоких генеративных моделей уже показало их способность генерировать молекулы, которые могут быть синтезированы, активны *in vitro*, стабильны и проявляют активность на моделях *in vivo*, связанных с различными заболеваниями [19]. В частности, с помощью условно-сопоставительного автоэнкодера был разработан ингибитор Янус-киназы 3, представляющий новый класс иммуномодулирующих средств [23]. С применением генеративного обучения с подкреплением были разработаны активные *in vivo* ингибиторы рецепторов дискоидинового домена 1 и 2 (DDR1 и DDR2), а фармакокинетический профиль DDR1 был подтвержден экспериментами на мышах *in vivo* [25]. Однако несмотря на все большее распространение глубоких генеративных моделей в био- и хемоинформатике, их потенциал в данной области использован еще не полностью. В связи с этим разработка и применение глубоких генеративных моделей для компьютерного дизайна лекарств имеют большое научное и практическое значение.

В настоящей работе приведен обзор основных результатов, полученных группой компьютерного конструирования лекарств ОИПИ НАН Беларуси и ИБОХ НАН Беларуси в 2012–2023 гг. с использованием методов молекулярного моделирования и глубокого обучения и посвященных дизайну и идентификации малых молекул, которые перспективны для разработки противовирусных, антибактериальных и противоопухолевых препаратов нового поколения. В заключительной части обзора вкратце представлены результаты работ лаборатории математической кибернетики ОИПИ НАН Беларуси в области биоинформатики и вычислительной биологии, включающие полногеномный поиск ассоциаций, анализ структурных изменений белков при взаимодействиях и моделирование димерных белковых комплексов. В выполнении этих исследований на различных этапах участвовали А. М. Андрианов, И. В. Анищенко, А. В. Батяновский, И. П. Босько, Т. Д. Войтко, Д. А. Воробьев, А. В. Гончар, А. Д. Карпенко, И. А. Кашин, Т. В. Кирис, Ю. В. Кисель, Ю. В. Корноушенко, И. В. Лайков, Г. И. Николаев, Р. С. Сергеев, М. В. Спринджук, А. В. Тузиков, К. В. Фурс, Н. А. Шульдов, А. Ю. Хадарович, А. М. Юшкевич.

#### **Компьютерный дизайн потенциальных лекарств**

***In silico* дизайн и идентификация потенциальных ингибиторов ВИЧ-1.** В последние годы для терапии ВИЧ-1 в клинической практике используются более 25 лекарственных препаратов, которые в зависимости от механизма действия делятся на классы, включающие ингибиторы обратной транскриптазы, протеазы, интегразы и ингибиторы проникновения. Однако высокая генетическая изменчивость ВИЧ-1 приводит к выработке устойчивости к определенному препарату через некоторое время после начала его применения. С 1995 г. для лечения ВИЧ-инфекции широко используется метод высокоактивной антиретровирусной терапии, основной целью которого является преодоление резистентности вируса к отдельным антиретровирусным препаратам на основе комбинации высокоактивных лекарственных средств, обладающих различными механизмами действия. Однако необходимость пожизненного непрерывного применения нескольких терапевтических препаратов и связанные с этим токсичность и побочные эффекты требуют разработки новых, более эффективных и безопасных анти-ВИЧ-агентов. Большинство из применяемых в клинике препаратов нацелены на вирусные ферменты: обратную транскриптазу и протеазу, но они не могут предотвращать проникновение вируса в клетку-мишень, что повышает внимание к ингибиторам ВИЧ-1, которые способны вмешиваться в ранние стадии жизненного цикла вируса. В связи с этим чрезвычайно актуальным является поиск химических соединений – ингибиторов проникновения ВИЧ-1, блокирующих адсорбцию вируса на поверхности клетки хозяина и последующее слияние мембран.

Для решения данной проблемы в работах [26–28] были использованы методы компьютерного конструирования лекарств, включающие молекулярный дизайн, высокопроизводительный докинг, МД и вычислительные процедуры, предназначенные для оценки сродства лигандов к терапевтической мишени. Согласно данным литературы к соединениям, эффективно взаимодействующим с ВИЧ-1 на ранних стадиях проникновения вируса в клетку-мишень, относится гликозилфинголипид  $\beta$ -галактозилцерамид ( $\beta$ -GalCer). Однако применение этого гликолипида в качестве противовирусного препарата невозможно из-за его нерастворимости в воде. Тем не менее аналоги  $\beta$ -GalCer, потенциально способные образовывать устойчивые коллоидные системы выше критической концентрации мицеллообразования («водорастворимые» аналоги), могут быть использованы как перспективные базовые структуры для создания новых ингибиторов проникновения ВИЧ-1. Одно из таких соединений – деацилированный аналог  $\beta$ -GalCer  $\beta$ -галактозилфингозин (рис. 1) – авторы сконструировали и проанализировали методами молекулярного моделирования, а затем протестировали на анти-ВИЧ-активность в РНПЦ эпидемиологии и микробиологии [29, 30]. Биомедицинские испытания показали наличие ингибирующих свойств у этого соединения: химиотерапевтический индекс  $\beta$ -галактозилфингозина (отношение максимально переносимой концентрации к минимально активной концентрации соединения) составил 40,0 [30], что свидетельствует о высокой степени его анти-ВИЧ-активности. В дальнейших исследованиях были разработаны 12 производных этой молекулы, нейтрализующее действие которых оценено в компьютерных экспериментах [31]. В результате *in silico* оценки свойств этих соединений предсказано, что сконструированные гликолипиды связываются с функционально важным инвариантным участком третьего домена белка gp120 различных модификаций вируса и обладают высоким потенциалом ингибиторной активности [31–34].

Методы компьютерного моделирования были использованы еще в одном новом направлении поиска лекарственных препаратов против ВИЧ-1, основанном на применении анти-ВИЧ-антител, обладающих нейтрализующей активностью против широкого спектра вариантов вируса [35]. Несмотря на интенсивные исследования, многочисленные попытки разработать иммуноген, способный индуцировать антитела к ВИЧ-1 с широкой вирусной нейтрализацией, до сих пор не увенчались успехом [35]. Поэтому представлялся актуальным поиск низкомолекулярных соединений, способных имитировать структурно-функциональные свойства таких антител. С этой целью с помощью методов фармакофорного моделирования, высокопроизводительного докинга и МД были идентифицированы небольшие молекулы – пептидомиметики антител 3074, VRC01, 10E8, обладающих широким спектром действия против ВИЧ-1, а также малые молекулы, имитирующие первичный рецептор CD4, с помощью которого вирус адсорбируется на поверхности мембраны клетки хозяина [36–40]. Полученные результаты свидетельствуют о высокой потенциальной нейтрализующей активности идентифицированных соединений. Согласно данным компьютерного моделирования обнаруженные пептидомиметики антител VRC01, 3074, 10E8 и клеточного рецептора CD4 могут проявлять высокую аффинность связывания с функционально консервативными участками ВИЧ-1, имитируя критические взаимодействия вируса с рецепторами клеточной мембраны [36–40]. В связи с этим высказано предположение о том, что «коктейль» из низкомолекулярных соединений – пептидомиметиков этих антител, блокирующих ключевые стадии процесса проникновения ВИЧ-1 в клетку-мишень, способен подавить репликацию вируса и существенно снизить уровень вирусной нагрузки в плазме крови [40].

В статьях [41, 42] разработан генеративный состязательный автоэнкодер для рационального дизайна потенциальных ингибиторов проникновения ВИЧ-1, способных блокировать участок белка gp120 оболочки вируса, критический для его связывания с клеточным рецептором CD4. Разработанная модель состоит из двух нейросетей – автоэнкодера и дискриминатора, работающих во время обучения в соревновательном режиме (рис. 2). Автоэнкодер представляет собой семислойную нейронную сеть, имеющую входной и выходной слои, латентный слой, а также четыре полносвязных слоя. На входной слой подаются молекулярные дескрипторы химических соединений, данные о которых проходят энкодер и попадают на латентный слой, где к полученному результату добавляется численная оценка энергии связывания с молекулярной мише-

нию. Далее молекулярные дескрипторы проходят декодер и попадают на выход, который представляет собой вектор молекулярного дескриптора. Латентный слой состоит из трех нейронов, два из которых получают значения от энкодера, а третий получает значение энергии связывания с молекулярной мишенью. В рабочем режиме автоэнкодера на латентный слой подаются случайные числа и пороговое значение энергии связывания, которые затем проходят через декодер, генерирующий молекулярные дескрипторы молекул с требуемыми свойствами.

Использование разработанной нейронной сети совместно с виртуальным скринингом молекулярной библиотеки ZINC15, проведенным на основе подбора молекулярных дескрипторов, и методами молекулярного моделирования позволило идентифицировать три низкомолекулярных химических соединения, проявляющих высокое сродство к белку gp120 ВИЧ-1 [42]. Согласно данным молекулярного докинга, машинного обучения, квантово-химических расчетов и МД эти соединения характеризуются низкими значениями свободной энергии связывания в комплексах с белком gp120, близкими к значениям, рассчитанным с помощью идентичных вычислительных протоколов для ингибиторов ВИЧ-1 NBD-11021 и NBD-14010, являющихся мощными антагонистами клеточного рецептора CD4 [42]. Полученные результаты показали, что разработанная нейронная сеть представляет собой эффективную математическую модель для виртуального скрининга баз данных химических соединений, направленного на поиск малых молекул с высоким сродством к белку gp120 и разработку на их основе новых анти-ВИЧ-препаратов широкого спектра действия [41, 42].

В работах [43, 44] предложен комбинированный алгоритм компьютерного конструирования лекарственных препаратов против ВИЧ-1, состоящий из базовых блоков – шагов, включающих:

- 1) формирование базы данных химических соединений, предназначенных для использования в качестве исходных структурных блоков в реакции азид-алкинового циклоприсоединения – основной реакции клик-химии, которая позволяет получать гибридные молекулы, способные обеспечить их связывание с белком gp120 ВИЧ-1 и его нейтрализацию (библиотеки 1 и 2). Формирование базы данных выполняется из набора химических соединений, депонированных в молекулярной библиотеке ZINC15 (<http://zinc.docking.org>), на основе соответствия их физико-химических свойств заданным фильтром параметров;

- 2) компьютерный дизайн молекул-кандидатов с привлечением в качестве исходных структурных блоков соединений, определенных на предыдущем шаге, на основе методов комбинаторики и математического подбора функциональных групп, обладающих потенциалом вступать в реакцию азид-алкинового циклоприсоединения;

- 3) отбор молекул, удовлетворяющих правилу пяти Липинского, накладываемому на молекулу, взаимодействующую с заданной молекулярной мишенью, условия подобия лекарству [45]. На данном шаге практически осуществляется скрининг соединений, полученных на шаге 2; результатом является уменьшенный набор соединений, согласующихся с указанными в правиле пяти Липинского ограничениями;

- 4) построение структурных комплексов сконструированных молекул с белком gp120 ВИЧ-1 с помощью методов молекулярного докинга. На данном шаге задается мишень для отобранных соединений и на основе анализа их геометрического сходства и оценки энергии формируется весовая функция для идентификации потенциальных лекарств. Результатом шага 4 является набор молекул-кандидатов, отобранных по оценочным функциям;

- 5) построение молекулярно-динамической траектории комплексов отобранных соединений с белком gp120 ВИЧ-1 и расчет свободной энергии их образования. На данном шаге выполняется математическое моделирование возможных изменений комплексов во времени для отобранных по результатам докинга соединений. Шаг 5 служит дополнительным к молекулярному докингу фильтром, позволяющим обнаруживать молекулы, формирующие устойчивые комплексы с белковой мишенью.

Таким образом, алгоритм представляет собой двойной каскад фильтров, позволяющий сначала сконструировать из простых соединений гибридные молекулы для формирования возможных комплексов с белком gp120 ВИЧ, а затем отобрать среди них лучшие для связывания и нейтрализации ВИЧ-1. Особенностью алгоритма является метод формирования базы данных

химических соединений на основе молекулярных моделей с потенциальной биологической активностью и методологии клик-химии, которая унифицирует некоторые химические реакции и позволяет получать их результаты прямо на компьютере. Такой подход позволил сформировать с помощью методов компьютерного моделирования базу перспективных соединений – потенциальных ингибиторов ВИЧ, содержащую более миллиона молекул. Реализация данного алгоритма позволила идентифицировать пять химических соединений, перспективных для дальнейших исследований биологами, химиками и медиками на стадиях доклинического и клинического тестирования [44].

В работах [46–49] представлена комплексная методика предсказания потенциальных противовирусных средств, ориентированная на поиск пептидомиметиков анти-ВИЧ-антител и включающая большие вычислительные блоки, которые выполняются в разных программных комплексах:

- блок построения фармакофорной модели антитела с помощью программно-алгоритмического обеспечения веб-сервера Pharmit на основе анализа его комплекса с молекулярной мишенью, полученного, как правило, экспериментальным путем, и последующего виртуального скрининга баз данных химических соединений с использованием заданного набора пространственных и электронных признаков, необходимых для обеспечения оптимальных межмолекулярных взаимодействий;

- блок отбора перспективных химических соединений и построения комплексов лиганд-мишень методами молекулярного докинга (программный пакет AutoDock Vina);

- блок квантово-химического уточнения построенных комплексов (MOPAC2016);

- блок молекулярной динамики (AMBER18).

Особенностью предложенной методики является использование на одном из ее этапов методов квантовой химии, которые до недавнего времени не применялись для моделирования структур белков и их комплексов с лигандами из-за чрезвычайной сложности расчетов, требующих огромных затрат временных и компьютерных ресурсов. Реализация этого блока выполнена с помощью полуэмпирического квантово-химического метода PM7, позволяющего проводить уточнение и оценку результатов молекулярного докинга, что дало возможность существенно повысить качество отбора потенциальных кандидатов в противовирусные средства. В настоящее время разработаны различные программные пакеты, реализующие этапы, которые входят в методику и доступны пользователям в виде клиентских приложений, свободных кодов или коммерческих продуктов. При этом пользователь должен обеспечить согласование форматов данных при переходе от одного этапа моделирования к другому.

Эффективность методики подтверждена в процессе поиска потенциальных пептидомиметиков нейтрализующего ВИЧ-1 антитела N6. В результате поиска были обнаружены девять малых молекул, которые связываются с белком gp120 сильнее, чем лучшие из известных в настоящее время ингибиторов проникновения вируса [46–49]. Разработанная методика универсальна и может быть использована для идентификации малых молекул, перспективных для разработки новых эффективных лекарственных препаратов против других болезней.

**Идентификация потенциальных ингибиторов SARS-CoV-2 методами виртуального скрининга и глубокого обучения.** Вспышка коронавирусной инфекции в Китае, зарегистрированная в конце 2019 г. и вызванная вирусом SARS-CoV-2 (этиологическим агентом COVID-19), стала причиной серьезной обеспокоенности мирового сообщества, так как число инфицированных людей постоянно увеличивалось со значительным географическим распространением. В связи с этим были предприняты многочисленные попытки разработать эффективную противовирусную вакцину и найти новые терапевтические средства против COVID-19. Определение в 2020 г. пространственной структуры основной протеазы ( $M^{Pro}$ ) SARS-CoV-2 – фермента, играющего чрезвычайно важную роль в жизненном цикле вируса, – создало предпосылки не только для понимания его функции и механизма действия, но и для разработки новых эффективных ингибиторов на основе прямых методов компьютерного конструирования лекарств, использующих данные о структуре молекулярной мишени. В частности, 25 марта 2020 г. в Банк данных белков была депонирована структура  $M^{Pro}$  SARS-CoV-2 в комплексе с высокоаффин-

ным лигандом X77 (Банк данных белков, код 6w63, <https://doi.org/10.2210/pdb6W63/pdb>, <http://www.rcsb.org/structure/6W63>), представляющим собой мощный нековалентный ингибитор как SARS-CoV, MERS-CoV, так и SARS-CoV-2.

В работах [50, 51] осуществлен виртуальный скрининг низкомолекулярных химических соединений, имитирующих фармакофорные свойства ингибитора X77, выполнена *in silico* оценка их потенциальной анти-SARS-CoV-2-активности и идентифицированы молекулы, перспективные для создания новых эффективных препаратов для терапии COVID-19.

Проведенные исследования включали следующие этапы (рис. 3):

1) построение модели фармакофора, описывающей совокупность структурно-функциональных свойств ингибитора X77, которые обеспечивают специфичность его взаимодействий с активным центром M<sup>Pro</sup> SARS-CoV-2;

2) фармакофорный анализ молекулярных библиотек веб-сервера Pharmit (<http://pharmit.csb.pitt.edu>), позволяющего проводить интерактивное исследование химического пространства с целью поиска потенциальных лекарств на основе сходства фармакофорных моделей с высокоаффинными лигандами белка-мишени;

3) отбор соединений, удовлетворяющих правилу пяти Липинского;

4) молекулярный докинг отобранных соединений с M<sup>Pro</sup> SARS-CoV-2;

5) расчет величин свободной энергии связывания с последующей идентификацией молекул, перспективных для разработки эффективных противовирусных препаратов.

Виртуальный скрининг осуществляли в девяти молекулярных библиотеках веб-сервера Pharmit, содержащих информацию о химических структурах более 213,5 миллионов молекул (<http://pharmit.csb.pitt.edu>). В результате был идентифицирован набор соединений, удовлетворяющих заданной модели фармакофора и правилу пяти Липинского, и с помощью методов молекулярного моделирования проведена оценка потенциала их ингибиторной активности против M<sup>Pro</sup>, в результате которой обнаружены пять соединений-лидеров, перспективных для синтеза и тестирования на противовирусную активность [51].

К сожалению, у авторов не было возможности провести синтез и тестирование обнаруженных соединений на анти-SARS-CoV-2-активность за относительно небольшой промежуток времени. В связи с этим было принято решение использовать стратегию перепрофилирования лекарств, под которой понимается процесс определения новых терапевтических показаний для зарегистрированных ранее и доступных препаратов. Так как профили безопасности этих препаратов хорошо задокументированы, виртуальный скрининг молекулярных библиотек лекарственных веществ может существенно облегчить и ускорить процесс обнаружения молекул с клиническим потенциалом с целью их перепрофилирования для лечения пациентов, инфицированных коронавирусом нового типа. Для реализации этого подхода была сформирована библиотека биологически активных молекул, состоящая из 28 860 молекул и включающая одобренные для применения в клинике препараты и лекарственные вещества, находящиеся на различных стадиях доклинических и клинических испытаний, и методами молекулярного моделирования проведен ее виртуальный скрининг, направленный на идентификацию потенциальных ингибиторов M<sup>Pro</sup> SARS-CoV-2 [52].

Выполненные расчеты позволили идентифицировать шесть молекул, проявляющих высокое сродство к активному центру M<sup>Pro</sup> SARS-CoV-2 [52]. Об этом свидетельствуют низкие значения свободной энергии образования комплексов этих соединений с ферментом, сопоставимые с величиной, предсказанной для мощного ингибитора SARS-CoV-2 X77 с использованием идентичного вычислительного протокола. На основе полученных данных был сделан вывод о том, что найденные соединения обладают хорошим терапевтическим потенциалом для ингибирования каталитической активности фермента и формируют перспективные базовые структуры для разработки новых эффективных препаратов против COVID-19 [52]. В настоящее время совместно с партнерами из Шанхайского института лекарственных соединений Китайской академии наук выполняются исследования по тестированию идентифицированных соединений на моделях *in vitro* и оптимизации их структур.

В работах [53–55] с использованием методов глубокого обучения разработаны две генеративные модели автоэнкодера для создания новых лекарственных веществ, способных ингибировать каталитическую активность  $M^{Pro}$  SARS-CoV-2. Построена архитектура нейронной сети (рис. 4), сформирована виртуальная библиотека потенциальных ингибиторов фермента и выполнен виртуальный скрининг соединений из этой библиотеки с последующими расчетами значений свободной энергии связывания. Обучение нейронной сети и ее тестирование показали, что созданные модели автоэнкодера позволяют генерировать малые молекулы с высокой противовирусной активностью и приемлемыми фармакологическими свойствами [53]. С помощью разработанной нейронной сети осуществлен *de novo* дизайн 95 775 потенциальных ингибиторов  $M^{Pro}$  SARS-CoV-2 с последующей *in silico* оценкой их ингибиторной активности [54, 55]. В результате проведенных исследований отобраны семь соединений-лидеров, которые характеризуются низкими значениями свободной энергии связывания, близкими к величинам, полученным с помощью идентичного вычислительного протокола для двух мощных нековалентных ингибиторов  $M^{Pro}$ , использованных в расчетах в качестве позитивного контроля [55]. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения идентифицированных соединений в работах по созданию новых препаратов против COVID-19, терапевтическое действие которых основано на ингибировании ферментативной активности  $M^{Pro}$  SARS-CoV-2 [55].

Технология перепрофилирования лекарств была также использована еще в одном исследовании, в котором с помощью комплексного вычислительного подхода проведен виртуальный скрининг сформированной ранее молекулярной библиотеки [52], направленный на идентификацию потенциальных ингибиторов домена HR1 белка S SARS-CoV-2 – консервативного участка вируса, критически важного для слияния мембран и его проникновения в клетку-мишень [56, 57]. Методами молекулярного моделирования идентифицированы 12 молекул, характеризующихся согласно расчетным данным высоким сродством к этому функционально значимому домену оболочки вируса [56]. В результате биомедицинского тестирования девяти из двенадцати идентифицированных молекул, проведенного в Университете Фудань (Шанхай, Китай), обнаружено соединение-лидер – противоопухолевый препарат Навитоклак (рис. 5) [57]. Показано, что Навитоклак проявляет высокую противовирусную активность по отношению к различным штаммам SARS-CoV-2, в том числе практически ко всем субвариантам штаммов Дельта и Омикрон, со значениями константы ингибирования  $IC_{50}$ , варьирующими в диапазоне от 0,5 до 3,7 мкМ, а также к родственным коронавирусам SARS-CoV и MERS-CoV [57]. На моделях *in vitro* показано, что Навитоклак селективно связывается с терапевтической мишенью, блокируя проникновение вируса в клетки хозяина [57]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что Навитоклак формирует многообещающую основу для создания эффективного и безопасного перорального препарата широкого спектра действия против SARS-CoV-2 и других известных коронавирусов человека, а также их новых вариантов, которые могут появиться в ближайшем будущем.

***In silico* скрининг потенциальных ингибиторов микобактерии туберкулеза.** В октябре 2018 г. Организация Объединенных Наций провела беспрецедентное совещание высокого уровня с целью привлечь внимание к эпидемии туберкулеза (ТБ) и разработать стратегию, направленную на его ликвидацию к 2030 г. (A/RES/73/3. 2018; <https://www.stoptb.org/sites/default/files/UN%2520Declaration%2520on%2520TB.pdf>). Однако пандемия COVID-19 существенно снизила прогресс, достигнутый в борьбе с ТБ во всем мире, а уровень смертности от этого инфекционного заболевания увеличился впервые за более чем 10 лет. На сегодняшний день ТБ продолжает оставаться одной из 10 основных причин смертности во всем мире и ведущей причиной смерти пациентов с ВИЧ и сахарным диабетом прежде всего из-за резистентности к противомикробным препаратам, используемым в клинической практике. Возрастающая распространенность лекарственной устойчивости представляет собой серьезную проблему для эффективной борьбы с ТБ. В связи с этим одной из ключевых задач, стоящих перед научным сообществом, является лечение ТБ с множественной и широкой лекарственной устойчивостью. Это определяет актуальность, важность и практическую значимость исследований по разработ-

ке новых эффективных антибактериальных препаратов широкого спектра действия, воздействующих на функционально важные участки микобактерии туберкулеза (МБТ).

Среди белковых мишеней, играющих важную роль в биосинтезе клеточной стенки МБТ, особое внимание следует уделить бета-кетоацил-(ацил-белок-носитель)-синтазе I (KasA) – одному из ключевых ферментов пути FAS-II синтеза жирных кислот. Потеря активности KasA приводит к лизису клеток бактерии. Это указывает на то, что данный белок может иметь ключевое значение для жизненного цикла МБТ и, следовательно, является важной мишенью при разработке новых эффективных препаратов для терапии лекарственно-устойчивых форм ТБ.

С целью идентификации соединений, способных блокировать фермент KasA МБТ, в работе [58] был выполнен виртуальный скрининг библиотеки [52], который включал: молекулярный докинг белка C171Q KasA с соединениями из библиотеки биоактивных молекул; оценку сродства этих соединений к активному центру фермента с помощью трех оценочных функций с последующим расчетом экспоненциального консенсусного ранга (ECR) для каждого соединения и ранжированием лигандов по значениям ECR; МД комплексов лиганд-C171Q KasA и расчеты свободной энергии их образования для лучших по значениям ECR-соединений; анализ результатов МД для идентификации наиболее перспективных соединений – кандидатов в лекарственные средства, способных ингибировать каталитическую активность фермента KasA МБТ.

В результате проведенных исследований были идентифицированы шесть перспективных соединений (рис. 6), обладающих высоким сродством к каталитическому центру фермента [58]. При этом значения свободной энергии связывания этих соединений с белком C171Q KasA оказались значительно ниже по сравнению с величинами, рассчитанными с использованием идентичных вычислительных протоколов для известного ингибитора KasA TLM5 [58]. Эти результаты позволяют предположить, что идентифицированные соединения формируют перспективные базовые структуры для разработки новых противотуберкулезных агентов, имеющих клиническое значение и обладающих высокой активностью против белка KasA МБТ. Поскольку идентифицированные соединения были найдены в библиотеке одобренных FDA лекарств и экспериментальных препаратов-кандидатов, их фармакологические свойства известны или находятся на стадии изучения. Очевидно, что это может существенно сократить время и затраты, связанные с длительным процессом создания новых эффективных лекарств, обладающих высокой антибактериальной активностью и приемлемыми фармакологическими свойствами.

Анализ терапевтических профилей обнаруженных соединений показывает, что соединение I (рис. 6) – Лумакафтор – является одобренным FDA препаратом, соединения II и III имеют статус экспериментальных препаратов, а соединения IV–VI представляют собой исследуемые кандидаты в лекарственные средства. В частности, Лумакафтор используется в клинике в комбинации с Ивакафтором для лечения пациентов с муковисцидозом. Поскольку Лумакафтор имеет хорошую пероральную биодоступность, зрелую технологию производства и хорошо охарактеризованную безопасность *in vivo*, этот препарат может быть быстро перепрофилирован и разработан как противотуберкулезное средство для клинического использования в ближайшем будущем.

С целью предварительной оценки антимикобактериального эффекта Лумакафтора исследователи из Университета Фудань (Шанхай, Китай) измерили минимальную ингибиторную концентрацию (МИК50) этой молекулы против вакцинного штамма *Mycobacterium bovis* BCG – облигатного аэробного медленно растущего штамма микобактерий, тесно связанного с МБТ. Полученные результаты показали, что эта молекула имеет значение МИК50, равное 62,5 мкМ и совпадающее с величиной, опубликованной для ингибитора KasA МБТ тиолактомицина [58]. В совокупности данные результаты указывают на то, что Лумакафтор является многообещающим кандидатом в лекарственное средство для лечения ТБ.

В настоящее время китайские партнеры из Университета Фудань проводят биомедицинские испытания найденных *in silico* соединений на *in vitro* моделях штаммов МБТ с множественной лекарственной устойчивостью.

Исследования белорусской группы проводились в рамках международного проекта по разработке информационного портала по лекарственно-устойчивому туберкулезу (<https://tbportals.niaid.nih.gov>).

**Дизайн, *in silico* и *in vitro* оценка противоопухолевой активности новых потенциальных ингибиторов тирозинкиназы Bcr-Abl.** Тирозинкиназа Bcr-Abl играет ключевую роль в патогенезе хронического миелоидного лейкоза (ХМЛ), характеризующегося быстрым неконтролируемым ростом миелоидных клеток в периферической крови и костном мозге, и в 20–50 % случаев является причиной острого В-лимфобластного лейкоза взрослых. За последние два десятилетия для лечения ХМЛ разработано достаточно много ингибиторов тирозинкиназы Bcr-Abl, проявляющих высокую ингибиторную активность и эффективных во многих случаях, когда возникает резистентность к этому препарату. Их применение позволило значительно увеличить продолжительность жизни пациентов с ХМЛ, а также некоторыми стромальными опухолями желудочно-кишечного тракта. Однако наряду с терапевтическим эффектом лечение этими препаратами может сопровождаться рядом побочных эффектов, связанных с их относительно высокой токсичностью, а мутации, возникающие в каталитическом центре фермента, могут вызывать резистентность к используемым препаратам, оставляя пациентам ограниченные возможности лечения. На сегодняшний день мутация T315I в каталитическом центре фермента является главной причиной развития первичной и вторичной резистентности к терапии ингибиторами тирозинкиназы Bcr-Abl у пациентов с хронической фазой ХМЛ. В связи с этим в настоящее время проводятся многочисленные исследования по разработке ингибиторов тирозинкиназы Bcr-Abl, эффективных для лечения больных ХМЛ с непереносимостью предшествующей терапии.

Совместно с сотрудниками ИХНМ НАН Беларуси и ИФОХ НАН Беларуси в работе [59] авторами был осуществлен дизайн малых молекул, содержащих фармакофорные группы, способные обеспечить высокое сродство этих соединений к активному центру нативной и мутантной (T315I) тирозинкиназы Bcr-Abl. Выполнена *in silico* оценка их ингибиторного потенциала с последующим определением противоопухолевой активности на моделях *in vitro*. Для решения данной задачи был использован комплексный подход, который включал следующие этапы: компьютерное конструирование молекул; молекулярный докинг этих соединений с каталитическим центром нативной и мутантной тирозинкиназы Bcr-Abl; МД комплексов лиганд-Bcr-Abl и расчет свободной энергии их образования; синтез соединений и оценку их ингибиторной активности на моделях опухолевых клеток линий K562 (хронический миелоидный лейкоз), HL-60 (острый промиелоцитарный лейкоз) и HeLa (карцинома шейки матки). В результате совместного анализа расчетных и экспериментальных данных выявлены три соединения (рис. 7), проявляющие противоопухолевую активность по отношению к клеткам линий K562 и HL-60 [59]. Обнаружено соединение-лидер (соединение I на рис. 7), демонстрирующее эффективное ингибирование роста этих клеток, что подтверждается низкими значениями IC<sub>50</sub>, равными 2,80 ± 0,76 мкМ (K562) и 3,51 ± 0,23 мкМ (HL-60). Все идентифицированные соединения удовлетворяют правилу пяти Липинского и согласно данным компьютерного прогнозирования обладают приемлемой токсичностью. Полученные данные позволяют предположить, что идентифицированные соединения могут служить основой для разработки новых эффективных лекарственных препаратов, способных ингибировать каталитическую активность тирозинкиназы Bcr-Abl путем блокирования АТР-связывающей полости фермента. Кроме того, обнаруженные соединения могут быть использованы для создания многоцелевых ингибиторов протеинкиназ, что подтверждается полученными данными об их противоопухолевой активности по отношению к линии клеток острого промиелоцитарного лейкоза HL-60, характеризующегося образованием аномального онкогенного фузионного белка PML-RARalpha. В связи с этим одно из дальнейших направлений развития настоящей работы предполагает исследование механизма действия идентифицированных соединений на *in vitro* моделях потенциальных терапевтических мишеней.

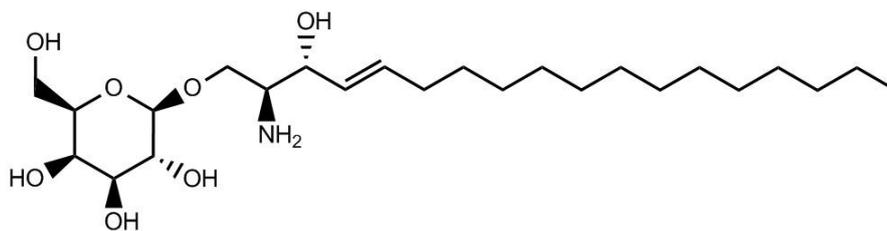


Рис. 1. Химическая структура β-галактозилсфингозина – ингибитора белка gp120 оболочки ВИЧ-1

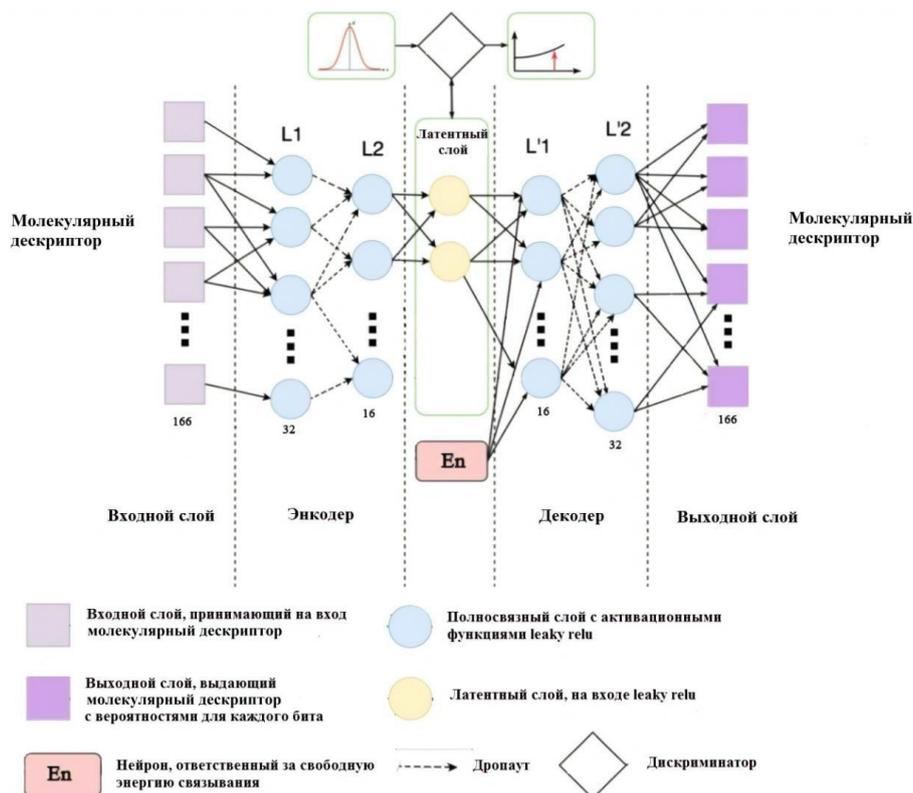


Рис. 2. Архитектура нейронной сети для генерации потенциальных ингибиторов ВИЧ-1, блокирующих CD4-связывающий сайт белка gp120 оболочки вируса [41, 42]



Рис. 3. Схема алгоритма виртуального скрининга потенциальных ингибиторов M<sup>Pto</sup> SARS-CoV-2 [50, 51]

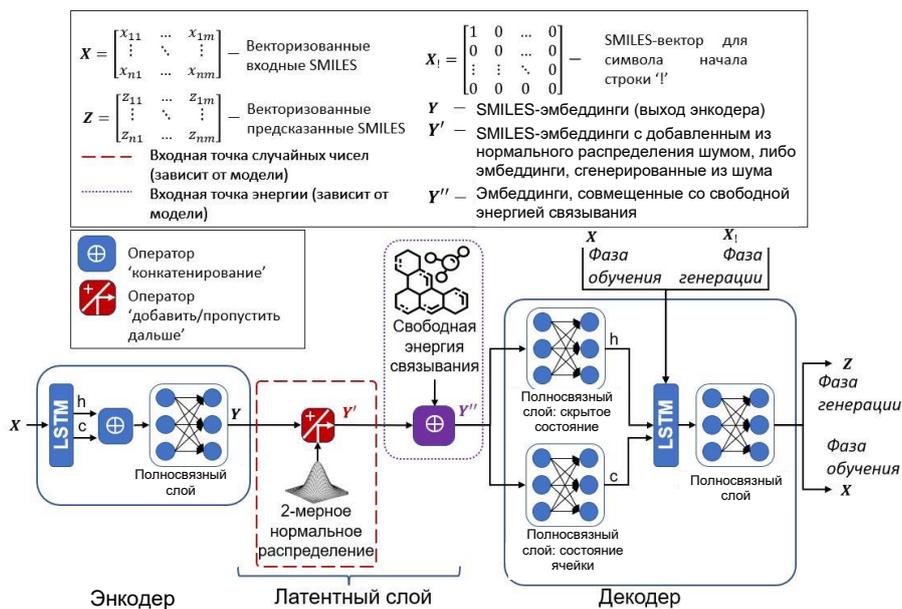


Рис. 4. Высокоуровневая архитектура моделей разработанной нейронной сети [53, 55]

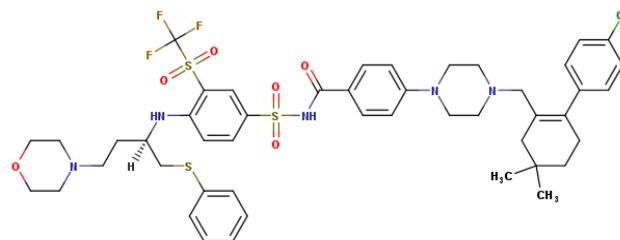


Рис. 5. Химическая структура Навитоклакса [57]

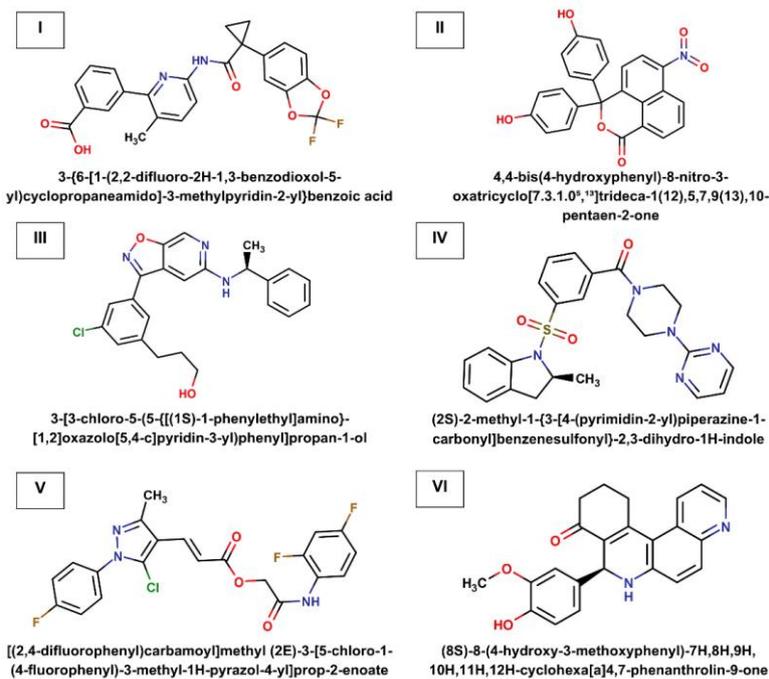


Рис. 6. Химические структуры идентифицированных соединений (приведены систематические названия молекул)

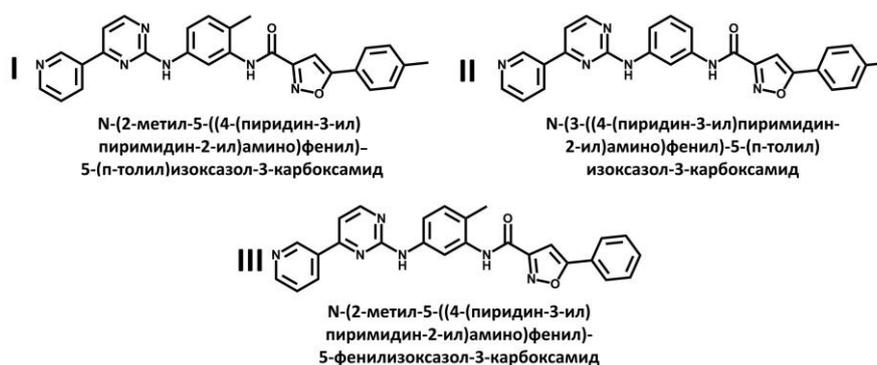


Рис. 7. Химические структуры ингибиторов роста опухолевых клеток K562 и HL-60 [59]

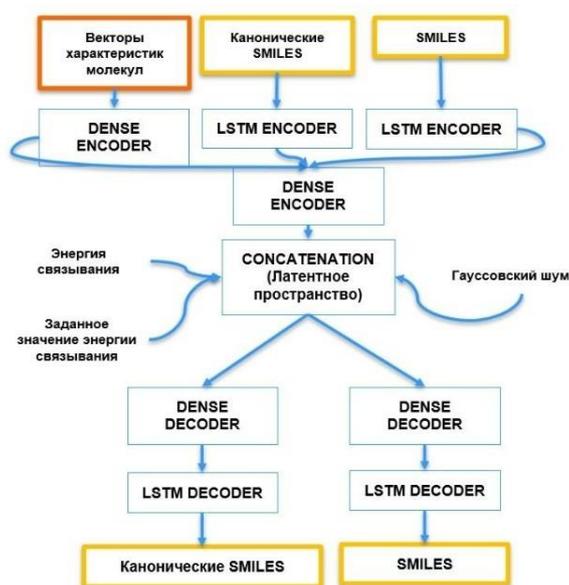


Рис. 8. Архитектура разработанной модели гетероэнкодера [60]

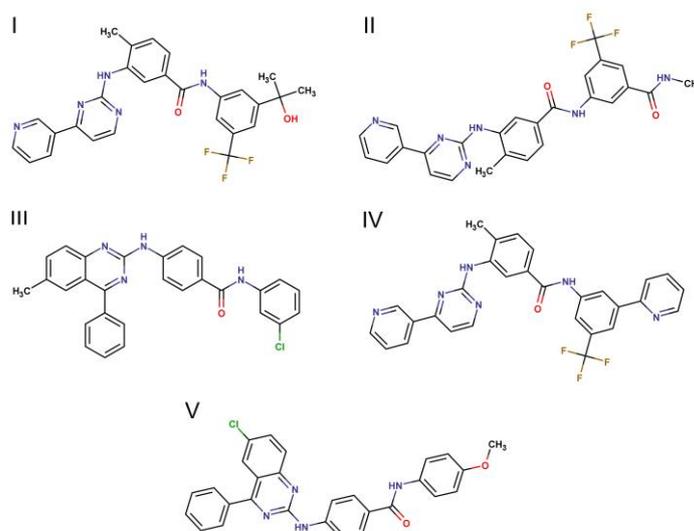


Рис. 9. Химические структуры идентифицированных соединений – потенциальных ингибиторов Vsrc-Abl тирозинкиназы и ее мутантной формы T3151 (названия соединений соответствуют систематической номенклатуре ИЮПАК [61])

*De novo* дизайн потенциальных ингибиторов Vcr-Abl тирозинкиназы методами глубокого обучения и виртуального скрининга. В работе [60] на основе рекуррентных и полносвязных нейронных сетей прямого распространения создана модель генеративной нейронной сети для компьютерного дизайна потенциальных ингибиторов тирозинкиназы Vcr-Abl, проведены обучение и тестирование этой модели на наборе химических соединений, которые содержат 2-ариламинопиримид, присутствующий в качестве основного фармафора в структурах многих низкомолекулярных ингибиторов протеинкиназ. Разработанная модель нейронной сети (рис. 8) базируется на архитектуре гетероэнкодера – автоэнкодера, предназначенного для решения задач, в которых входные данные представлены в нескольких разных форматах. Такая архитектура нейронной сети позволяет получать более информативное латентное пространство за счет большего числа начальных признаков, что расширяет возможности поиска зависимостей между ними в процессе ее обучения. В исследовании [60] была реализована модель гетероэнкодера с тремя энкодерами и двумя декодерами, которая использует открытую библиотеку Keras (<https://keras.io>), обеспечивающую работу с искусственными нейронными сетями. В этой модели входные данные задаются в строковых форматах SMILES (Simplified Molecular Input Line Entry System) и канонический SMILES, а также числовым вектором характеристики молекулы (<https://www.rdkit.org/docs/source/rdkit.Chem.Descriptors.htm>) (рис. 8).

С помощью разработанной модели нейронной сети в работе [61] был получен набор из 1083 новых молекул-кандидатов и методами молекулярного докинга и МД выполнен анализ их сродства к активным центрам тирозинкиназы Vcr-Abl и ее модификации T315I. В результате проведенных исследований идентифицированы пять соединений-лидеров (рис. 9), обладающих согласно расчетным данным лекарственными свойствами и характеризующихся низкими значениями свободной энергии связывания с ферментом, которые сопоставимы с величинами, предсказанными для иматиниба, нилотиниба и понатиниба – противоопухолевых препаратов, широко используемых в клинике для лечения пациентов с ХМЛ.

Совместный анализ данных компьютерного моделирования позволяет предположить, что сконструированные с помощью технологий искусственного интеллекта соединения представляют значительный интерес для проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, включающих синтез, биомедицинские испытания *in vitro* и оптимизацию их структур, направленную на получение аналогов с улучшенной противоопухолевой активностью и приемлемыми фармакокинетическими и токсикологическими параметрами. Сгенерированные *de novo* соединения I, II и IV, содержащие 2-ариламинопиримидин (рис. 9), могут также быть использованы для разработки ингибиторов протеинкиназ многоцелевого действия. Это подтверждается многочисленными исследованиями, свидетельствующими о том, что производные 2-ариламинопиримидина обладают большим потенциалом в качестве кандидатов в лекарственные средства для противоопухолевой терапии.

#### **Биоинформатика и вычислительная биология**

*Полногеномный поиск ассоциаций [62–64].* Полногеномный поиск ассоциаций (Genome-Wide Association Study, GWAS) является мощным инструментом, позволяющим выполнять поиск мутаций в геномах живых организмов, связанных с фенотипическими признаками, под которыми могут пониматься как отдельные биологические свойства и характеристики, присущие организмам, так и их совокупность. Задача полногеномного поиска ассоциаций является частным случаем более общей задачи отбора признаков, где в качестве признаков выступают геномные мутации, представляющие собой отличия в ДНК-последовательностях организмов. При этом переменная, которая характеризует измеряемый фенотипический признак, может быть категориальной или количественной и принимать дискретные или непрерывные значения.

Исследование генетических или геномных маркеров имеет большое практическое значение для своевременной диагностики и понимания биологических механизмов становления лекарственной устойчивости микроорганизмов. В отличие от комплексных заболеваний человека, где гены могут играть определенную роль, молекулярные основы лекарственной устойчивости, как правило, напрямую связаны с мутационными изменениями в последовательностях ДНК

микроорганизмов, возникающими в ходе естественного отбора или под воздействием применяемых препаратов при ненадлежащем лечении.

За прошедшее десятилетие был достигнут значительный прогресс в разработке методов полногеномного анализа ассоциаций. Вместе с тем существует ряд сложностей, связанных с их применением на практике. Прежде всего эти сложности обусловлены большим числом подлежащих проверке геномных мутаций, наличием взаимозависимостей между ними, слабыми ассоциациями между геномными мутациями и фенотипическими признаками. Решение возникших задач особенно актуально для исследований, где фенотип описывается принадлежностью к одному из двух классов, что обычно имеет место при анализе лекарственной устойчивости, поскольку в случае дискретных или непрерывных значений фенотипа статистические тесты, как правило, позволяют иметь большую мощность и лучшую интерпретируемость результатов.

В лаборатории математической кибернетики ОИПИ НАН Беларуси разработан метод, позволяющий автоматизировать поиск алгоритма машинного обучения, который с точки зрения используемого критерия качества (F-мера, доля верных ответов) эффективно находит статистические взаимосвязи в пространстве бинарных переменных и может применяться для решения задачи поиска ассоциаций между геномными мутациями и бинарным откликом [64].

Разработан алгоритм, позволяющий выполнять анализ первичных последовательностей белков ВИЧ-1 с целью определения мутаций, связанных с проведением противовирусной терапии. Был предложен способ оценки коррелированности мутаций в позициях белков ВИЧ-1, основанный на расчете коэффициента ранговой корреляции и учитывающий эволюционную взаимосвязанность исследуемых образцов вируса [62].

Разработан алгоритм поиска мутаций в полных геномах микобактерий туберкулеза, связанных с развитием устойчивости к лекарственным препаратам. Алгоритм основан на применении методов однофакторного и многофакторного анализа данных и использует графическую модель для окончательного отбора значимых признаков, что позволяет оценивать вклад мутаций в совокупности и корректировать результаты в случае их противоречивости [63].

Разработан алгоритм поиска информативно-значимых комбинаций бинарных переменных, позволяющий без полного перебора всевозможных вариантов определять комбинации геномных мутаций, ассоциированные с исследуемым бинарным откликом. Предложенный алгоритм может использоваться как шаг предварительного отбора переменных при построении моделей, допускающих наличие взаимодействующих переменных [64].

#### **Исследования в области структурной и вычислительной биологии**

Лаборатория математической кибернетики ОИПИ НАН Беларуси работала в области структурной и вычислительной биологии в тесном контакте с Центром биоинформатики Университета Канзаса (США), который возглавлял профессор Илья Ваксер (<https://molecularbiosciences.ku.edu/people/ilya-vakser>).

*Анализ структурных изменений белков при взаимодействиях [65–68].* Понимание процессов взаимодействия белков является необходимым шагом для моделирования биохимических взаимодействий в живой клетке, что служит основой для создания лекарств. Информация о схожести пространственных структур белков в значительной степени облегчает предсказание функций неизвестных белков и определение отдаленных эволюционных связей между белками.

Несмотря на разнообразие алгоритмов прогнозирования взаимодействия белков (белок-белкового докинга), задача предсказания комплекса белков по их свободным структурам на в период 2012–2018 гг. интенсивно исследовалась многими научными группами. Поскольку часто при взаимодействии пространственные структуры белков изменяются, другим важным аспектом докинга является учет гибкости белка. Включение гибкости структур белка в алгоритмы докинга значительно усложняет их из-за увеличения числа степеней свободы, что приводит к существенному увеличению времени работы алгоритмов и большому числу ложноположительных результатов.

Для дальнейшего улучшения протоколов докинга необходимо было понять связь между энергетическими ландшафтами и изменениями пространственных структур белков при взаимодействии. Преимуществом современных компьютерных технологий является то, что они поз-

воляют извлекать дополнительные знания из больших объемов данных, накопленных экспериментальными методами.

В лаборатории математической кибернетики ОИПИ НАН Беларуси разработан алгоритм предсказания взаимодействия белков, базирующийся на использовании структурной схожести с белок-белковым интерфейсом из базы данных. Алгоритм основан на выравнивании пространственных структур пары свободных белков с пространственной структурой белок-белкового интерфейса из базы данных. Выравнивание реализуется с помощью метода динамического программирования путем максимизации корреляции между матрицами расстояний интерфейса и белка и выполнения преобразования движения в трехмерном пространстве. Для каждой пары свободных белков строится 10 наиболее предпочтительных моделей комплекса на основе интерфейсов с наибольшей схожестью.

Для построения библиотек ротамеров разработан иерархический алгоритм кластеризации с изменяемым радиусом сфер, покрывающих пространство, который позволяет более точно аппроксимировать форму распределения двугранных углов аминокислот. На основе библиотек были построены карты и матрицы переходов боковых цепей аминокислот из свободного состояния в связанное. Построенные библиотеки, карты и матрицы переходов являются важным инструментом при переборе возможных структур боковых цепей аминокислот в алгоритмах предсказания взаимодействия белков, поскольку позволяют значительно уменьшить вычислительную сложность алгоритмов.

Для моделирования белок-белковых взаимодействий разработан способ подтверждения гипотезы механизма выбора связанной структуры белка при взаимодействии, основанный на моделировании энергетического ландшафта и структурной схожести интерфейса набора связанных и свободных структур белков; определены энергетические характеристики набора свободных и связанных структур белков; подтвержден механизм конформационного выбора для четырех из шести рассмотренных белков.

**Моделирование димерных белковых комплексов [69–72].** Белок-белковые взаимодействия определяют большинство процессов в клетке и базируются на их специфическом контакте, для которого необходима определенная пространственная структура. Поэтому биологическая функция белков определяется их уникальной трехмерной структурой, даже небольшие изменения которой часто ведут к утере или резкому изменению активности.

Вступая во взаимодействие, белки образуют белок-белковый комплекс. Задача нахождения трехмерной структуры комплекса, образованного при взаимодействии белков, называется белковым докингем. Так же как и в случае индивидуальных белков, экспериментальные методы для определения структуры комплекса могут использоваться в ограниченном количестве случаев и требуют длительного времени, а в массовом порядке и вовсе неприменимы. Поэтому ускоренное развитие получили вычислительные методы, которые позволяют получать трехмерные структуры комплексов быстро, используя в качестве входных данных трехмерные структуры белков, составляющих комплекс. Наибольшее значение при этом имеет область связывания белков, или интерфейс белкового комплекса, поскольку именно в данной области находятся аминокислоты, являющиеся необходимыми для образования комплекса, который, в свою очередь, выполняет соответствующую функцию в организме.

В лаборатории математической кибернетики ОИПИ НАН Беларуси была рассмотрена задача моделирования димерных белковых комплексов, т. е. состоящих из двух белков, разработаны алгоритмы, позволяющие решать эту задачу, а также общий подход к моделированию димерных белковых комплексов.

Получены следующие новые результаты:

1. Алгоритм моделирования структур димерных белковых комплексов с выбором шаблона на основе генной онтологии, позволяющий эффективно строить и ранжировать их модели в случае, когда структуры белков, которые поступают на вход алгоритма, неточно соответствуют экспериментальным данным, и показавший на тестовом множестве более высокую точность по сравнению с другими алгоритмами [69, 70].

2. Алгоритм генерации структур внутрибелковых мотивов на основе представления структуры белка в виде графа, с помощью которого было проведено структурное и функциональное сравнение межмолекулярных интерфейсов и внутримолекулярных мотивов, показавшее, что их свойства, включающие структурный состав и укладку, в значительной степени различаются. Алгоритм позволил определить структуры, которые могут использоваться в качестве дополнительной информации при моделировании белковых комплексов и включают междоменные интерфейсы, а также три класса структурных мотивов внутри белка [72].

3. Алгоритм предсказания области связывания гомодимерных белковых комплексов на основе нейронной сети глубокого обучения, который для 53 % протестированных комплексов правильно идентифицировал большую часть интерфейсных элементов и обеспечил существенное сокращение количества возможных ориентаций структур белков относительно друг друга при моделировании комплекса [71].

4. Алгоритм моделирования структур димерных белковых комплексов на основе матрицы контактов, позволивший получать на тестовом множестве белковых комплексов корректные трехмерные модели для 94 % гетеродимеров и 96 % гомодимеров [71].

**Заключение.** Как было отмечено выше, в настоящее время в разработке новых лекарственных препаратов продолжает увеличиваться роль молекулярного моделирования и машинного обучения. Однако современный уровень развития компьютерных методик не позволяет создавать новые лекарства, используя только компьютеры, но существенно сокращает время их выпуска и снижает стоимость разработки. Современные технологии конструирования лекарств включают *in silico* идентификацию низкомолекулярных соединений с высокой потенциальной активностью и приемлемыми фармакологическими характеристиками с последующим их синтезом, анализом терапевтической эффективности, оптимизацией соединений-лидеров, направленной на улучшение их ингибиторной активности и фармакологических свойств, синтезом оптимизированных соединений и их детальными биомедицинскими испытаниями. Исследования *in silico* были реализованы во всех представленных в настоящем обзоре работах, а в ряде из них проведено тестирование идентифицированных в компьютерных экспериментах соединений на моделях *in vitro*. Поэтому дальнейшее развитие наших исследований предполагает реализацию последующих этапов многостадийного процесса создания новых лекарственных препаратов. Продолжаются также работы в области биоинформатики и вычислительной биологии.

**Защиты диссертаций.** При выполнении исследований были защищены следующие диссертации:

Кирис Т. В. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Анализ и моделирование структурных изменений белков при взаимодействиях» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (05.03.2013).

Анищенко И. В. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Компьютерное моделирование новых потенциальных анти-ВИЧ агентов, блокирующих белок gp120 оболочки вируса» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (07.10.2014).

Корноушенко Ю. В. – диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук «Конструирование потенциальных ингибиторов ВИЧ-1 на основе гликофинголипидов методами молекулярного моделирования и химического синтеза» по специальности 02.00.10 – Биоорганическая химия (28.02.2017).

Кашин И. А. – диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук «Компьютерный скрининг и идентификация потенциальных ингибиторов ВИЧ-1 на основе высокоаффинных лигандов белков оболочки вируса» по специальности 02.00.10 – Биоорганическая химия (18.01.2018).

Сергеев Р. С. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Алгоритмы анализа и поиска ассоциаций в генетических данных» по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (17.09.2019).

Хадарович А. Ю. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Алгоритмы моделирования димерных белковых комплексов» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (02.02.2020).

Николаев Г. И. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка алгоритмов, основанных на технологии глубокого обучения и молекулярном моделировании, для конструирования потенциальных ингибиторов проникновения ВИЧ-1» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (23.06.2022).

### Конкурсы и премии

2015 г.: ТОП 10 результатов НАН Беларуси за 2015 г. (А. В. Тузиков, А. М. Андрианов, И. А. Кашин, Ю. В. Корноушенко) за обнаружение на основе компьютерного скрининга и моделирования новых низкомолекулярных химических соединений с ароматическими фрагментами, формирующих перспективные базовые структуры для создания эффективных лекарственных препаратов против ВИЧ/СПИД с широким спектром нейтрализующего действия.

2017 г.: премия Национальной академии наук Беларуси «Компьютерный дизайн потенциальных ингибиторов ВИЧ-1, перспективных для создания противовирусных препаратов нового поколения» (А. М. Андрианов, И. А. Кашин, А. В. Тузиков).

2020 г.: ТОП 10 результатов НАН Беларуси за 2020 г. (А. М. Андрианов, И. П. Босько, А. Д. Карпенко, Ю. В. Корноушенко, А. В. Тузиков) за идентификацию методами компьютерного скрининга и молекулярного моделирования потенциальных ингибиторов коронавируса SARS-CoV-2.



ТОП 10 результатов НАН Беларуси за 2015 г.,  
В. Г. Гусаков, А. В. Тузиков, А. М. Андрианов, И. А. Кашин, Ю. В. Корноушенко



На симпозиуме в Шэньчжэне, Китай, 27–30 октября 2018 г.,  
Г. И. Николаев, А. В. Тузиков, проф. Shibo Jiang, А. М. Андрианов, Ю. В. Корноушенко



Семинар по проекту ANSO-CR-PP-2021-04, Шанхай (Китай), 18 апреля 2023 г.,  
А. В. Тузиков, проф. Hong Liu

### Публикации

1. Current trends in computer aided drug design and a highlight of drugs discovered via computational techniques: A review / V. T. Sabe, T. Ntombela, L. A. Jhamba [et al.] // *European Journal of Medicinal Chemistry*. – 2021. – Vol. 224. – P. 113705.
2. Current perspectives and trend of computer-aided drug design: a review and bibliometric analysis / Z. Wu, S. Chen, Y. Wang [et al.] // *International Journal of Surgery*. – 2024. – Vol. 110, no. 6. – P. 3848–3878.
3. Fan, J. Progress in molecular docking / J. Fan, A. Fu, L. Zhang // *Quantitative Biology*. – 2019. – Vol. 7. – P. 83–89.
4. Cavasotto, C. N. Quantum chemical approaches in structure-based virtual screening and lead optimization / C. N. Cavasotto, N. S. Adler, M. G. Aucar // *Frontiers in Chemistry*. – 2018. – Vol. 6. – P. 188.

5. Ryde, U. Ligand-binding affinity estimates supported by quantum-mechanical methods / U. Ryde, P. Söderhjelm // *Chemical Reviews*. – 2016. – Vol. 116. – P. 5520–5566.
6. Yilmazer, N. D. Prospects of applying enhanced semi-empirical QM methods for 2101 virtual drug design / N. D. Yilmazer, M. Korth // *Current Medicinal Chemistry*. – 2016. – Vol. 23. – P. 2101–2111.
7. Childers, M. C. Insights from molecular dynamics simulations for computational protein design / M. C. Childers, V. Daggett // *Molecular Systems Design & Engineering*. – 2017. – Vol. 2, no. 1. – P. 9–33.
8. Hollingsworth, S. A. Molecular dynamics simulation for all / S. A. Hollingsworth, R. O. Dror // *Neuron*. – 2018. – Vol. 99. – P. 1129–1143.
9. Applications of machine learning in drug discovery and development / J. Vamathevan, D. Clark, P. Czodrowski [et al.] // *Nature Reviews Drug Discovery*. – 2019. – Vol. 18(6). – P. 463–477.
10. Advances and perspectives in applying deep learning for drug design and discovery / C. F. Lipinski, V. G. Maltarollo, P. R. Oliveira [et al.] // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2019. – Vol. 6. – P. 108.
11. A Machine learning-based method to improve docking scoring functions and its application to drug repurposing / S. L. Kinnings, N. Liu, P. J. Tonge [et al.] // *Journal of Chemical Information and Modeling*. – 2011. – Vol. 51. – P. 408–419.
12. Agastheeswaramoorthy, K. Drug REpurposing using AI/ML tools – for Rare Diseases (DREAM-RD): A case study with Fragile X Syndrome (FXS) / K. Agastheeswaramoorthy, A. Sevilimedu // *bioRxiv*. – 2020. – DOI: 10.1101/2020.09.25.311142.
13. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning / A. W. Senior, R. Evans, J. Jumper [et al.] // *Nature*. – 2020. – Vol. 577. – P. 706–710.
14. Machine-learning scoring functions for structure-based virtual screening / H. Li, K.-H. Sze, G. Lu, P. J. Ballester // *WIREs Computational Molecular Science*. – 2020. – Vol. 11. – P. e1478.
15. Improving structure-based virtual screening performance via learning from scoring function components / G.-L. Xiong, W.-L. Ye, C. Shen [et al.] // *Briefings in Bioinformatics*. – 2020. – Vol. 22, iss. 3. – P. bbaa094. – DOI: 10.1093/bib/bbaa094.
16. A deep learning approach to antibiotic discovery / J. M. Stokes, K. Yang, K. Swanson [et al.] // *Cell*. – 2020. – Vol. 180. – P. 688–702.
17. Timmons, P. B. ENNAVIA is a novel method which employs neural networks for antiviral and anti-coronavirus activity prediction for therapeutic peptides / P. B. Timmons, C. M. Hewage // *Briefings in Bioinformatics*. – 2021. – Vol. 22, iss. 6. – P. bbab258. – DOI: 10.1093/bib/bbab258.
18. Classification of HIV-1 protease inhibitors by machine learning methods / Y. Li, Y. Tian, Z. Qin, A. Yan // *ACS Omega*. – 2018. – Vol. 3, no. 11. – P. 15837–15849.
19. Deep learning driven drug discovery: Tackling Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 / Y. Zhang, T. Ye, H. Xi [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. – 2021. – Vol. 12. – P. 739684.
20. Practical notes on building molecular graph generative models / R. Mercado, T. Rastemo, E. Lindelöf [et al.] // *Applied AI Letters*. – 2020. – Vol. 1, no. 2. – DOI: 10.1002/ail2.18.
21. Exploring the GDB-13 chemical space using deep generative models / J. Arús-Pous, T. Blaschke, S. Ulander [et al.] // *Journal of Cheminformatics*. – 2019. – Vol. 11: Article 20. – DOI: 10.1186/s13321-019-0341-z.
22. A de novo molecular generation method using latent vector based generative adversarial network / O. Prykhodko, S. V. Johansson, P.-C. Kotsias [et al.] // *Journal of Cheminformatics*. – 2019. – Vol. 11: Article 74. – DOI: 10.1186/s13321-019-0397-9.
23. Entangled conditional adversarial autoencoder for de novo drug discovery / D. Polykovskiy, A. Zhebrak, D. Vetrov [et al.] // *Molecular Pharmaceutics*. – 2018. – Vol. 15. – P. 4398–4405.
24. Comparative study of deep generative models on chemical space coverage / J. Zhang, R. Mercado, O. Engkvist, H. Chen // *Journal of Chemical Information and Modeling*. – 2021. – Vol. 61. – P. 2572–2581.
25. Deep learning enables rapid identification of potent DDR1 kinase inhibitors / A. Zhavoronkov, Y. A. Ivanenkov, A. Aliper [et al.] // *Nature Biotechnology*. – 2019. – Vol. 37. – P. 1038–1040.
26. Анищенко, И. В. Компьютерный дизайн потенциальных лекарственных препаратов для терапии СПИДа: β-галактозилцерамид и петля V3 белка gp120 ВИЧ-1 / И. В. Анищенко, А. В. Тузиков, А. М. Андрианов // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 161–172.
27. Computer-aided design of novel HIV-1 entry inhibitors targeting the envelope gp120 V3 loop / A. M. Andrianov, I. V. Anishchenko, M. A. Kisel [et al.] // *Biopolymers and Cell*. – 2012. – Vol. 28, no. 6. – P. 468–476.
28. Компьютерное конструирование новых ингибиторов проникновения ВИЧ-1 на основе гликофинголипидов / А. М. Андрианов, Ю. В. Корноушенко, И. А. Кашин, А. В. Тузиков // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 88–105.

29. Конструирование ингибиторов репликации ВИЧ-1 на основе  $\beta$ -галактозилцерамида методами молекулярного моделирования и химического синтеза / А. М. Андрианов, И. В. Анищенко, М. А. Кисель [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 3. – С. 70–78.
30. Получение и анти-ВИЧ активность  $\beta$ -галактозилсфингозина / Ю. В. Корноушенко, В. А. Николаевич, М. А. Кисель [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2015. – № 1. – С. 85–88.
31. In silico design of novel broad anti-HIV-1 agents based on glycosphingolipid  $\beta$ -galactosylceramide, a high affinity receptor for the envelope gp120 V3 loop / A. M. Andrianov, Y. V. Kornoushenko, I. A. Kashyn [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. – 2015. – Vol. 33, no. 5. – P. 1051–1066.
32. Andrianov, A. M. HIV-1 gp120 V3 loop for anti-AIDS drug discovery: computer-aided approaches to the problem solving / A. M. Andrianov // Expert Opinion on Drug Discovery. – 2011. – Vol. 6, no. 4. – P. 419–435.
33. Andrianov, A. M. Discovery of novel promising targets for anti-AIDS drug developments by computer modeling: application to the HIV-1 gp120 V3 loop / A. M. Andrianov, I. V. Anishchenko, A. V. Tuzikov // Journal of Chemical Information and Modeling. – 2011. – Vol. 51, no. 10. – P. 2760–2767.
34. Андрианов, А. М. Конформационный анализ белков. Теория и приложения / А. М. Андрианов. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 518 с.
35. Jiang, S. Small-molecule HIV-1 entry inhibitors targeting the epitopes of broadly neutralizing antibodies / S. Jiang, A. V. Tuzikov, A. M. Andrianov // Cell Chemical Biology. – 2022. – Vol. 29, no. 5. – P. 757–773.
36. Andrianov, A. M. Discovery of novel anti-HIV-1 agents based on a broadly neutralizing antibody against the envelope gp120 V3 loop: a computational study / A. M. Andrianov, I. A. Kashyn, A. V. Tuzikov // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. – 2014. – Vol. 32, no. 12. – P. 1993–2004.
37. Andrianov, A. Computational discovery of novel HIV-1 entry inhibitors based on potent and broad neutralizing antibody VRC01 / A. Andrianov, I. Kashyn, A. Tuzikov // Journal of Molecular Graphics and Modelling. – 2015. – Vol. 61. – P. 262–271.
38. Andrianov, A. M. Computer-based technologies for virtual screening and analysis of chemical compounds promising for anti-HIV-1 drug design / A. M. Andrianov, I. A. Kashyn, A. V. Tuzikov // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP 2016) / ed.: V. Krasnoproshin, S. Ablameyko. – Springer, 2017. – P. 14–23. – (Communications in Computer and Information Science ; vol. 673).
39. Andrianov, A. M. Identification of novel HIV-1 fusion inhibitor scaffolds by virtual screening, high-throughput docking and molecular dynamics simulations / A. M. Andrianov, I. A. Kashyn, A. V. Tuzikov // JSM Chemistry. – 2016. – Vol. 4, no. 2. – P. 1022.
40. Andrianov, A. M. Computational identification of novel entry inhibitor scaffolds mimicking primary receptor CD4 of HIV-1 gp120 / A. M. Andrianov, I. A. Kashyn, A. V. Tuzikov // Journal of Molecular Modeling. – 2017. – Vol. 23, no. 1. – P. 1–13.
41. Разработка генеративной состязательной нейронной сети для идентификации потенциальных ингибиторов ВИЧ-1 методами глубокого обучения / Г. И. Николаев, Н. А. Шульдов, А. И. Анищенко [и др.] // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 7–17.
42. Application of deep learning and molecular modeling to identify small drug-like compounds as potential HIV-1 entry inhibitors / A. M. Andrianov, G. I. Nikolaev, N. A. Shuldov [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. – 2022. – Vol. 40, no. 16. – P. 7555–7573.
43. Разработка потенциальных ингибиторов ВИЧ-1 методами in silico клик-химии и молекулярного моделирования / А. М. Андрианов, Г. И. Николаев, И. А. Кашин, А. В. Тузиков // Математическая биология и биоинформатика. – 2018. – Т. 13, № 2. – С. 507–525.
44. In silico identification of novel aromatic compounds as potential HIV-1 entry inhibitors mimicking cellular receptor CD4 / A. M. Andrianov, G. I. Nikolaev, Y. V. Kornoushenko [et al.] // Viruses. – 2019. – Vol. 11, no. 8. – P. 746.
45. Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings / C. A. Lipinski, F. Lombardo, B. W. Dominy, P. J. Feeney // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2001. – Vol. 46. – P. 3–26.
46. Виртуальный скрининг и идентификация потенциальных ингибиторов ВИЧ-1 на основе кросс-реактивного нейтрализующего антитела N6 / А. М. Андрианов, Г. И. Николаев, Ю. В. Корноушенко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 4. – С. 445–456.
47. In silico идентификация высокоаффинных лигандов белка gp120 ВИЧ-1 – потенциальных пептидомиметиков нейтрализующего антитела N6 / А. М. Андрианов, Г. И. Николаев, Ю. В. Корноушенко [и др.] // Математическая биология и биоинформатика. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 430–449.
48. Идентификация функциональных миметиков нейтрализующего анти-ВИЧ антитела N6 методами виртуального скрининга и молекулярного моделирования / А. М. Андрианов, Г. И. Николаев, Ю. В. Корноушенко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 561–571.

49. In silico-guided discovery of potential HIV-1 entry inhibitors mimicking bNAb N6: Virtual screening, docking, molecular dynamics, and post-modeling analysis / A. M. Andrianov, G. I. Nikolaev, Y. V. Kornoushenko [et al.] // *Bioinformatics Research and Applications* / ed.: Z. Cai [et al.]. – Springer, 2020. – P. 243–249. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 12304).
50. Идентификация потенциальных ингибиторов коронавируса SARS-CoV-2 методами виртуального скрининга и молекулярного моделирования / А. М. Андрианов, Ю. В. Корноушенко, А. Д. Карпенко, А. В. Тузиков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 3. – С. 308–316.
51. Computational discovery of small drug-like compounds as potential inhibitors of SARS-CoV-2 main protease / A. M. Andrianov, Y. V. Kornoushenko, A. D. Karpenko [et al.] // *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. – 2021. – Vol. 39, no. 15. – P. 5779–5791.
52. Применение технологий виртуального скрининга и молекулярного моделирования для идентификации потенциальных ингибиторов основной протеазы коронавируса SARS-CoV-2 / А. М. Андрианов, К. В. Фурс, А. В. Гончар [и др.] // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2023. – Т. 18, № 1. – С. 15–32.
53. Разработка генеративной нейронной сети глубокого обучения для компьютерного дизайна потенциальных ингибиторов коронавируса SARS-CoV-2 / Н. А. Шульдов, А. М. Юшкевич, К. В. Фурс [и др.] // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 188–207.
54. De novo дизайн потенциальных ингибиторов основной протеазы коронавируса SARS-CoV-2 с помощью технологий искусственного интеллекта и молекулярного моделирования / А. М. Андрианов, К. В. Фурс, Н. А. Шульдов, А. В. Тузиков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 3. – С. 197–206.
55. AI-driven de novo design and molecular modeling for discovery of small-molecule compounds as potential drug candidates targeting SARS-CoV-2 main protease / A. M. Andrianov, M. A. Shuldau, K. V. Furs [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, no. 9. – P. 8083.
56. In silico скрининг потенциальных ингибиторов SARS-CoV-2, блокирующих тример HR1 белка S коронавируса / А. М. Андрианов, К. В. Фурс, А. М. Юшкевич [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 156–166. – DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-2-156-166.
57. Repurposing Navitoclax to block SARS-CoV-2 fusion and entry by targeting heptapeptide repeat sequence 1 in S2 protein / F. Jiao, A. M. Andrianov, L. Wang [et al.] // *Journal of Medical Virology*. – 2023. – Vol. 95. – P. e29145.
58. Virtual screening and identification of promising therapeutic compounds against drug-resistant *Mycobacterium tuberculosis*  $\beta$ -ketoacyl-acyl carrier protein synthase I (KasA) / A. M. Andrianov, K. V. Furs, A. V. Gonchar [et al.] // *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. – 2023. – DOI: 10.1080/07391102.2023.2293276.
59. Design, in silico evaluation, and determination of antitumor activity of potential inhibitors against protein kinases: Application to BCR-ABL tyrosine kinase / E. V. Koroleva, A. L. Ermolinskaya, Z. V. Ignatovich [et al.] // *Biochemistry (Moscow)*. – 2024. – Vol. 89, no. 6. – P. 1094–1108.
60. Генеративная нейронная сеть на основе модели гетероэнкодера для de novo дизайна потенциальных противоопухолевых препаратов: применение к Bcr-Abl тирозинкиназе / А. Д. Карпенко Т. Д. Войтко, А. В. Тузиков, А. М. Андрианов // *Информатика*. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 7–20.
61. De novo дизайн и виртуальный скрининг потенциальных ингибиторов тирозинкиназы Bcr-Abl с помощью технологий глубокого обучения и молекулярного моделирования / А. М. Андрианов, К. В. Фурс, А. Д. Карпенко и [др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 3. – С. 196–206.
62. Сергеев, Р. С. Алгоритмы анализа мутаций в первичных последовательностях белков ВИЧ-1 субтипа А / Р. С. Сергеев, А. В. Тузиков, В. Ф. Еремин // *Информатика*. – 2011. – № 3(31). – С. 88–97.
63. Алгоритмы поиска мутаций лекарственной устойчивости в геномах микобактерий туберкулеза / Р. С. Сергеев, И. С. Ковалев, А. В. Тузиков [и др.] // *Информатика*. – 2016. – № 1(49). – С. 75–91.
64. Genome-wide analysis of MDR and XDR tuberculosis from Belarus: machine-learning approach / R. S. Sergeev, I. S. Kavaliou, U. V. Sataneuski [et al.] // *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*. – 2019. – Vol. 16, iss. 4. – P. 1398–1408. – DOI: 10.1109/TCBB.2017.2720669.
65. Side-chain conformational changes upon protein-protein association / A. M. Ruvinsky, T. Kirys, A. V. Tuzikov, I. A. Vakser // *Journal of Molecular Biology*. – 2011. – Vol. 408. – P. 356–365.
66. Rotamer libraries and probabilities of transition between rotamers for the side chains in protein-protein binding / T. Kirys, A. M. Ruvinsky, A. V. Tuzikov, I. A. Vakser // *Proteins: Structure, Function and Bioinformatics*. – 2012. – Vol. 80. – P. 2089–2098.

67. Structure fluctuations and conformational changes in protein binding / A. Ruvinsky, T. Kirys, A. V. Tuzikov, I. A. Vakser // *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*. – 2012. – Vol. 10, no. 2. – P. 1241002.

68. Correlation analysis of the side-chains conformational distribution in bound and unbound proteins / T. Kirys, A. M. Ruvinsky, A. V. Tuzikov, I. A. Vakser // *BMC Bioinformatics*. – 2012. – Vol. 13. – P. 236–244.

69. Gene ontology improves template selection in comparative protein docking / A. Y. Hadarovich, I. Anishchenko, A. V. Tuzikov [et al.] // *Proteins: Structure, Function, Bioinformatics*. – 2019. – Vol. 87(3). – P. 245–253.

70. Алгоритм предсказания структур белковых комплексов на основе генной онтологии / А. Ю. Хадарович, И. В. Анищенко, П. Кундротас [и др.] // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2020. – № 64(2). – С. 150–158.

71. Хадарович, А. Ю. Предсказание структуры гомодимерных белковых комплексов на основе глубокой нейронной сети / А. Ю. Хадарович, А. А. Калиновский, А. В. Тузиков // *Информатика*. – 2020. – № 17(2). – С. 44–53.

72. Structural motifs in protein cores and at protein-protein interfaces are different / A. Y. Hadarovich, D. Chakravarty, A. V. Tuzikov [et al.] // *Protein Science*. – 2021. – Vol. 30, iss. 2. – P. 381–390. – DOI: 10.1002/pro.3996.

УДК 519.711

## Логическое проектирование цифровых устройств

**Бибилло Петр Николаевич**

*заведующий лабораторией логического проектирования,*

*доктор технических наук*

*E-mail: bibilo@newman.bas-net.by*

Дискретными называются устройства, функционирующие в дискретном времени и осуществляющие преобразование дискретной информации. Дискретная информация чаще всего представляется в цифровой 0, 1 (двоичной) форме, поэтому дискретные устройства называют также *цифровыми*. При реализации цифровых устройств на микроэлектронной базе сверхбольших интегральных схем (СБИС) этап логического проектирования является центральным. На этом этапе осуществляется переход от алгоритмических описаний устройств к логическим схемам в заданных технологических базисах. Основными задачами логического проектирования являются моделирование и функциональная верификация исходных спецификаций на проектирование, синтез логических схем, верификация результатов синтеза. Задачи синтеза трудоемкие, так как при синтезе всегда стремятся получить не просто логические схемы, реализующие требуемое поведение устройства, а схемы с меньшей площадью, т. е. меньшим числом транзисторов, меньшей задержкой (большим быстродействием) и меньшим энергопотреблением. Именно по результатам логического проектирования определяются перечисленные технические параметры получаемых логических схем.

Лаборатория логического проектирования ОИПИ НАН Беларуси была образована в 1971 г. (тогда она называлась лабораторией СП и ЛС – «системного программирования и логического синтеза»). Основным научным направлением лаборатории является разработка систем, моделей, методов и алгоритмов автоматизации логического проектирования цифровых устройств. В ней развивались методы и разрабатывались программные средства для автоматизации логического проектирования дискретных устройств и систем на элементах малой степени интеграции (МИС), средней (СИС), большой (БИС) и сверхбольшой (СБИС). В рамках основного направления проводились исследования в следующих областях:

- высокоуровневые языки проектирования цифровых систем;
- теоретическое и программное обеспечение автоматизации логического проектирования заказных цифровых СБИС;
- топологическое проектирование функциональных блоков СБИС на основе макроэлементов с регулярной структурой;
- логическое управление параллельными процессами;
- верификация логических описаний цифровых схем;
- комбинаторные задачи логического проектирования и искусственного интеллекта;
- методы и средства создания экспертных систем распознавания;
- специализированные средства и языки программирования.

Научные достижения лаборатории за первые 30 лет ее деятельности отражены в юбилейном сборнике [1], за 40 лет – в книге [2]. Данная статья посвящена основным научным теоретическим и практическим результатам, полученным сотрудниками лаборатории за последние 10 лет (2015–2024 гг.). Эти результаты опубликованы в научных монографиях [3–6]. Публикации [7–9] являются учебными пособиями, пособие [9] по языку VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language – язык описания аппаратуры сверхскоростных интегральных схем) приобрело большую популярность и выдержало 10 изданий. Полный список всех публикаций сотрудников лаборатории логического проектирования за 2015–2024 гг. включает 365 публикаций. Всего сотрудниками лаборатории издано 47 монографий и 18 учебных пособий.

**Моделирование и функциональная верификация.** Исходные алгоритмические описания (спецификации) для проектирования задаются на всемирно используемых высокоуровневых

языках проектирования VHDL и Verilog. В лаборатории используется также язык ПРАЛУ (язык описания простых алгоритмов логического управления), автором которого является А. Д. Закревский. Разработаны программы моделирования ПРАЛУ-описаний и перехода к VHDL-описаниям. Для моделирования VHDL-описаний разработаны программы получения разнообразных тестов. Функциональная верификация исходных VHDL-описаний осуществляется на основе моделирования, по результатам которого можно выполнить проверку покрытия операторов в VHDL-описаниях и проверку прохождения состояний в конечных и операционных автоматах. Например, на рис. 1 по результатам моделирования показан граф переходов между состояниями сложного конечного автомата. На дугах и в вершинах графа показано число их прохождений на тесте с 20 000 псевдослучайных тестирующих наборов [4, с. 169].

Для функциональной верификации используется также язык PSL (Property Specification Language – язык спецификации свойств), позволяющий применять аппарат утверждений (асертов) при моделировании. Записывая программы на PSL и проводя моделирование, можно выполнять проверку правильности проекта на основе проверки истинности либо ложности утверждений о поведении соответствующих сигналов (объектов проекта) во времени [3].

**Технологически независимая оптимизация** представлений систем булевых функций является первым этапом синтеза логических схем. На втором этапе выполняется технологическое отображение в заданный базис (библиотеку) логических элементов заказной СБИС. Важнейшим является первый этап, на котором выбирается форма представления системы булевых функций и осуществляется минимизация этой формы. Результат выполнения первого этапа определяет и важнейшие параметры синтезированной на втором этапе логической схемы: площадь, временную задержку и энергопотребление. Методы и программы технологически независимой оптимизации ранее в лаборатории развивались для исходных заданий реализуемых систем булевых функций в виде систем дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ), были развиты также методы совместной и раздельной минимизации систем булевых функций в классе ДНФ, методы факторизации – выделения общих (одинаковых) частей конъюнкций, дизъюнкций и одинаковых подвыражений в скобочных алгебраических представлениях систем булевых функций, а также многочисленные методы раздельной и совместной функциональной декомпозиции систем булевых функций.

В последнее время в качестве методов технологически независимой оптимизации были разработаны методы, алгоритмы и программы минимизации многоуровневых представлений систем функций на основе разложения Шеннона – методы минимизации BDD (Binary Decision Diagram, бинарная диаграмма решений), модификаций BDD и булевых сетей.

*Разложением Шеннона* булевой функции  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_n)$ , по переменной  $x_i$  называется представление  $f(\mathbf{x})=\bar{x}_i f_0 \vee x_i f_1$ . Функции  $f_0=f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,  $f_1=f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$  называются кофакторами (англ. cofactors) разложения по переменной  $x_i$ . Каждый из кофакторов  $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,  $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$  может быть разложен по одной из переменных из множества  $\{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}$ . Процесс разложения кофакторов заканчивается, когда все  $n$  переменных будут использованы для разложения. Процесс разложения задается в виде графа BDD, каждая вершина которого соответствует кофактору. В качестве обобщений BDD были изучены *BDDI-представления* (Binary Decision Diagram with Inverse cofactors). Под BDDI понимается ориентированный бесконтурный граф, задающий последовательные разложения Шеннона булевой функции  $f(\mathbf{x})=f(x_1, \dots, x_n)$  либо системы  $f(\mathbf{x})=(f^1(\mathbf{x}), \dots, f^m(\mathbf{x}))$  булевых функций по всем переменным  $x_1, x_2, \dots, x_n$  при заданном порядке (перестановке) переменных, по которым проводятся разложения, при условии нахождения пар взаимно инверсных кофакторов. Были проведены широкие экспериментальные исследования эффективности использования при синтезе раздельной и совместной BDDI-минимизации систем булевых функций, предложены алгоритмы выделения из формульных описаний исходной системы булевых функций так называемых связанных подсистем. При этом каждая из связанных подсистем минимизируется отдельно, однако функции, составляющие каждую связанную подсистему, целесообразно минимизировать совместно. В качестве исходных формульных описаний системы булевых функций выступают совместно минимизированные BDDI-представления либо формулы, соответствующие совместно минимизированным булевым сетям. Эксперименты показали целесообразность использования при синтезе методов выделения связанных подсистем функций.

**Декомпозиция.** Для матричных и BDD-представлений булевой функции  $f(x)$  решаются задачи нахождения функциональных разложений  $f(x)=f(y, z)=\varphi(\varphi_1(y), \varphi_2(z))$  с целью получения двух подфункций  $\varphi_1(y)$ ,  $\varphi_2(z)$  с меньшим числом аргументов. При этом выходные функции  $\varphi$  данных разложений являются двухоперандными алгебраическими операциями, такими, как дизъюнкция, конъюнкция, эквиваленция, исключающее ИЛИ. Основное внимание было уделено поиску разбиения множества аргументов заданной функции  $f(x)$  на подмножества, соответствующие векторам  $y$ ,  $z$ . Такие разложения называются алгебраическими разложениями с заданными выходными функциями, а в зарубежной литературе – *bi-decomposition*. Для функциональных разложений более общего вида были проведены экспериментальные исследования их эффективности при синтезе схем заказных СБИС, т. е. для матричных форм систем ДНФ булевых функций изучалась эффективность применения многочисленных методов и программ декомпозиции [6].

**Сокращение энергопотребления** синтезируемых логических схем из библиотечных логических КМОП-элементов было изучено для операционных и конечных автоматов, а также для многовыходных комбинационных схем. На рис. 2 показан график потребляемого тока операционным автоматом. Потребляемый ток резко возрастает, когда автомат выполняет трудоемкую арифметическую операцию перемножения операндов (целых чисел), и потребление тока становится значительно меньшим, когда над операндами осуществляется логическая операция типа дизъюнкции либо конъюнкции чисел, интерпретируемых как двоичные (булевы) векторы. График показывает также важность нахождения максимальных значений потребляемого тока и соответствующих тестов – двоичных наборов значений входных переменных.

Одним из эффективных подходов к снижению динамического энергопотребления цифровых устройств является создание такого алгоритмического описания VHDL-проекта, где предусматривается отключение тех блоков, функционирование которых не требуется в одном либо нескольких (многих) тактах функционирования синхронной схемы. Были изучены именно такие способы алгоритмического описания операционных устройств, состоящих из управляющего автомата и операционного блока (тракта данных). Для оценки энергопотребления логических схем принят предложенный в лаборатории подход, позволяющий использовать быстродействующее логическое VHDL-моделирование структурных описаний (*netlists*) логических схем вместо трудоемкого схемотехнического моделирования Spice-описаний схем. Логическое моделирование с использованием языка VHDL позволяет проводить подсчет числа переключений транзисторов в комбинационных схемах КМОП СБИС, с достаточной точностью и скоростью предсказывать средние значения потребляемого схемой тока, что значительно сокращает время оценки вариантов логических схем на этапе синтеза проектов заказных КМОП СБИС. Экспериментально доказано, что конвейеризация нерегулярных логических схем, осуществляемая с целью достижения высоких показателей быстродействия, приводит к значительному повышению потребляемого тока за счет внесения элементов памяти (триггеров) между каскадами логической схемы.

**Программный комплекс CMOSLD** разработан с целью автоматизации логического проектирования заказных КМОП СБИС для применения в космических областях с учетом площади кристалла и рассеивания потребляемой мощности. Сокращение энергопотребления цифровых блоков является одной из важнейших проблем, возникающих при проектировании заказных СБИС, которые выполняются по КМОП-технологии. В свою очередь, важным аспектом решения данной проблемы является сокращение сложности (площади) логических схем, так как от нее существенно зависит и величина потребляемого схемой тока. Другой аспект решения данной проблемы – необходимость оценки не только среднего, но и максимального (пикового) значения энергопотребления логических схем. Проблема вычисления оценки максимальной рассеиваемой мощности существенно отличается от проблемы вычисления оценки среднего значения рассеиваемой мощности для этой же схемы, так как в таком случае стоит задача найти наихудший вариант при функционировании схемы, когда схемой потребляется максимум энергии и требуется построение энергоемких тестов, т. е. тестов, вызывающих повышенное энергопотребление. Достаточно точная (но весьма трудоемкая) оценка энергопотребления может быть получена путем

схемотехнического моделирования транзисторных описаний схем. Однако возрастание размерностей задачи синтеза и разнообразие вариантов реализаций схем приводят к необходимости разработки средств для быстрой оценки энергопотребления с приемлемой для практики точностью (погрешностью). Использование логического моделирования для этих целей требует построения описаний логических элементов, позволяющих учитывать их потребляемую мощность и временные задержки элементов схемы. Комплекс CMOSLD предназначен для автоматизации проектирования нерегулярных логических схем из библиотечных КМОП-элементов. Основными критериями оптимизации схем являются площадь схемы и ее энергопотребление. Комплекс содержит развитые средства оценки энергопотребления схем в разных режимах работы и на разных уровнях и интегрирован (рис. 3) с программными пакетами *Questa Sim*, *LeonardoSpectrum* и *AccusimII* (фирма Mentor Graphics). Он позволяет эффективно выполнять логическое моделирование, оптимизацию и синтез синхронных логических схем по описаниям их поведения на различных языках, повторный синтез логических схем на основе программ выделения комбинационной логики и ее глобальной оптимизации, а также получать оценки энергопотребления схем на основе логического и схемотехнического моделирования. В CMOSLD вычисляются оценки числа переключающихся транзисторов в одном такте функционирования схемы и оценки значений потребляемого схемой тока на каждом из тактов ее функционирования.

**Программный комплекс «Сшивка кадров»** предназначен для автоматизации работы с кадрами видеоизображения топологии СБИС, внедрен в филиале НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и позволяет:

- проводить анализ одного или нескольких слоев видеоизображений топологии СБИС, выполненных по субмикронным нормам (рис. 4 и 5);
- значительно повышать размерности задач обработки видеоизображений, обеспечивая обработку нескольких десятков тысяч кадров видеоизображений;
- сокращать сроки анализа топологии СБИС за счет ускорения выполнения компьютерных операций над видеоизображениями;
- уменьшать число корректировок топологии и, следовательно, избегать повторного изготовления шаблонов и кремниевых пластин, сокращать как трудовые затраты, так и расход материалов.

После анализа топологии осуществляется переход к транзисторным SPICE-описаниям схем и выполняется верификация транзисторных описаний. Для этого были разработаны соответствующие теоретические методы и программные средства.

**Программа декомпиляции транзисторных описаний КМОП-схем** предназначена для сравнения транзисторной схемы, реализованной в СБИС, с эталонной (подлежащей реализации). Исходными данными для программы декомпиляции служит структурное SPICE-описание КМОП-схемы в виде сети транзисторов, полученной по топологическому описанию схемы. Результатом работы программы является описание схемы на уровне логических элементов в одном из следующих форматов: иерархическое SPICE-описание, в которое включены модели всех идентифицированных логических элементов; SF-описание в виде логических уравнений; описание на языке VHDL. На первом этапе формируется библиотека элементов: в транзисторной схеме распознаются подсхемы КМОП-вентилей, передаточных элементов и более сложных подсхем на их основе (мультиплексоры, трехстабильные инверторы), а также псевдоэлементы, связанные по току группы транзисторов с нераспознанной логикой поведения. Результатом этого этапа является двухуровневое SPICE-описание. На втором этапе строится схема, включающая множество связанных логических элементов, определяются ее внешние порты. Результатом этого этапа является иерархическое SPICE-описание. На последнем этапе генерируется описание полученной схемы на языке SF в виде логических уравнений для передачи в систему логического проектирования, где выполняется конвертация в VHDL-описание для связи с другими программными средствами проектирования СБИС. Все шаги программы декомпиляции КМОП-схем из транзисторов выполняются за время, линейно зависящее от числа транзисторов в исходном описании. Программа имеет достаточное быстродействие, чтобы обрабатывать схемы из 100 000 транзисторов за несколько минут работы ПЭВМ.

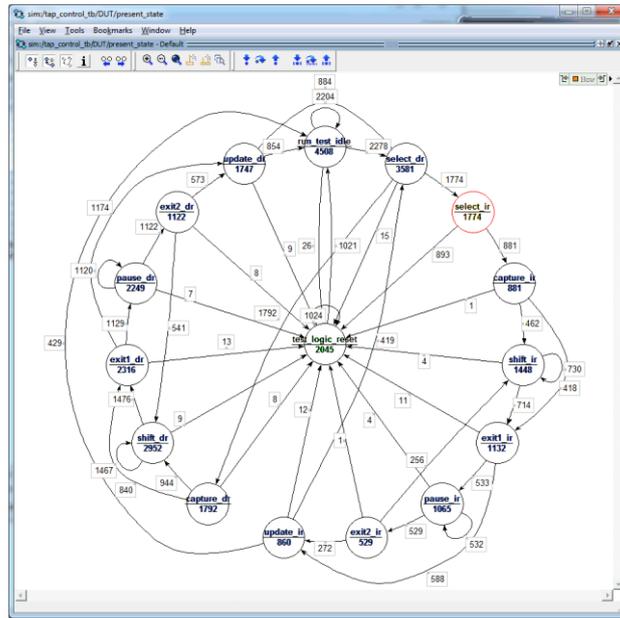


Рис. 1. Результаты моделирования VHDL-описания конечного автомата

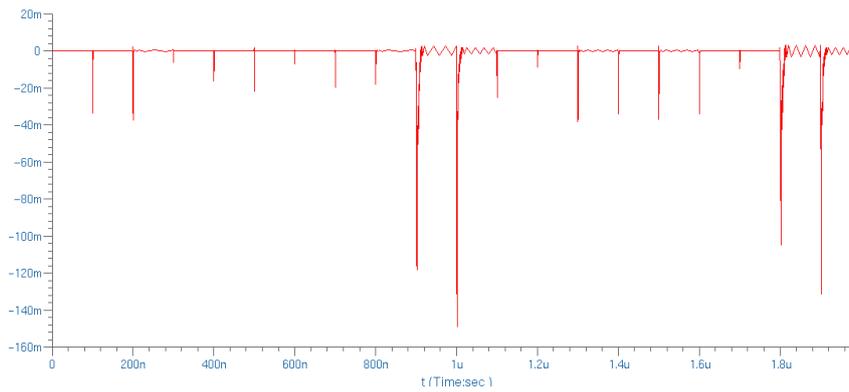


Рис. 2. График потребляемого тока синхронным устройством – операционным автоматом

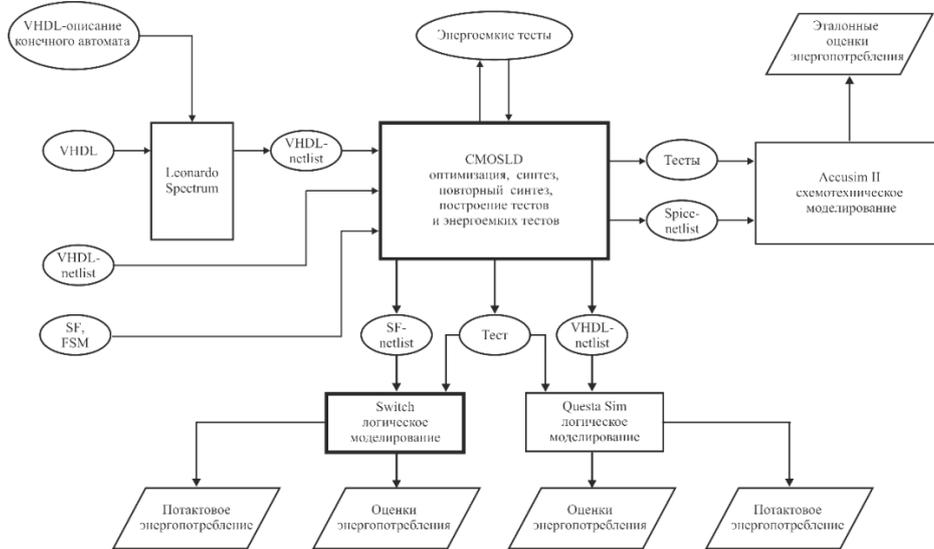


Рис. 3. Интеграция комплекса CMOSLD с системами моделирования и синтеза

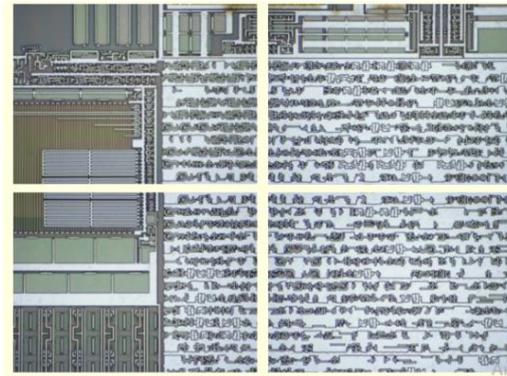
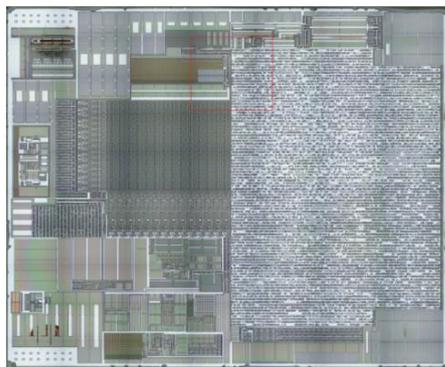
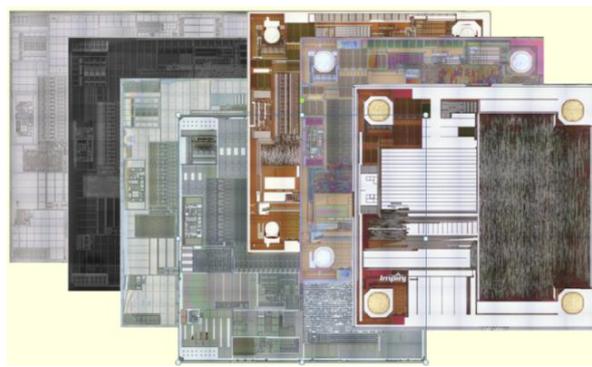


Рис. 4. Совмещение четырех кадров



Совмещение кадров одного слоя



Совмещение кадров по многим слоям

Рис. 5. Проверка топологии СБИС



Рис. 6. Архитектура системы FLC-2

*Система FLC-2* логического синтеза устройств на основе продукционно-фреймовой модели представления знаний использует подход к организации систем логического проектирования, позволяющий формально описывать экспертные знания для комбинирования сложными алгоритмическими процедурами на этапе технологически независимой оптимизации, накапливать знания проектировщиков о проблемной области, составлять модели процессов логического проектирования (рис. 6).

Система FLC-2 предназначена для оптимизации иерархически организованных функциональных и структурных описаний логических схем, представленных на языке SF, который является внутренним языком системы. Для связи с другими системами автоматизированного про-

ектирования (САПР) цифровых устройств в FLC-2 имеются средства конвертации SF-описаний в VHDL-описания и обратно. Логическая оптимизация осуществляется на основе применения комбинированных методов, реализующих различные базовые оптимизационные приемы: минимизацию систем булевых функций в классе ДНФ; оптимизацию многоуровневых представлений систем булевых функций на основе булевых сетей и BDD-представлений, поляризации и декомпозиции матричных и скобочных форм, выделения подсистем функций, связанных по областям определения и по формульным представлениям.

В системе FLC-2 реализован продукционный подход для управления последовательностями проектных процедур, предназначенных для их использования на этапе логического проектирования сложных функциональных блоков заказных цифровых СБИС. В FLC-2 реализованы параллельные программы минимизации систем функций в классе ДНФ, проведены эксперименты сравнения имеющихся программ минимизации ДНФ с всемирно известными программами ESPRESSO и ABC, выполнены эксперименты по реализации в заказных СБИС и FPGA (Field-Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица) функциональных описаний устройств модулярной арифметики. Эксперименты показали целесообразность использования программ системы FLC-2 для предварительной оптимизации проектов цифровых устройств, реализуемых в промышленных САПР заказных цифровых СБИС и FPGA.

### Публикации

1. Логическое проектирование : сб. науч. тр. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – Вып. 6. – 215 с.
2. Бибило, П. Н. Логическое проектирование / П. Н. Бибило, Л. Д. Черемисинова // Кибернетика и информатика в Национальной академии наук Беларуси : очерки развития / Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси ; науч. ред.: С. В. Абламейко, А. В. Тузиков, О. И. Семенов. – Минск : Тэхналогія, 2015. – С. 125–140.
3. Бибило, П. Н. Моделирование и верификация цифровых систем на языке VHDL / П. Н. Бибило, Н. А. Авдеев. – М. : Ленанд, 2017. – 344 с.
4. Бибило, П. Н. Функциональная верификация VHDL-описаний синхронных цифровых устройств / П. Н. Бибило, Н. А. Авдеев, В. И. Романов. – М. : Ленанд, 2020. – 328 с.
5. Поттосин, Ю. В. Методы дискретной математики в логическом проектировании цифровых устройств / Ю. В. Поттосин. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 175 с.
6. Бибило, П. Н. Бинарные диаграммы решений в логическом проектировании / П. Н. Бибило. – М. : Ленанд, 2024. – 560 с.
7. Бибило, П. Н. Задачи по проектированию логических схем с использованием языка VHDL / П. Н. Бибило. – Изд. 3, стер. – М. : Изд-во ЛКИ, 2018. – 328 с.
8. Черемисинова, Л. Д. Дискретная математика : учеб. пособие / Л. Д. Черемисинова. – Минск : БГУИР, 2019. – 299 с.
9. Бибило, П. Н. Основы языка VHDL : учеб. пособие / П. Н. Бибило. – Изд. стер. – М. : Книжный дом «Либроком», 2024. – 328 с.

УДК 004.934

## Апрацоўка натуральнай мовы як аснова метадаў і алгарытмаў маўленчага ўзаемадзеяння камп'ютарных сістэм і чалавека

**Гецэвіч Юрась Станіслававіч**

*загадчык лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення,  
кандыдат тэхнічных навук, дацэнт  
E-mail: yuras.hetsevich@newman.bas-net.by*

**Лабанаў Барыс Мяфодзьевіч**

*галоўны навуковы супрацоўнік лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення,  
доктар тэхнічных навук  
E-mail: lobanov@newman.bas-net.by*

**Зяноўка Яўгенія Сяргееўна**

*малодшы навуковы супрацоўнік лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення  
E-mail: evgeniakacan@gmail.com*

**Латышэвіч Давід Іосіфавіч**

*малодшы навуковы супрацоўнік лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення  
E-mail: david.latyshevich@gmail.com*

**Уводзіны.** Лабараторыя распазнавання і сінтэзу маўлення (<https://ssrlab.by/>) была заснавана ў 1974 годзе пад кіраўніцтвам Б. М. Лабанава як аддзел Цэнтральнага навукова-даследчага інстытута сувязі (ЦНДІС), а з 1986 года як лабараторыя Інстытута тэхнічнай кібернетыкі НАН Беларусі. Даследаванні лабараторыі 60-х гадоў былі накіраваны на распрацоўку агульных прынцыпаў аналізу маўленчых сігналаў і вылучэння інфарматыўных прыкмет, якія дазволілі б прадставіць бесперапынны маўленчы сігнал паслядоўнасцю фанетычных прыкмет. У 2000–2010 гадах былі прадстаўлены новая мультыхвалёвая мадэль сінтэзу маўлення па тэксце – «Мультифон» і яе праграмная рэалізацыя, а таксама праграмныя сродкі кланіравання фанетычных і інтанацыйных характарыстык маўлення чалавека – «ФонаКланатар» і «ІнтаКланатар». З пачатку 2010-х гадоў значнай часткай сталі ініцыяваныя Ю. С. Гецэвічам даследаванні, звязаныя з развіццём камп'ютарных метадаў па апрацоўцы тэкставай інфармацыі для сінтэзу і распазнавання маўлення. У 2013 годзе паводле прапановы Б. М. Лабанава Ю. С. Гецэвіч быў прызначаны загадчыкам лабараторыі і з'яўляецца яе кіраўніком у цяперашні час.

На сённяшні дзень галоўны навуковы напрамак дзейнасці лабараторыі – тэорыя распазнавання і сінтэзу маўлення, прымяненне маўленчай сувязі ў чалавека-машынных сістэмах. Акрамя таго, вядуцца праекты ў такіх накірунках, як шматмоўны сінтэз маўлення; распазнаванне дыскрэтнай і злітнай паслядоўнасці слоў; камп'ютарная лінгвістыка; апрацоўка натуральнай мовы; сістэмы з прымяненнем штучнага інтэлекту; распрацоўка вялікіх спецыялізаваных тэкставых і маўленчых баз даных і паралельных карпусоў; распрацоўка пытальна-адказных сістэм, мабільных аўдыягідаў і навігатараў. У лабараторыі працуе 21 чалавек, сярод іх галоўны навуковы супрацоўнік, доктар тэхнічных навук Б. М. Лабанаў; старэйшыя навуковыя супрацоўнікі – кандыдат тэхнічных навук В. А. Захар'еў, кандыдат філалагічных навук М. В. Супрунчук і кандыдат гістарычных навук Н. В. Анофранка, інжынеры-праграмісты, аператары ПЭВМ, малодшыя навуковыя супрацоўнікі і іх стажоры.

**Камп'ютарныя тэхналогіі апрацоўкі натуральнай мовы.** NLP (Natural Language Processing) – гэта адзін з важных напрамкаў у галіне штучнага інтэлекту, які дазваляе

камп'ютарам разумець і апрацоўваць чалавечую мову. Немалаважным аспектам з'яўляецца яго прымяненне і для беларускай мовы. З мэтай палягчэння працы з тэкстам і аўдыя на дадзенай мове быў створаны анлайн-рэсурс *corpus.by* – платформа для апрацоўкі тэкставай і гукавой інфармацыі для розных тэматычных даменаў. Платформа прапаноўвае карыстальніку набор інструментальных сродкаў (больш за 70 сэрвісаў) па апрацоўцы тэксту, маўлення і іншых даных, якія групуюцца ў тэматычныя дамены для больш зручнага выкарыстання ў асобных сферах дзейнасці. Сэрвісы забяспечваюць просты і ўстойлівы доступ да электроннай апрацоўкі тэксту і маўлення, а таксама да інструментаў для аналізу, выяўлення, даследавання або аб'яднання набораў даных на беларускай, рускай і англійскай мовах. Праца *corpus.by* заснавана на прынцыпе «увядзі свае даныя – атрымай адпаведныя выходныя даныя»: карыстальнік уводзіць тэкставую інфармацыю і атрымлівае апрацаваныя даныя на выхадзе. Платформа прадстаўляе інструменты для такенізацыі, марфалагічнага аналізу, агучвання электроннага граматычнага слоўніка, пошуку амонімаў, падліку частотнасці знакаў і слоў, праверкі арфаграфіі, сінтэзатара маўлення, сэрвісаў распазнавання маўлення, эмоцый і інш. Усе прадукты створаны для вырашэння задач распацоўкі алгарытмаў, рэсурсаў і метадаў інтэрнэт-уводу і інтэрнэт-вываду даных, захавання і сістэматызацыі вялікіх аб'ёмаў інфармацыі. Атрыманыя вынікі апрацоўкі даных могуць быць адаптаваны для шырокага выкарыстання ў прыкладных і практыка-арыентаваных даследаваннях, якія патрабуюць апрацоўкі вялікіх аб'ёмаў даных на розных узроўнях. Тэхналагічны стэк, які выкарыстоўваецца для платформы – PHP (60 %), Python (40 %), MySQL, JavaScript, Html, Css.

На платформе таксама змешчаны такія сэрвісы, як «*Генератар алфавітна-прадметнага паказальніка*», «*Прадказальнік кода УДК*», «*Расшыфроўка УДК*». З іх дапамогай у 2015 годзе былі зроблены значныя крокі ў напрамку развіцця лінгвістычных рэсурсаў і тэхналогій – першае выданне УДК на беларускай мове, якое змяшчае звыш 10 000 класаў асноўных табліц, дапаможныя табліцы і алфавітна-прадметны паказальнік. Праграмны прататып канверціравання арфаграфічнага запісу слова ў фанетычную транскрыпцыю рэалізаваны ў сэрвісе «*Генератар транскрыпцый*». Таксама скампіляваны электронны арфаэпічны слоўнік з дапамогай сэрвіса «*Генератар арфаэпічнага слоўніка*», які з'яўляецца алічбаванай крыніцай «*Арфаэпічнага слоўніка беларускай мовы*» – першага поўнага акадэмічнага слоўніка беларускай мовы, які фіксуе правілы літаратурнага вымаўлення. Платформа таксама прапануе шэраг сэрвісаў для вычыткі беларускамоўных тэкстаў вялікага памеру. У 2018 годзе створана *Методыка і эксперыментальны ўзор аўтаматызаванай вычыткі тэкстаў*, якая дазваляе выявіць арфаграфічныя памылкі ў электронных тэкстах розных тэматык з улікам актуальных правіл правапісу.

Задача перадапрацоўкі электронных тэкстаў на натуральнай мове таксама вырашаецца з дапамогай праграмага комплексу *NooJ* (<http://www.nooj-association.org/>), які дазваляе распацоўваць сінтаксічныя і марфалагічныя граматыкі ў форме канчатковых аўтаматаў і зручна тэсціраваць іх якасць працы на канкрэтным корпусе тэкстаў. Для гэтых мэт быў непасрэдна распацаваны беларускі модуль *NooJ*, які ўключае набор скампіляваных тэкстаў, некалькі дэманстрацыйных граматык і набор слоўнікаў (<http://www.nooj4nlp.org/resources/be.zip>).

**Маўленчыя тэхналогіі з прымяненнем штучнага інтэлекту.** У сучасным свеце тэхналогій сістэмы сінтэзу (СМТ) і распазнавання маўлення (СРМ) адыгрываюць усё больш важную ролю, пашыраючы магчымасці ўзаемадзеяння чалавека з камп'ютарам. Яны забяспечваюць новы ўзровень зручнасці і даступнасці для карыстальнікаў з абмежаванымі магчымасцямі, робяць інфармацыю даступнай больш шырокаму колу людзей і адкрываюць новыя перспектывы ў сферы адукацыі, бізнесу і камунікацыі. Лабараторыя распазнавання і сінтэзу маўлення шчыльна працуе над распацоўкай такіх сістэм на беларускай мове, што спрыяе распаўсюджванню высокатэхналагічных прадуктаў і пашырае выкарыстанне беларускай мовы ў паўсядзённым жыцці і розных сферах дзейнасці.

Сярод беларускамоўных сістэм сінтэзу маўлення варта адзначыць шэраг дадаткаў, якія пераўтвараюць тэкставую інфармацыю ў маўленне. Сярод іх *анлайн-версія сінтэзатара маўлення па тэксце*, якая распацавана на аснове СМТ «Мультифон-4». Сістэма рэалізавана на

бясplatнай і найбольш распаўсюджанай у інтэрнэце скрыптавай мове праграмавання PHP. Яна аўтаматычна апрацоўвае ўваходны тэкст на трох мовах (беларускай, рускай і англійскай з беларускім акцэнтам) і фарміруе гукавы файл, які можна праслухаць, спампаваць і захаваць на камп'ютар. Лінгвістычная апрацоўка тэксту рэалізавана на высокім узроўні. Падчас пераўтварэння электроннага тэксту ў маўленчы сігнал сінтэзатар генерыруе мноства прамежкавых вынікаў. Сярод іх нармалізаваны тэкст, фанемны запіс тэксту, запіс тэксту ў алафонным выглядзе і інш. Сінтэзатар «*Гаворачая галава*» дазваляе атрымаць візуалізацыю ўведзенага карыстальнікам тэксту ў фармаце відэафайла з аніміраванай галавой. «*Гаворачая галава*» перадае міміку чалавечай галавы і сінтэзаваны гук пры вымаўленні ўваходнага тэксту. Дзякуючы відэаадлюстраванню сэрвіс дазваляе яшчэ больш персаналізаваць уваходны тэкст, паколькі стварае «гаворачыя галовы» на аснове фотаздымкаў рэальна існуючых людзей.

СМТ новага пакалення заснавана на глыбокім навучанні нейронных сетак. У якасці мадэлі для сінтэзу маўлення на беларускай мове была абрана end-to-end мадэль VITS (Variational Inference with adversarial learning for Text-to-Speech). Яна ўяўляе сабой аднаступеньчатую неаўтарэгрэсіўную мадэль, здольную генерыраваць больш натуральны гук у параўнанні з існуючымі двухступеньчатымі мадэлямі, такімі як Tacotron 2, Transformer TTS ці нават Glow-TTS. Выкарыстоўваючы варыятыўную аснову, VITS мадэлюе латэнтную прастору характарыстык маўлення, адлюстроўваючы ўласціваю зменлівасць і нявызначанасць пры генерыраванні маўлення. Для навучання мадэлі абрана база даных, скампіляваная з бібліятэкі аўдыязапісаў на розных мовах, якая размешчана на платформе Mozilla CommonVoice. Для беларускай мовы на сённяшні дзень платформа налічвае 1815 гадзін запісу з 8400 рознымі галасамі ад дыктараў (<https://commonvoice.mozilla.org/be/languages>). Мадэль сінтэзу маўлення навучана з дапамогай Coqui TTS і рэгістратара Weights and Biases на аснове аднаго абранага невядомага дыктара, які начытаў больш за 190 гадзін высокаякаснага маўлення па наяўных тэкставых сказах. Час навучання мадэлі склаў 72 гадзіны. Доступ да мадэлі прадстаўлены ў выглядзе асобнага сэрвіса «*Сінтэзатар беларускага маўлення на тэксце РУ*», які знаходзіцца ў адкрытым доступе на платформе corpus.by (<https://corpus.by/TextToSpeechBelarusianRu/?lang=be>). Прататып характарызуецца простым і зразумелым інтэрфейсам, агучваннем тэкстаў без абмежавання па колькасці слоў і магчымасцю спампавання выніковага аўдыяфайла. Галоўнай перавагай сістэмы з'яўляецца якаснае, зразумелае штучнае маўленне з выразнай інтанацыяй і захаваннем прасадыхных асаблівасцей беларускай літаратурнай мовы.

Акрамя сістэм сінтэзу маўлення лабараторыя актыўна праводзіць даследаванні ў галіне распазнавання беларускага маўлення. Асноўныя вынікі прадстаўлены ў двух сэрвісах. Гэта «*Тэматычнае распазнаванне маўлення*» і «*Распазнаванне беларускага маўлення*». Першы сэрвіс дазваляе карыстальніку пераўтвараць вымаўленыя словы ў электронны тэкст анлайн. Карыстальнік мае магчымасць праслухаць прыклады, якія маюцца ў базе даных, запісаць фанэграму для распазнавання ці загрузіць гатовы аўдыяфайл з камп'ютара ў фармаце .wav. Галоўным недахопам сістэмы з'яўляецца абмежаваная колькасць слоў, што распазнаюцца (толькі тыя словы, што ўваходзяць у базу даных сістэмы). На гэта ўплывае малы памер і варыятыўнасць датасэту, па якім ацэньваецца прататып.

Сэрвіс «*Распазнаванне беларускага маўлення*» заснаваны на end-to-end архітэктурцы wav2vec2 з выкарыстаннем глыбокага машыннага навучання (<https://corpus.by/BelarusianSpeechRecognition/?lang=be>). Яго асаблівасцю з'яўляецца пераднавучанне на корпусе неанатаваных даных для вывучэння спосабаў якаснага вылучэння прыкмет па ўваходным аўдыязапісе. Сістэма распрацавана на базе трэніроўкі і аналізу датасэту, падчас збору якога ўлічваліся такія пункты, як высокая варыятыўнасць сабраных аўдыяфайлаў адносна дыктараў (пол, узрост, тэмп маўлення, іншыя асаблівасці вымаўлення), умовы запісаў (розныя мікрафоны, наяўнасць фонавага шуму, інш.). Дадзеныя асаблівасці дазваляюць навучыць сістэму распазнавання маўлення працаваць ва ўмовах, набліжаных да тых, з якімі гэтым сістэмам давядзецца працаваць у штодзённым жыцці. Агульная працягласць сабраных аўдыязапісаў на сённяшні дзень складае 987 гадзін (з іх 903 правераныя). У агучванні тэкстаў прынялі ўдзел 6160 дыктараў. Гэта першы з падобных датасэтаў такога памеру для беларускай

мовы. Выніковая сістэма распознае адвольны тэкст з даволі высокім узроўнем якасці (Test WER = 0,124 або 12,4 %).

Для беларускамоўных носьбітаў лабараторыя распрацавала інтэрактыўную платформу «Галасавы AI-асістэнт», якая змяшчае шэсць пытална-адказных асістэнтаў жаночага і мужчынскага полу (<https://asistent.io/>). Кожны галасавы асістэнт пабудаваны з выкарыстаннем тэхналогій распазнавання і сінтэзу маўлення, машыннага перакладу і дыялогавых сістэм. Канцэпцыя распрацоўкі грунтуецца на выдачы эфектыўнага і простага ў выкарыстанні механізма прадстаўлення агульнай інфармацыі і вырашэння праблем карыстальнікаў на беларускай мове. AI-асістэнты дазваляюць карыстальнікам вусна ці ў тэкставай форме задаваць пытанні і атрымліваць абгрунтаваны гукавы (надрукаваны) адказ хутка з высокай якасцю і дакладнасцю. Галасавыя памочнікі даступны на афіцыйным сайце платформы, інтэрфейс якой прадстаўлены на беларускай, англійскай, рускай і кітайскай мовах. Там можна абраць асабістага віртуальнага суразмоўца (Vasil, Ales, Alesia, Alena, Boris, Kiryl) і паразмаўляць у інтэрнэце, абраўшы вэб-версію, ці на смартфоне, усталяваўшы дадатак на аперацыйныя сістэмы Android ці iOS. Пытална-адказныя сістэмы таксама даступны ў выглядзе аднайменных чат-ботаў у месэнджары «Тэлеграм». Акрамя таго, можна паразмаўляць з чат-ботаўмі (Vasil, Vasilina), якія вужа накіраваны на розныя сферы дзейнасці (асістэнт агульнага профілю, архітэктар, фінансавы кансультант, гісторык, Францыск Скарына і інш.).

Да тэхналогій аўтаматычнай апрацоўкі і аналізу маўлення таксама адносяцца сістэмы распазнавання галасоў птушак, якія выкарыстоўваюць камп'ютарныя алгарытмы для вызначэння і ідэнтыфікацыі гукаў. Аўтаматычнае распазнаванне галасоў птушак шырока ўжываецца ў навуковых даследаваннях, маніторынгу біяразнастайнасці і ацэнцы экалагічнага стану асяроддзя. Для вырашэння пералічаных задач быў распрацаваны *Інфармацыйна-аналітычны цэнтр бесперапыннага аўтаматызаванага маніторынгу рэдкіх, пагражальных і індыкатарных відаў жывёл (птушак) Рэспублікі Беларусь*. У рамках праекта распрацоўкі інфармацыйна-аналітычнага цэнтра былі выкананы наступныя задачы: стварэнне праграмага асяроддзя для аўтаматызаванага распазнавання галасавых сігналаў жывёл на аснове выкарыстання распрацаванай камп'ютарнай мадэлі навучання; збор гукавых запісаў птушак для кампіляцыі базы даных з даступных і ўласных крыніц; анатаванне галасавых запісаў жывёл у мэтах стварэння і наступнага паляпшэння мадэлі аўтаматызаванага распазнавання; падрыхтоўка мадэлі і алгарытмаў функцыянавання праграмага забеспячэння, заснаваных на глыбокім машынным навучанні скруткавай нейроннай сеткі; распрацоўка і тэсціраванне вэб- і мабільных дадаткаў распазнавання галасавых сігналаў жывёл.

На сённяшні дзень распрацаваны мадэль распазнавання галасоў птушак, алгарытм аўтаматызаванай разметкі галасавых сігналаў і прататып эксперыментальнага праграмага забеспячэння інфармацыйна-аналітычнага цэнтра. Праграмае забеспячэнне інтэгравана ў інфармацыйна-аналітычны цэнтр бесперапыннага маніторынгу і даступна для выкарыстання ў адкрытым доступе ў фармаце вэб-платформы (<https://bird-voice-iac.ssrilab.by/>), Android- і iOS-версій для мабільных тэлефонаў.

**Алічбаванне гісторыка-культурнай спадчыны з персанальнымі аўдыягідамі.** Лічбавыя платформы, заснаваныя на ўзаемадзеянні разнастайных інфармацыйных сістэм, зрабілі больш даступнымі паслугі ў электронным фармаце, у тым ліку і турызме. На працягу апошніх сямі гадоў супрацоўнікі лабараторыі пры падтрымцы спецыялістаў Інстытута гісторыі НАН Беларусі займаюцца распрацоўкамі інтэрактыўных аўдыягідаў і навігацыйных сістэм па аглядзе культурна-гістарычных славукасцей і значных мясцін Рэспублікі Беларусь. Распрацоўкі змяшчаюцца на агульнай анлайн-платформе *Krokam* (<https://krokam.com/>), якая прадстаўляе такія дадаткі, як аўдыягід «Крокар» па ўсёй Беларусі, аўдыягід па археалагічным музеі «Бярэсце», аўдыягід па міжнароднай выставе «Беларусь і Біблія», аўдыягід па музеі НАН Беларусі, аўдыягід «DRUK VKL» па друкарнях ВКЛ на тэрыторыі Беларусі, аўдыягід па XXVI Міжнародным форуме па інфармацыйна-камунікацыйных тэхналогіях «ТІВО-2019», аўдыягіды «Лідскі замак» і «Батанічны сад», «Навігатар па рыбных зімавальных ямах». Пералічаныя дадаткі асвятляюць розныя культурныя мясціны, гістарычныя падзеі, музейныя

выставы і экспанаты, што дазваляе карыстальніку абраць найбольш зручны варыянт згодна сваім прыярытэтам. Кожны з аўдыягідаў адлюстроўвае спіс славутасцей/мясцін/экспанатаў, дае іх кароткае тэкставае і (ці) агучанае апісанне, іх лакацыю на карце. Яшчэ адной важнай асаблівасцю кожнага асобнага аўдыягіда з'яўляецца наяўнасць трох версій для розных платформ: вэб-версія, Android, iOS.

Платформа Krokam мае тэхнічныя, эканамічныя і сацыяльныя перавагі. Да тэхнічных адносяцца такія пункты, як зручнасць у карыстанні ўсімі аўдыягідамі; непатрэбнасць у дадатковай тэхнічнай інфраструктуры для сістэмы аўдыягідаў; сістэматызаванае адлюстраванне гарадоў/мясцін/экспанатаў, прадстаўленых у дадатках; хуткае абнаўленне базы даных з дапамогай вэб-дапаможніка ў рэальным часе; лёгкасць рэалізацыі і дабаўлення новых (дадатковых) славутасцей/экспанатаў. Да эканамічных пераваг адносяцца магчымасць хуткага перабудавання аўдыягіда для выкарыстання ў любым іншым дадатку; мінімальны набор рэсурсаў на распрацоўку як фінансавых, так і чалавечых; якасны сродак дапамогі наяўным экскурсаводам для ахопу вялікай колькасці айчынных і замежных наведвальнікаў. Сацыяльныя перавагі – гэта даступнасць любой версіі (Windows, Android, iOS), падтрымка некалькіх моў (беларускай, англійскай, рускай, польскай, кітайскай і іншых у залежнасці ад аўдыягіда), опцыя дабаўлення іншых моў, магчымасць скарыстацца аўдыягідам у зручны час без прывязкі да свабоднага экскурсавода, самастойнае планаванне маршруту асабістай экскурсіі, павышэнне якасці абслугоўвання ў турыстычнай сферы.

**Даследаванне прасадыхных характарыстык мовы.** Пачынаючы з 2015 года, працы Б. М. Лабанава прысвечаны даследаванню ўласцівасцяў маўленчай інтанацыі, неабходных для ўдасканалення валодання мовай як чалавекам, так і камп'ютарнымі сістэмамі распазнавання і сінтэзу маўлення. Распрацаваны шматмоўныя сістэмы *IntonTrainer*, *Speech Rate Meter*, *Speech Melody Meter* і *Singer VoiceTester*, якія размешчаны на сайце <https://intontrainer.by>. Усе праграмы агульнадаступны для бясплатнай загрузкі і тэсціравання.

Праграмны модуль «IntonTrainer» прызначаны для аналізу, экраннага адлюстравання і супастаўлення інтанацыйных контураў частаты асноўнага тону эталоннай і вымаўленай фраз, а таксама лічбавай ацэнкі іх інтанацыйнага падабенства. Комплекс дазваляе ажыццяўляць першаснае азнаямленне з асноўнымі інтанацыйнымі канструкцыямі маўлення, якія выкарыстоўваюцца ў розных мовах (англійскай, рускай, кітайскай, беларускай), іх супастаўленне, вывучэнне асаблівасцяў ужывання, а таксама іх рэалізацыі ў дыялогу, прозе і вершах. Праграма *Speech Rate Meter* прызначана для ацэнкі комплексу прасадыхных характарыстык тэмпу маўлення, а менавіта: агульнай хуткасці чытання тэксту, хуткасці генерацыі фанематычнага патоку, сярэдняй працягласці міжфразавых паўз, адноснай працягласці «запаўнення» вакальных уставак. *Speech Melody Meter* ацэньвае статыстычныя характарыстыкі мелодыкі маўлення шляхам пабудовы і адлюстравання гістаграм размеркавання частот сустракаемасці дыскрэтных значэнняў частаты асноўнага тону на працяглых інтэрвалах маўлення. Праграма *Singer VoiceTester* выкарыстоўваецца для тэсціравання спеўных здольнасцяў карыстальніка шляхам аналізу статыстычных характарыстык працяглага інтэрвалу (парадку 10 секунд) акустычнага сігналу яго спеваў. Дадатак *Voice EmoMeter* прымяняецца для аналізу і вымярэння ступені эмацыянальнасці голасу чалавека як для запісанага непасрэдна з мікрафона маўленчага фрагмента, так і для запісаных загадзя тэставых аўдыяфайлаў з розных крыніц.

Прасадыхныя характарыстыкі маўлення разам з эмацыянальнасцю маўлення характарызуюць галоўныя ўласцівасці маўленчай дзейнасці асобы, што немалаважна для інтанацыйна-сэнсавага дзялення маўлення, перадачы камунікатыўнага тыпу выказвання, вызначэння асобных эмацыянальных значэнняў. Іх рэалізацыя ў складзе камп'ютарных сістэм з акустычным кампанентам прыбліжае працэс надання натуральнага гучання штучнаму маўленню і абумоўлівае важнасць вывучэння інтанацыйных параметраў на камп'ютарным узроўні.

**Акамуляцыя ведаў у галіне штучнага інтэлекту.** Хуткае развіццё IT-сферы спрыяе новым дасягненням і імкненню ўдасканальваць, мадэрнізаваць і аўтаматызаваць сучаснае грамадства. Прымяненне штучнага інтэлекту у такіх галінах, як робататэхніка, машыннае навучанне, віртуальная рэальнасць, апрацоўка вялікіх аб'ёмаў даных і інш., пашырае навуковыя даследаванні і садзейнічае развіццю перспектыўнай практычнай рэалізацыі. Укараненне

сістэмных тэхналогій на аснове штучнага інтэлекту патрабуе комплекснага падыходу як міжнароднага досведу і прадуктаў штучнага інтэлекту ад лідараў у адпаведных галінах, так і прадстаўлення айчынных распрацовак для выкарыстання зацікаўленымі на міжнароднай арэне. Для аб'яднання і акумуляцыі перадавых даследаванняў і распрацовак штучнага інтэлекту, створаных у Рэспубліцы Беларусь, а таксама наладжвання камунікацыі і сувязі паміж навуковымі суполкамі лабараторыяй распазнавання і сінтэзу маўлення прадстаўлена «*Платформа штучнага інтэлекту BELAI*». Тэрміновасць, ініцыятыўны, навучальны і інтэграцыйны падыход, удзел усіх зацікаўленых бакоў і правядзенне публічных абмеркаванняў будуць складаць асноўныя накірункі дзейнасці платформы, каб дазволіць Беларусі вырашаць, як яна жадае выкарыстоўваць штучны інтэлект для росквіту і дабрабыту.

Мэта распрацоўкі платформы – стымуляваць дзейнасць у галіне штучнага інтэлекту і выпрацаваць агульныя прынцыпы работы па развіццю штучнага інтэлекту ў Беларусі. Гэта партнёрства, у якім прамысловасць, адукацыйныя і навукова-даследчыя ўстановы, бізнес і зацікаўленая супольнасць імкнуцца паскараць развіццё штучнага інтэлекту і аб'ядноўваць ініцыятывы штучнага інтэлекту ў Беларусі.

З канцэптуальным вэб-прыкладаннем можна азнаёміцца на афіцыйным сайце па спасылцы <https://belai.by/>. Інтэрфейс сайта прадстаўлены на беларускай і рускай мовах. Раздзел *Навіны* інфармуе супольнасць па тэмах, звязаных са штучным інтэлектам, або генерыруе адпаведныя дыскусіі. Раздзел *Даследаванні* ўключае навуковыя публікацыі, артыкулы па пэўных тэмах, можа змяшчаць спасылкі на базы даных са штучным інтэлектам, спасылкі на запісы вэбінараў, інтэрв'ю, вэб-сайты або любы іншы кантэнт, які дапамагае павысіць дасведчанасць у працы і інтарэс удзельнікаў, звязаных са штучным інтэлектам. Раздзел *Канферэнцыі* накіроўвае на галоўныя падзеі ў галіне штучнага інтэлекту Беларусі.

Для пашырэння ведаў беларускага грамадства па сучасных айчынных і сусветных дасягненнях у штучным інтэлекце створаны тэлеграм-канал BelAI як дадатковы інструмент асвятлення галоўных падзей, навін і даследаванняў у сферы штучнага інтэлекту (<https://t.me/belaiplatform>). Распрацоўшчыкі канала выкарыстоўваюць розныя фарматы кантэнту, такія як тэкставыя нататкі, фота, відэа і апытанні, каб падтрымліваць узаемадзеянне з падпісантамі. Тэлеграм-канал публікуе навіны два разы ў дзень і знаёміць карыстальнікаў з наступнымі відамі навін: асвятленне актуальных даследаванняў і распрацовак у сферы штучнага інтэлекту ў свеце і Беларусі; знаёмства з сучаснымі камп'ютарнымі сэрвісамі, праграмамі і прыладамі, якія выкарыстоўваюць тэхналогіі штучнага інтэлекту; адлюстраванне апошніх дасягненняў штучнага інтэлекту ў робататэхніцы, медыцыне, прыборабудаванні, камп'ютарных тэхналогіях; прадстаўленне разнастайных бібліятэк, камп'ютарных інфармацыйных сховішчаў, якія даюць доступ да вялікай колькасці інструментаў з штучным інтэлектам; апісанне статыстычных даных развіцця штучнага інтэлекту ў часовай адлегласці, таксама параўнанне штучнага інтэлекту з чалавечымі магчымасцямі.

Мяркуецца, што платформа штучнага інтэлекту і тэлеграм-канал паспрыяюць знаёмству і аб'яднанню беларускіх кампаній, каманд і індывідуальных распрацоўшчыкаў і практыкаў беларускай супольнасці ў галіне штучнага інтэлекту, а таксама пашыраць веды ў гэтай галіне.

**Удасканаленне працы аўтаматызаваных сістэм па тэкстах розных тэматyk.** У межах задання «Мадэлі, метады, алгарытмы і праграмныя сродкі інтэлектуальнай апрацоўкі, аналізу і распазнавання медыка-біялагічных даных, малюнкаў, маўленчай і тэкставай інфармацыі, распрацоўка на іх аснове інфармацыйных тэхналогій і сістэм медыцынскага і сацыяльнага прызначэння» былі пастаўлены дзве асноўныя падзадачы:

1. Распрацоўка мадэляў паралельных электронных карпусоў маўлення і тэкстаў медыцынскай, сацыяльнай і прававой тэматыкі на рускай, беларускай і англійскай мовах для распрацоўкі і тэсціравання інтэлектуальных сістэм распазнавання і сінтэзу маўлення.

2. Распрацоўка ўніверсальных алгарытмаў апрацоўкі маўлення і тэкстаў па сабраных электронных карпусах маўлення і тэкстаў медыцынскай, сацыяльнай і прававой тэматыкі на рускай, беларускай і англійскай мовах.



Калектыў лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення



Удзел у II Форуме IT-Акадэміі «Штучны інтэлект у Беларусі», 2023 г.



Удзел прадстаўнікоў лабараторыі ў эфіры беларускага радыё «Культура»

Для дасягнення гэтай мэты лабараторыя ажыццявіла апрацоўку тэкстаў прыведзеных тэматык і іх назапашванне для кампіляцыі электронных паралельных карпусоў тэкстаў. Першапачатковым этапам стаў пераклад на беларускую мову кодэксаў законаў, паколькі толькі адзін з іх («Аб культуры») быў прыняты па-беларуску. У чэрвені 2024 года гэта праца была скончана. Яна вялася ў некалькі этапаў. Спачатку кодэкс перакладаліся з дапамогай машыннага перакладчыка на сайце [pravo.by](http://pravo.by), пасля іх вычыталі два рэдактары-лінгвісты і адзін рэдактар-юрыст. У працэсе ручной апрацоўкі вынікаў аўтаматычнага перакладу былі выяўлены разнастайныя недакладнасці, памылкі і хібы, праведзена ўніфікацыя тэрмінаў і ўстойлівых выказаў. Затым тэксты правяраліся з дапамогай карэктарскіх сэрвісаў сайта [corpus.by](http://corpus.by). Далей тэксты з дапамогай сінтэзатара маўлення былі канвертаваны ў аўдыяфайлы кодэксаў, што забяспечыць доступ да гэтай інфармацыі і для людзей са слабым зрокам, а самі сінтэзатары могуць быць пратэставаны на тэкстах юрыдычнай тэматыкі. Акрамя апісанага прыкладнага значэння праект мае таксама адукацыйную і навуковую вартасць. Так, на розных этапах да яго далучаліся студэнты БДУ, якія выконвалі ў яго рамках свае заданні для дыпломных прац ці вытворчай практыкі. Падрабязней аб праекце можна прачытаць тут – <https://ssrllab.by/7804>.

Акрамя таго, былі сфарміраваны карпусы медыцынскай і сацыяльнай тэматык (на аснове паралельных перакладаў матэрыялаў медыцынскіх арганізацый і гісторыка-культурнага сацыяльнага аўдыягіда KrokApp адпаведна). Карпусы прадстаўлены на беларускай, рускай і англійскай мовах у фармаце TXT і NooJ. Назіранні над спалучальнасцю, спецыфікай тэрмінаўтварэння, недакладнасці камп'ютарнага ці ручнога спосабу перакладу асэнсаваны ў шэрагу артыкулаў, падрыхтаваных супрацоўнікамі лабараторыі. Значную карысць у гэтай працы мае лінгвістычны працэсар NooJ. Ён выкарыстоўваўся для складання карпусоў канкрэтных тэматык тэкстаў з граматычнай разметкай і для алгарытмаў (сінтаксічных граматык), якія дапамагалі ўдакладняць значэнні слоў, ліквідаваць іх шматзначнасць у тэкстах.

**Заклучэнне.** Прыведзеныя праграмныя распрацоўкі лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення ўяўляюць сабой зручныя і шматфункцыянальныя інструменты па апрацоўцы тэкстаў, маўлення і іншых даных на беларускай мове. Яны прадстаўляюць шырокі спектр магчымасцей для карыстальнікаў, якія дазваляюць выконваць складаныя задачы ў тэарэтычных даследаваннях і прыкладных праграмах. Устойлівыя інтэрнэт-распрацоўкі атрымліваюць прымяненне ў разнастайных інтэрнэт-праектах, а таксама рэалізуюцца пад мабільныя платформы (для Android, iOS).

Распрацоўка платформы [corpus.by](http://corpus.by) па апрацоўцы натуральнай мовы спрыяе хуткаму і ўстойліваму доступу да сэрвісаў апрацоўкі тэкстаў і маўлення на розных мовах, разнастайных дадаткаў для аўтаматызацыі працэсаў і алгарытмаў, акумуляванню новых моўных і маўленчых рэсурсаў, што абумоўлена хуткім тэмпам развіцця тэхналогій штучнага інтэлекту.

Наяўнасць якасных мадэлей сінтэзу і распазнавання адвольнага маўлення адкрывае для беларускай мовы перспектывы далейшага развіцця больш складаных моўных тэхналогій: галасавы ўвод тэксту, галасавыя дапаможнікі, аўтаматызаванае навучанне беларускай мове, навігацыйныя сістэмы і інш. Алічбаванне сферы культуры і распрацоўка сучасных аўдыягідаў у першую чаргу накіраваны на прыцягненне ўвагі да гісторыка-культурных каштоўнасцей краіны і павышэнне якасці жыцця насельніцтва. У будучым плануецца інтэграцыя ў аўдыягіды і навігатары галасавых памочнікаў штучнага інтэлекту. Забеспячэнне сучаснымі інфармацыйна-камп'ютарнымі сродкамі прыводзіць да фарміравання інавацыйных ідэй, што ўплывае на зацікаўленасць у распрацоўцы новых айчынных прадуктаў у сферы штучнага інтэлекту. Развіццё штучнага інтэлекту мае вялікі патэнцыял для ўдасканалення навуковых даследаванняў, павышэння эфектыўнасці вытворчасці, стварэння новых бізнес-мадэляў і паляпшэння якасці жыцця ў краіне. Стварэнне агульнай Платформы штучнага інтэлекту Рэспубліцы Беларусь і навінавага тэлеграм-канала BelAI будзе садзейнічаць сумеснаму развіццю айчынных перадавых тэхналогій штучнага інтэлекту. Камбінацыя хуткага доступу да інфармацыі, разнастайнай тэматыкі, інтэрактыўнасці і лёгкасці выкарыстання робіць прадстаўленыя рэсурсы прывабнымі для шырокага кола распрацоўшчыкаў і ўсіх зацікаўленых, дазваляючы супрацоўніцтва, абмен ведамі і вопытам, а таксама стварэнне і ўдасканалванне алгарытмаў, мадэлей і архітэктуры штучнага інтэлекту.

УДК 004.9 : 021

## **Автоматизация информационного обеспечения научных исследований и разработок в Национальной академии наук Беларуси**

**Григянец Ромуальд Брониславович**

*заведующий лабораторией информационного обеспечения научных исследований,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: griganec@bas-net.by*

**Венгеров Виктор Николаевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории информационного обеспечения научных исследований,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: vengerov@basnet.by*

Развитие информационного общества и электронного государства неразрывно связано с современными информационными технологиями и научно-технической информацией (НТИ), использование которых играет определяющую роль в научных исследованиях и разработках, характеризует их современный уровень, способствует научно-техническому прогрессу во всех сферах жизнедеятельности.

Сотрудники ОИПИ НАН Беларуси последние 15 лет принимают участие в выполнении проектов, входящих в Перечень научных исследований и разработок по развитию государственной системы НТИ в Республике Беларусь, который формирует Государственный комитет по науке и технологиям. Постоянно предлагаемые специалистами института технологии и созданные на их базе системы представляют собой программный комплекс инструментальных средств, которые позволяют в НАН Беларуси и других организациях автоматизировать информационное обеспечение научной, научно-технической и инновационной деятельности на базе ресурсов НТИ. Наиболее важные и интересные проекты, созданные в рамках указанного перечня и входящие в состав данного программного комплекса, перечислены далее:

1. *Автоматизированная система информационного обеспечения научно-технической деятельности в НАН Беларуси (АСИО НТД)* [1]. Проект обеспечивает формирование и ведение базы данных (БД) о результатах НТД и разработках организаций НАН Беларуси, а также удаленный интернет-доступ к таким БД. Все это осуществляется при помощи созданных программных средств для приема и агрегации результатов НТД организаций НАН Беларуси. При этом формируются защищенные разделы данных, а затем результаты НТД передаются в централизованную БД Аппарата НАН Беларуси (рис. 1).

Под научно-технической продукцией понимаются результаты исследований в отчетах о НИР, монографиях и других печатных изданиях, конструкторская и технологическая документация, программные средства, технологии, опытные образцы, макеты, модели, вещества, материалы, изделия и т. п.

Исполнителем работ по созданию и развитию проекта является ОИПИ НАН Беларуси, а ведение БД осуществляет Главное управление научной, научно-технической и инновационно-производственной деятельности Аппарата НАН Беларуси. В настоящее время в режиме удаленного интернет-доступа к АСИО НТД подключены 72 научные организации НАН Беларуси, а БД о результатах НТД содержит более 6 тыс. записей.

Проект решает важные задачи для ученых и организаций Беларуси по совершенствованию и развитию информационного обеспечения НТД НАН Беларуси. Информация, содержащаяся в проекте, активно используется организациями НАН Беларуси для анализа состава полученных в них результатов НТД в отношении принадлежности прав на указанные результаты с це-

люю обеспечения их коммерциализации, а также подразделениями Аппарата НАН Беларуси для осуществления мониторинга деятельности подчиненных организаций в целях принятия эффективных управленческих решений при формировании программ всех типов.

2. *Автоматизированная подсистема избирательного распространения и электронной доставки научной информации на базе электронного каталога Центральной научной библиотеки НАН Беларуси (АИС ИРИ)* [2]. Информационная деятельность Центральной научной библиотеки имени Я. Коласа Национальной академии наук Беларуси (ЦНБ НАН Беларуси) неразрывно связана с научными интересами ученых и специалистов республики и направлена на оперативное распространение и доставку научной информации. Используя современный онлайн-сервис АИС ИРИ, можно донести требуемую информацию до каждого пользователя в кратчайшие сроки и на тех условиях, которые определяет сам пользователь.

Избирательное распространение информации – это система информационного обслуживания, которая обеспечивает периодическое доведение сигнальной информации о текущих поступлениях информационных источников до потребителей в соответствии с их информационными запросами с последующей выдачей по заказу пользователя оригиналов документов или их копий.

Проект предназначен для систематического информирования пользователей в автоматическом режиме о текущих поступлениях документов в ЦНБ НАН Беларуси в соответствии с их постоянно действующими запросами (профилями интересов) на базе электронного каталога библиотеки. Важной задачей АИС ИРИ является информирование пользователей с максимальной полнотой и содержательностью без каких-либо ограничений по месту жительства, возрасту, роду деятельности или месту работы/учебы. АИС ИРИ не только систематически информирует пользователей о новых поступлениях документов в библиотеку, но и поддерживает обратную связь с пользователями и последующую выдачу им документов.

На сегодняшний день абонентом АИС ИРИ может стать каждый заинтересованный в получении качественной библиографической информации независимо от возраста, страны проживания и рода занятий. Для того чтобы быть в курсе новых поступлений, теперь нет необходимости в постоянном обращении к электронному каталогу библиотеки, многократном повторении поиска, просмотривании похожих результатов, выявлении новых документов. Достаточно зарегистрироваться в АИС ИРИ индивидуально или рабочим коллективом, командой, задать нужные условия для поиска, что существенно экономит время, увеличит эффективность поиска и оперативность доставки информации.

Основной источник получения информации в рамках работы АИС ИРИ – это электронный каталог ЦНБ НАН Беларуси, который постоянно пополняется. Еще одним преимуществом АИС ИРИ является принцип формирования рассылки: пользователю выгружается не весь массив информации из электронного каталога по интересующей его теме, а только новые поступления за указанный промежуток времени, исключены также повторы и в последующих рассылках (рис. 2). В настоящее время электронный каталог содержит 1785 тыс. библиографических и 982 тыс. авторитетных (нормативных) записей, а ежегодный их прирост составляет около 10 тыс. Следует отметить, что с 2020 г. аналитической росписи подлежат периодические издания по естественным, техническим, общественным и гуманитарным наукам.

Опыт внедрения АИС ИРИ в практику информационного обслуживания пользователей ЦНБ НАН Беларуси показывает, что в настоящее время система отвечает основным запросам своих абонентов. Поддержка четко организованной и быстродействующей обратной связи с пользователями на новом технологическом уровне, а также возможность оказания личной профессиональной консультационной помощи обеспечивают высокий уровень качества данной информационной услуги.

3. *Комплекс информационно-технологических систем автоматизации научных и научно-технических библиотек на основе облачных веб-технологий (КИТС БИТ WEB)* [3]. В настоящее время используемые библиотечные системы нуждаются в модернизации, переходе на веб-технологии, расширении спектра информационных услуг и продуктов, предлагаемых пользователям, а также в повышении уровня информационного обслуживания своих абонентов. Необходимо также полноценное интегрирование библиотечных систем с системами информаци-

ного обеспечения различных видов научной, научно-технической, инновационной деятельности и наукоемких производственных процессов. Одно из практических решений такой задачи – реализация данного комплекса.

Комплекс предназначен как для автоматизации отдельных научных и научно-технических библиотек, так и для построения корпоративных автоматизированных библиотечно-информационных систем. Он может быть размещен на платформе, функционирующей на базе облачных технологий, что позволяет получать доступ к необходимому программному обеспечению и инфраструктуре с помощью интернет-браузера. Комплекс дает также возможность создавать автоматизированные системы информационного обеспечения различных видов научной, научно-технической и инновационной деятельности, информационных систем и библиографических БД различной тематики в научно-исследовательских организациях, учреждениях науки и образования.

Комплекс поддерживает совместимость с информационными системами республиканских и областных научных библиотек с помощью единых коммуникативных форматов библиографических и авторитетных записей BELMARC и BELMARC/Authorities, что позволяет участвовать в корпоративном обмене информацией. Он обеспечивает полное интегрирование в систему корпоративной каталогизации, действующей в настоящее время на основе Сводного электронного каталога (СЭК) библиотек Беларуси, функционирующего на базе Национальной библиотеки Беларуси.

Логическая организация БД комплекса представляет собой структуру взаимосвязанных реляционных таблиц, составляющих схему БД автоматизированной библиотечно-информационной системы (АБИС), и алгоритмы функционирования программных средств на основании табличных данных (рис. 3).

Комплекс создан на программно-информационной платформе с использованием облачных веб-технологий и обеспечивает автоматизацию научных и научно-технических библиотек на основе данных технологий. Его сопровождение и развитие осуществляются в рамках обеспечения функционирования научно-информационных компьютерных сетей. Комплекс принят в эксплуатацию в ЦНБ НАН Беларуси в июне 2022 г.

4. *Автоматизированная система информационного обеспечения библиометрической оценки научной продуктивности и результативности деятельности исследовательских организаций и ученых (БОНУС)* [4]. Все более возрастающая роль науки в развитии информационного общества и ее влияние на все сферы жизнедеятельности диктуют использование объективных количественных параметров оценки научной деятельности ученых и организаций.

Основой для анализа структуры цитирований и определения библиометрических показателей являются реферативные БД, в которых собираются не только библиографические данные о публикациях (авторе, заглавии, наименовании журнала, годе, томе, выпуске, страницах), но и пристатейные списки цитируемой литературы. Наиболее используемые на сегодняшний день реферативные БД (их называют еще индексами цитирования), а также информационные продукты и услуги на их базе предоставляют компании Elsevier (Голландия), Clarivate Analytics (США), Google (США), а также «Научная электронная библиотека» (Россия) с популярным Российским индексом научного цитирования (РИНЦ).

Проект предоставляет методические и информационные материалы в области наукометрии; профили ученых и организаций с их библиометрическими показателями, а также (дополнительно к ним) методику получения количественных экспертных оценок, характеризующих научно-производственную и инновационную деятельность ученых по информации из их годовых отчетов. Библиометрические данные на сегодняшний день предоставляются по запросу авторов и (или) организаций на платной основе (рис. 4).

БОНУС осуществляет мониторинг публикационной активности ученых и научных организаций республики; предоставляет сведения о количестве публикаций, цитируемости отдельного ученого или организации; выявляет наиболее активных ученых и специалистов; определяет тематическую направленность исследований; составляет различные отчеты о научно-исследовательской деятельности организации или отдельного ученого и др.

В дополнение к уже имеющимся и широко используемым библиометрическим показателям публикационной активности предлагается использовать определяемые в проекте Т-индексы для оценки деятельности отдельного ученого, а также организации или ее подразделения. Назначение Т-индекса – оценка всех ученых организации, ведущих научно-производственную и инновационную деятельность, их ранжирование по результатам работы за год в соответствии с представленными ими отчетами о такой деятельности. При этом вышеупомянутые реферативные БД не используются.

Проект эксплуатируется в ЦНБ НАН Беларуси с декабря 2022 г. (<http://bonus.basnet.by/plus/>).

Рис. 1. Информация о программах и проектах НАН Беларуси в АСИО НТД

Рис. 2. Перечень бесплатных услуг в ЦНБ НАН Беларуси по избирательному распространению информации (см. 03)

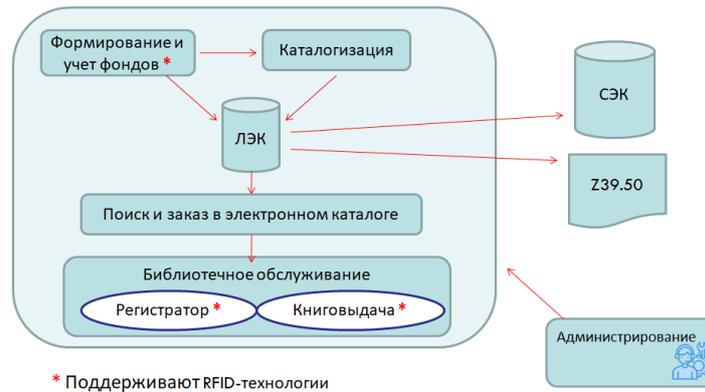


Рис. 3. Функциональная структура КИТС БИТ WEB (ЛЭК – локальный электронный каталог)

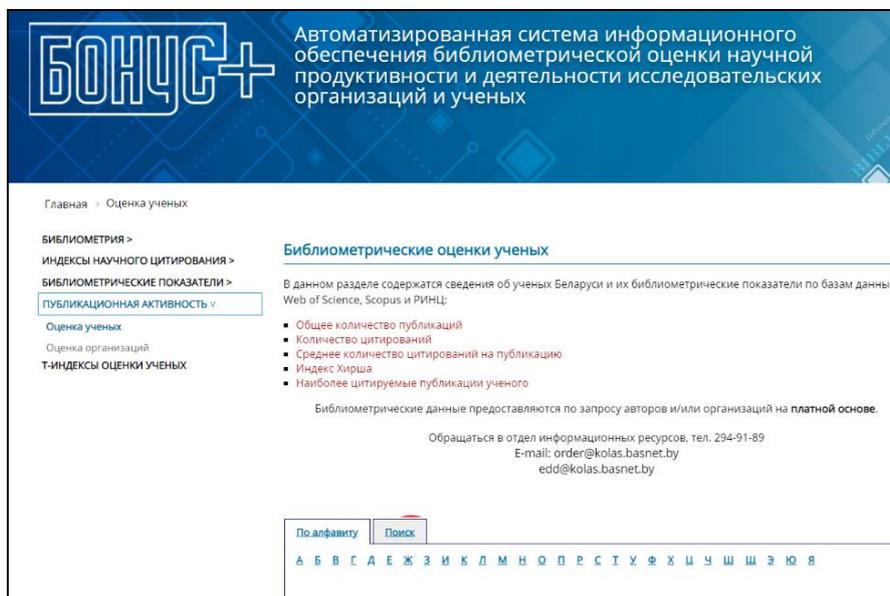


Рис. 4. Библиометрические данные ученых в БОНУС

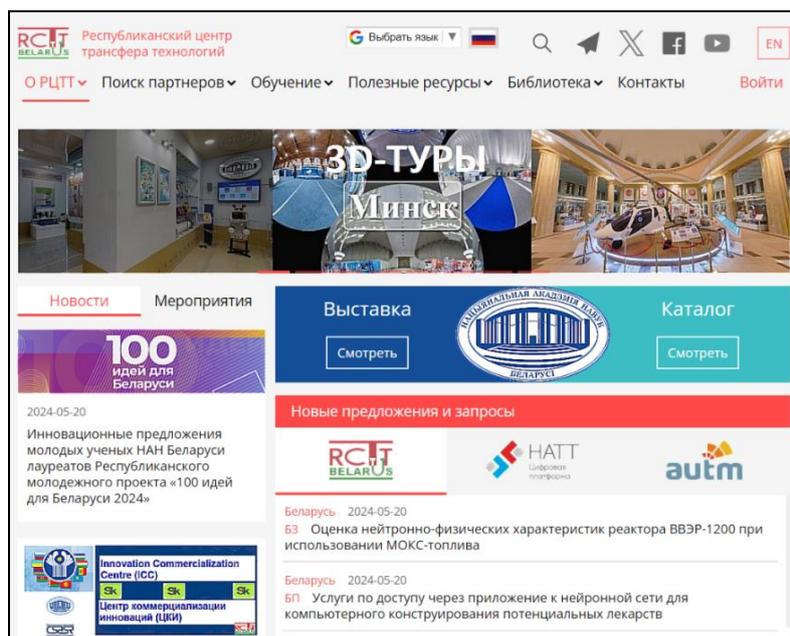


Рис. 5. Фрагмент главной страницы АСИО ИДТТ

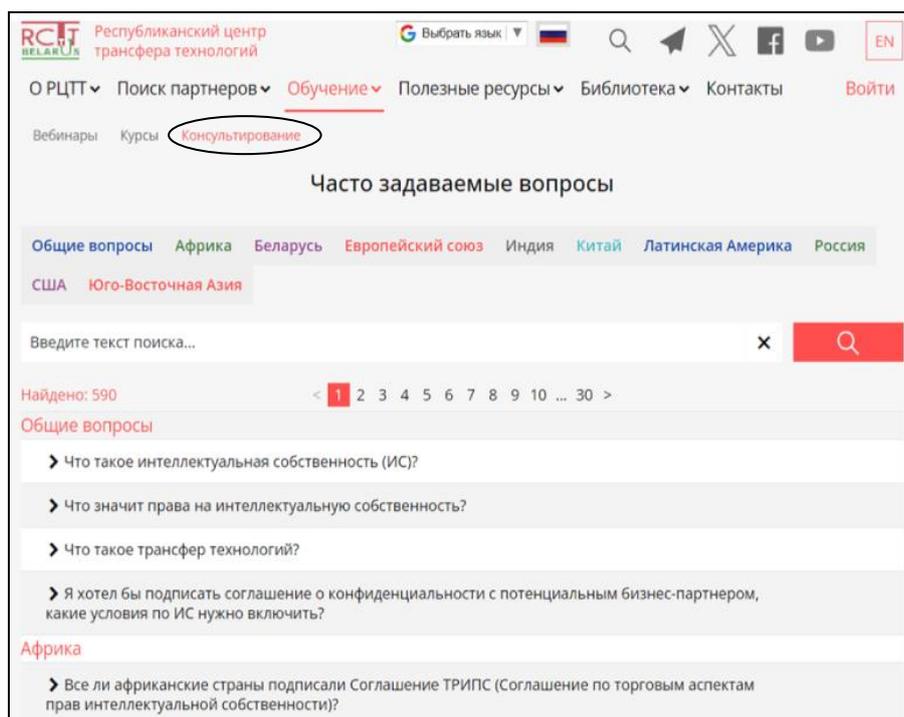


Рис. 6. Информация о часто задаваемых вопросах в АСОК

5. *Автоматизированная система информационного обеспечения инновационной деятельности и трансфера технологий в НАН Беларуси (АСИО ИДТТ)* [5]. Развитие инструментов поддержки внешнеэкономической деятельности в целях содействия увеличению экспорта (импорта) наукоемкой продукции и технологий – одна из важнейших задач в Беларуси. Это может быть достигнуто усилением информационно-коммуникационной составляющей поддержки экспорта (импорта) и активизацией, в частности, процесса трансфера технологий (ТТ), бизнес-кооперации и сотрудничества в области научных исследований. *Трансфер технологий* – это процесс передачи технологий из сферы их разработки в сферу практического использования.

В НАН Беларуси на базе интернет-портала Республиканского центра трансфера технологий создана АСИО ИДТТ для организаций НАН Беларуси, обеспечивающая оперативное предоставление информационных услуг в области ТТ, бизнес-кооперации и сотрудничества в сфере научных исследований. К проекту могут быть подключены и другие организации республики.

Проект предоставляет потенциальным партнерам сведения для проведения совместных исследований и коммерциализации результатов НТД с использованием современных информационных технологий; информирует пользователей о научно-технических достижениях в Беларуси, экспонатах виртуальной выставки для информационной поддержки выставочных мероприятий, в которых участвуют организации НАН Беларуси; формирует БД с результатами НТД организаций; обеспечивает поддержку взаимодействия с внешними информационными ресурсами.

АСИО ИДТТ поддерживает в актуальном состоянии (на русском и английском языках) БД зарегистрированных пользователей, а также так называемых профилей, под которыми понимаются созданные пользователями по специальной форме технологические запросы, технологические предложения, бизнес-запросы, бизнес-предложения и предложения по сотрудничеству в области НИОК(Т)Р. Для резидентов Беларуси, зарубежных фирм и инвесторов проект предоставляет также ряд сервисных услуг (рис. 5).

Основные технические решения по функционированию АСИО ИДТТ обеспечивают современный подход к организации научно-методической информации с целью поиска и доступа к ней с использованием сервисов Интернета. Результатом деятельности в этом направлении являются формирование и ведение единого информационного ресурса по обеспечению инновационной деятельности и ТТ в НАН Беларуси, а также обеспечение открытости, доступности и достоверности данного ресурса.

Проект разработан по заказу НАН Беларуси в ОИПИ НАН Беларуси и Центре системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, который является также организацией-пользователем (<https://www.ictt.by>). Партнерами проекта являются более 50 организаций из 14 стран Европы, Азии, Америки и Африки.

6. *Автоматизированная система онлайн-обучения и консультирования по вопросам трансфера технологий, управления и коммерциализации интеллектуальной собственности в НАН Беларуси (АСОК)* [6]. Существующие зарубежные автоматизированные системы онлайн-обучения и консультирования по вопросам ТТ, управления и коммерциализации информационных систем постоянно развиваются и совершенствуются. Основным их недостатком является то, что они предлагают информацию только на английском языке, а в качестве консультантов там работают специалисты, не владеющие особенностями белорусского законодательства.

Проект дополняет возможности АСИО ИДТТ в части онлайн-обучения и консультирования по вопросам ТТ, управления и коммерциализации интеллектуальной собственности в НАН Беларуси, что позволяет оперативно консультировать сотрудников НАН Беларуси (руководителей организаций и их подразделений, бухгалтеров, специалистов отделов маркетинга, научных сотрудников) по данным вопросам. Такие возможности включают:

- поддержку проведения тренингов, онлайн-семинаров, конференций и консультаций;
- формирование планов мероприятий, рассылку и подписку на них;
- онлайн-регистрацию участников мероприятий и рассылку напоминаний зарегистрированным участникам о предстоящем мероприятии;
- онлайн-демонстрацию презентаций, вопросов и ответов;
- регистрацию и доведение вопросов, сформулированных в письменном виде, до соответствующих консультантов, зарегистрированных в системе (в качестве консультантов могут выступать специалисты Центра системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, Президиума НАН Беларуси и других организаций);
- организацию взаимодействия с зарегистрированными консультантами по результатам диалога на прошедшем мероприятии;
- поддержку проведения опроса участников мероприятий (например, о качестве проведенных мероприятий, ответах на интересующие вопросы и т. п.);
- ведение БД презентаций, методических руководств, вопросов и ответов на них (рис. 6);
- возможность использования внешних аналогичных информационных ресурсов.

Повышение компетенций сотрудников НАН Беларуси в сфере ТТ будет способствовать росту конкурентоспособности научно-технической продукции организаций НАН Беларуси, что позволит увеличить экспорт товаров и услуг.

Проект создается в ОИПИ НАН Беларуси и Центре системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси (организация-пользователь), доступен по адресу <https://www.ictt.by>.

### Публикации

1. Григянец, Р. Б. Автоматизированная система информационного обеспечения научно-технической деятельности в НАН Беларуси / Р. Б. Григянец, С. Н. Тарасенко // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2020) : доклады XIX Междунар. конф., Минск, 19 нояб. 2020 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2020. – С. 235–237.

2. Григянец, Р. Б. Автоматизированная система избирательного распространения и электронной доставки научной информации в Национальной академии наук Беларуси / Р. Б. Григянец, Е. В. Степанцова, Н. Г. Шабалина // Библиотеки в информационном обществе: сохранение традиций и развитие новых технологий. Тема 2020 года – «Библиотека и наука: взаимодействие и перспективы развития» : докл. IV Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию Белорус. с.-х. б-ки, Минск, 3–4 дек. 2020 г. / Белорус. с.-х. б-ка им. И. С. Лупиновича НАН Беларуси. – Минск, 2020. – С. 211–218.

3. Григянец, Р. Б. Создание комплекса информационно-технологических систем для автоматизации научных и научно-технических библиотек на основе облачных веб-технологий / Р. Б. Григянец, Е. В. Степанцова, К. А. Рабушко // Библиотечно-информационный дискурс. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 24–31.

4. Венгеров, В. Н. БОНУС для ученых и организаций / В. Н. Венгеров, Р. Б. Григянец // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2019) : доклады XVIII Междунар. конф., Минск, 21 нояб. 2019 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – С. 321–324.

5. Активизация научной, производственной и инновационной деятельностью организаций средствами трансфера технологий / Р. Б. Григянец, В. Н. Венгеров, Ж. М. Молчан [и др.] // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2022) : доклады XXI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17 нояб. 2022 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – С. 193–197.

6. О повышении компетенций сотрудников НАН Беларуси в сфере трансфера технологий / Р. Б. Григянец, В. Н. Венгеров, Ж. М. Молчан [и др.] // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2023) : доклады XXII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 нояб. 2023 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 168–171.

УДК 519.8

## Исследование операций

### **Гущинский Николай Николаевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат физико-математических наук  
E-mail: gyshin@newman.bas-net.by*

### **Ковалев Михаил Яковлевич**

*главный научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
доктор физико-математических наук  
E-mail: kovalyov\_my@newman.bas-net.by*

### **Розин Борис Матвеевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат технических наук  
E-mail: rozin@newman.bas-net.by*

### **Сотсков Юрий Назарович**

*главный научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
доктор физико-математических наук  
E-mail: sotskov48@mail.ru*

### **Шафранский Яков Михайлович**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
E-mail: shafr-04@yandex.by*

Создание научной школы исследования операций в Беларуси связано с заслуженным деятелем науки Республики Беларусь, лауреатом Государственной премии Республики Беларусь, академиком В. С. Танаевым. С 1970-х гг. представителями этой школы из ОИПИ НАН Беларуси и под их руководством защищено 6 докторских и 32 кандидатские диссертации, опубликовано 16 монографий, свыше 1400 научных статей, более 60 брошюр и сборников научных статей. Выполнено 18 международных научных проектов с участием партнеров из Австрии, Великобритании, Германии, Китая, Нидерландов, Норвегии, Польши, России и Франции.

В последние 10 лет участники школы получили наиболее значимые научные результаты по следующим направлениям исследования операций и его приложений: планирование и построение расписаний, проектирование производственных линий, оптимизация инфраструктуры и функционирования электротранспорта, логистика и цены в Интернете.

**Планирование и построение расписаний.** Минск является одним из мировых центров развития теории расписаний, основы которой были заложены во второй половине прошлого века, в том числе академиком В. С. Танаевым и его учениками [1]. Основными терминами этой теории являются приборы (станки, производственные линии, процессоры, команды исполнителей) и обрабатываемые (обслуживаемые) ими требования (производственные операции, работы, вычислительные задания, проекты). В последние годы в рамках теории расписаний интенсивно развиваются такие направления, как обслуживание требований партиями, построение расписаний с директивными сроками и окнами, модели на основе смешанных графов, построение расписаний в условиях неопределенности, сложность задач построения расписаний и др. Ниже приведен краткий обзор результатов по этим направлениям.

*Обслуживание требований партиями.* В последнее десятилетие получила дальнейшее развитие теория построения расписаний обслуживания требований партиями. В частности, подготовлена обширная библиография по недетерминированным задачам разбиения работ на партии [2], разработаны алгоритмы временной сложности  $O(n \log n)$  для двух классических задач обслуживания требований партиями [3, 4], построены полиномиальные и псевдополиномиальные алгоритмы, доказательства NP-трудности задач в случае наличия двух заинтересованных в обслуживании требований агентов [5, 6], а также приближенные алгоритмы для задачи с параллельными приборами [7].

*Построение расписаний с директивными сроками и окнами.* Критерии, включающие директивные сроки или окна, являются одними из основных в теории расписаний, поскольку они связаны с качеством обслуживания заказчиков продукции или услуг. Директивные сроки или окна могут быть фиксированными либо гибкими (назначаемыми). В последнем случае назначение директивных сроков или окон связано с оплатой их параметров: более удобные для исполнителя параметры стоят дороже. Для задачи с гибкими директивными окнами и системы параллельных приборов разработана вполне полиномиальная приближенная схема [8]. В случае одного прибора, назначаемых директивных сроков и максиминного критерия проведена полная классификация вычислительной сложности [9]. Для задач с фиксированными директивными сроками или окнами получены следующие результаты: разработаны алгоритмы и доказана NP-трудность различных случаев задачи с параллельными приборами и длительностями обслуживания, совпадающими с размерами окон [10]; полиномиальные точные и приближенные алгоритмы для задачи с параллельными приборами, единичными длительностями обслуживания и запретами промежуточных простоев приборов [11]; вполне полиномиальная приближенная схема и псевдополиномиальный алгоритм для построения расписания работы параллельных приборов с критерием максимизации суммарной работы, проведенной до общего директивного срока [12]; приближенный алгоритм и доказательство NP-трудности в сильном смысле для задачи минимизации общей стоимости одинаковых переналадок в расписании для одного прибора при наличии директивных сроков [13].

*Задачи в условиях неопределенности.* Неопределенность в задачах исследования операций, в том числе задачах планирования и построения расписаний, может быть обусловлена неточностью измерения входных данных, необходимостью принятия решения в неполностью определенном будущем, противоречивостью предпочтений при получении решения. Разработаны подходы к решению таких задач, основанные на использовании игровых алгоритмических механизмов [14–16]. Статья [16] удостоена приза "European Journal of Operational Research (EJOR) Editors' Choice Articles 2021". Учету и минимизации неопределенного риска при принятии решений посвящены работы [17, 18]. Быстродействующие полиномиальные алгоритмы разработаны для вариантов задачи о рюкзаке с неопределенным параметром в ограничении [19] и для неопределенной задачи выбора представителей из заданного множества [20]. Установлена вычислительная сложность и разработаны точные и приближенные алгоритмы решения двухкритериальной задачи составления расписаний занятий [21]. Предложены подходы, основанные на определении радиуса устойчивости, области устойчивости и других мер неопределенности отдельных точных и приближенных решений и их наборов по отношению к изменению числовых входных данных [22–25]. Исследованию сложности задач и построению расписаний в условиях интервальной неопределенности отдельных параметров требований посвящены работы [26–39]. Подход к оценке качества решений детерминированных задач оптимизации с неполным входом предложен в статье [40].

*Диспетчеризация многопроцессорных вычислительных заданий.* Суперкомпьютеры позволяют сократить время решения задач за счет распараллеливания процесса вычислений. При этом возникает задача оптимального распределения вычислительных задач по процессорам во времени. Эффективные алгоритмы решения данной задачи предложены в [41].

*Практические обобщения задач теории расписаний.* Планирование работы реального производства является источником новых элементов задач построения оптимальных расписаний. Задачи с условиями, характерными для сборочного производства, исследованы в [42]; задачи

с дополнительными ресурсами, отличными от приборов, а также с эффектами зависимости длительности обслуживания от места в расписании – в [43]; двухстадийные задачи с отсутствием ожидания между стадиями – в [44]; задачи минимизации стоимости выполнения работ параллельными приборами – в [45]; задачи выполнения параллельных работ с использованием невозобновляемых ресурсов – в [46]; задачи с переналадками, связанными с прерыванием обслуживания, – в [47]; задачи, связанные с обеспечением безопасности движения воздушных судов, – в [48, 49]. При построении практических расписаний в качестве подзадачи нередко приходится сталкиваться с задачей коммивояжера [50, 51], а имея дело с цепями производства и поставок, возникает необходимость прогнозирования параметров заявок потребителей [52]. Разработано и используется заказчиком алгоритмическое и программное обеспечение для построения месячного расписания работы отделочной фабрики (текстильное производство) [53, 54]; работа выполнена по заказу ОАО «Моготекс» (Могилев).

*Построение расписаний при наличии сервера.* В задачах такого рода помимо обычных приборов, обслуживающих требования, имеется сервер, выполняющий либо переналадку приборов, либо загрузку требований на приборы. Поскольку есть несколько приборов, а сервер – один, он зачастую является узким местом, создающим дополнительные трудности при построении расписания работы обслуживающей системы [55–63].

*Задачи построения расписаний на смешанных графах.* Исходные данные многих задач теории расписаний могут быть представлены смешанными графами с весами, приписанными их вершинам или дугам, или без весов. Такие задачи принято называть задачами построения расписаний на смешанных графах.

Разработаны модели и алгоритмы построения оптимальных и эвристических расписаний для многостадийных систем обслуживания с фиксированными маршрутами и параллельными приборами на стадиях [64–69].

*Задачи теории расписаний как раскраски вершин смешанных графов.* Ряд задач построения расписаний для многостадийных систем может быть сведен к задаче раскраски того или иного смешанного графа, а во многих случаях такие задачи оказываются эквивалентными друг другу [70–74].

*Альтернативный подход для доказательства NP-трудности задач оптимизации* разработан и используется при анализе алгоритмической сложности задач с трудновычислимыми целевыми функциями, задач теории расписаний в том числе [33, 75].

**Проектирование производственных линий.** Проектирование производственной (сборочной, обрабатывающей) линии является одним из наиболее важных этапов ее жизненного цикла из-за высокой стоимости используемого оборудования.

*Балансировка производственных линий.* Задача балансировки производственной линии заключается в том, чтобы как можно более равномерно распределить оборудование и другие ресурсы между рабочими станциями, что минимизирует длительность такта выпускаемой продукции (максимизирует интенсивность производства). Предложены и всесторонне исследованы комбинаторные модели выбора между универсальной линией либо несколькими специализированными линиями [76]. Мотивированные реальным производством автомобильных двигателей поставлены и решены задачи балансировки сборочной линии с целью минимизации количества рабочих [77] и стоимости переналадок [78].

Проведен анализ имеющихся стратегий распределения рабочей силы на реконфигурируемых производственных линиях [79, 80]. Исследованы задачи проектирования, балансировки и планирования сборочных линий с недетерминированными (стохастическими, нечеткими или неопределенными) параметрами [81].

*Оптимизация реконфигурируемых производственных систем и процессов производства.* Разработаны комплексные математические модели, методы и программные средства для задач выбора оборудования, балансировки и планирования процесса обработки на реконфигурируемых агрегатных станках со стационарным приспособлением, приспособлением на передвижном или поворотном столе [82–85] и поточных линиях из таких станков [86–91]. Рассмотрены три схемы выполнения групповой обработки заданной номенклатуры деталей: параллельная групповая обработка всей номенклатуры деталей [84, 85]; последовательная обработка деталей

партиями из деталей одного наименования с реконфигурацией и переналадкой оборудования, необходимого для обработки партии деталей следующего наименования [82, 85, 88, 90, 91]; последовательно-параллельная групповая обработка, когда вся номенклатура обрабатываемых деталей разбивается на подгруппы (партии), обрабатываемые по последовательной схеме, а все детали одной подгруппы обрабатываются по параллельной схеме [83, 85]. В качестве целевой функции использовались затраты на выпуск требуемого объема продукции, включая капитальные и эксплуатационные затраты на проектируемую производственную систему. Разработаны специальные методы поиска оптимальных решений, основанные на комбинации декомпозиционных приемов с методами динамического, нелинейного и смешанного линейного программирования, методами решения экстремальных задач на графах, а также метаэвристическими методами.

Предложены методы минимизации массы (габарита) агрегатного станка с многопозиционным поворотным столом, предназначенного для массового выпуска одной либо группы деталей за счет их оптимального размещения в секторе рабочей позиции стола [92, 93]. В качестве метода поиска решения использовался метаэвристический алгоритм «рой частиц».

*Планирование процесса производства на многопозиционных линиях.* При автоматизированном планировании процессов производства продукции, проектировании и управлении многопозиционными производственными системами часто возникают задачи, связанные с выбором режимов выполнения последовательности множеств взаимосвязанных операций. Разработаны и исследованы модели математического программирования задачи выбора режимов циклического выполнения множеств взаимосвязанных операций последовательно-параллельной структуры на многопозиционной линии. Задачи сведены к выбору интенсивностей выполнения операций каждого из множеств последовательности, составляющей цикл. Выбор осуществлялся с целью максимизации прибыли либо минимизации затрат на выпуск партии изделий и логистику при обеспечении требуемой производительности линии при заданной ее конфигурации [94–98] либо с одновременным выбором варианта оборудования линии [99, 100]. Для решения задач разработаны декомпозиционные методы [95–98, 100], алгоритмы и экспериментальное программное обеспечение [94, 99]. Созданы также модель и декомпозиционный метод оптимизации динамически изменяемых режимов групповой обработки деталей резанием на многопозиционном многоинструментальном оборудовании в зависимости от типа детали [101].

**Оптимизация инфраструктуры и функционирования электротранспорта.** Изменение климата и рост онкологических заболеваний являются основными причинами замены традиционного общественного транспорта электрическим. Наиболее широко в мировой практике применялись системы городского электротранспорта, основанные на технологиях быстрой зарядки электробусов с аккумуляторами малой емкости на остановках маршрутов либо медленной зарядки в депо для электробусов с аккумуляторами большой емкости. Для задач оптимального выбора гетерогенного парка электробусов и его зарядной инфраструктуры с технологией быстрой зарядки для заданного набора городских маршрутов разработана серия математических моделей оптимизационных задач, точные и приближенные методы их решения [102–105]. Для задачи выбора состава разнотипных станций медленной зарядки в депо, вариантов аккумуляторов для электробусов нескольких типов, обслуживающих набор городских маршрутов, а также циклического суточного расписания их зарядки в депо предложена двухуровневая декомпозиционная схема решения из взаимосвязанных подзадач в форме смешанного целочисленного линейного программирования [106]. На базе полученных результатов в рамках европейского проекта создана информационная система поддержки принятия решений при планировании перехода городского общественного транспорта на электробусы [102–106]. Разработана также эффективная модель смешанного целочисленного линейного программирования для оптимизации конфигурации зарядной инфраструктуры в составе контактной сети маршрутов и стационарных зарядных станций для автономных троллейбусов, оборудованных батареями повышенной емкости [107].



Участники Восьмой Международной научной конференции «Танаевские чтения» (2018 г.)



Участники Минского семинара (2019 г.) по международному исследовательскому проекту PLATON (от ОИПИ НАН Беларуси – М. Я. Ковалев, Я. М. Шафранский, Н. Н. Гущинский, Б. М. Розин)

**Логистика и цены в Интернете.** *Транспортная и складская логистика.* Модели и методы исследования операций являются основными инструментами решения задач логистики. В области контейнерной логистики разработаны математические модели, алгоритмы и экспериментальное программное обеспечение решения задач складирования контейнеров [108], а также их инспекции и ремонта [109, 110]. Исследована сложность и разработаны приближенные алгоритмы решения задач, связанных с управлением работой подъемных кранов, перемещающих контейнеры на железнодорожном терминале [111, 112].

*Оптимальная маршрутизация.* В задачах маршрутизации необходимо найти маршруты (пути) объектов между заданными вершинами транспортной сети с целью минимизации либо максимизации некоторых функций, зависящих от параметров сегментов (дуг) этой сети. Установлена вычислительная сложность и разработаны эффективные алгоритмы решения задач маршрутизации вертолетов с целью минимизации суммарного риска [113], поиска маршрутов с заданными и запрещенными значениями длины [114], двухкритериальной задачи отыскания пути [115] и отыскания лучшего с точки зрения нескольких критериев маршрута пешехода [116].

*Динамическое ценообразование.* Развитие Интернета и информационных технологий привело к созданию виртуальных систем бронирования и оплаты за различные услуги, например за билеты на самолет или театральное представление. Разработаны математическая модель, алгоритмы и экспериментальная информационная система гибкого ценообразования гостиницы, которая позволяет определять динамические (зависящие от времени) цены на номера как функции от неопределенного спроса и ресурсных ограничений с целью максимизации доходов [117–119]. Система прошла успешное тестирование на данных одной из гостиниц Минска.

*Оптимизация покупок в Интернете.* В настоящее время все больше людей отдают предпочтение покупкам в Интернете. Предложены математическая модель и алгоритмы решения задачи минимизации стоимости покупки набора товаров в разных интернет-магазинах при условии различных цен товара и его доставки, а также скидок от общей стоимости [120].

**Защиты диссертаций.** При выполнении исследований были защищены следующие диссертации:

Бондоловский А. М. – диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук «Модели управления доходами гостиничного бизнеса» по специальности 08.00.13 – «Математические и инструментальные методы экономики» (23.11.2016), научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор М. Я. Ковалев.

Голами О. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Алгоритмы обслуживания требований с различными маршрутами последовательными и параллельными приборами и их применение для составления расписаний поездов» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (18.03.2014), научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Ю. Н. Сотсков.

Хасани К. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Математические модели и эвристические алгоритмы для обслуживающих систем с параллельными приборами и сервером» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (22.04.2014), научный руководитель – кандидат физико-математических наук С. А. Кравченко.

**Благодарность.** Работа Ю. Н. Сотскова выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф23РНФ-017).

### Публикации

1. Kovalyov, M. Y. Scientific school of academician V. S. Tanaev: Results on the scheduling theory / M. Y. Kovalyov, Y. N. Sotсков, Y. M. Shafransky // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1241–1256.

2. Aloulou, M. A. A bibliography of non-deterministic lot-sizing models / M. A. Aloulou, A. Dolgui, M. Y. Kovalyov // International Journal of Production Research. – 2014. – Vol. 52, no. 8. – P. 2293–2310.

3. Kovalyov, M. Y. An  $O(n \log n)$  algorithm for a single-item capacitated lot-sizing problem with linear costs and no backlogging / M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3758–3761.
4. Kovalyov, M. Y. A batching machine model for lot scheduling on a single machine / M. Y. Kovalyov // *Foundations of Computing and Decision Sciences*. – 2018. – Vol. 43, no. 1. – P. 37–40.
5. Kovalyov, M. Y. Two-agent scheduling with agent specific batches on an unbounded serial batching machine / M. Y. Kovalyov, A. Oulamara, A. Soukhal // *Journal of Scheduling*. – 2014. – Vol. 18. – P. 423–434.
6. Kovalyov, M. Y. Two-agent scheduling with deteriorating jobs on a singleparallel-batching machine: refining computational complexity / M. Y. Kovalyov, D. Sesok // *Journal of Scheduling*. – 2019. – Vol. 22, no. 5. – P. 603–606.
7. Ereemeev, A. V. Lot-size scheduling of a single product on unrelated parallel machines / A. V. Ereemeev, M. Y. Kovalyov, P. M. Kuznetsov // *Optimization Letters*. – 2020. – Vol. 14, no. 3. – P. 557–568.
8. Janiak, A. Due window assignment and scheduling on parallel machines: a FPTAS for a bottleneck criterion / A. Janiak, W. Janiak, M. Y. Kovalyov // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. – 2014. – Vol. 62, no. 4. – P. 805–808.
9. Single machine scheduling with assignable due dates to minimize maximum and total late work / J.-E. Justkowiak, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 308, no. 1. – P. 76–83.
10. Fixed interval scheduling with third-party machines / I. Fridman, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Ryzhikov // *Networks*. – 2021. – Vol. 77. – P. 361–371.
11. No-idle parallel-machine scheduling of unit-time jobs with a small number of distinct release dates and deadlines / N. Brauner, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot, H. Toussaint // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 132. – Art. 105315.
12. Alternative algorithms for identical machines scheduling to maximize total early work with a common due date / X. Chen, X. Shen, M. Y. Kovalyov [et al.] // *Computers and Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 171. – Art. 108386.
13. Kress, D. Single-machine batch scheduling to minimize the total setup cost in the presence of deadlines / D. Kress, M. S. Barketau, E. Pesch // *Journal of Scheduling*. – 2018. – Vol. 21. – P. 595–606.
14. Kovalyov, M. Y. A game mechanism for single machine sequencing with zero risk / M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *OMEGA*. – 2014. – Vol. 44. – P. 104–110.
15. A parallel machine schedule updating game with compensations and clients averse to uncertain loss / M. Y. Kovalyov, D. Kress, S. Meiswinkel, E. Pesch // *Computers and Operations Research*. – 2019. – Vol. 103. – P. 148–157.
16. Kovalyov, M. Y. Provision-after-wait with preferences ordered by difference: Tighter complexity and better approximation / M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Quilliot // *European Journal of Operational Research*. – 2021. – Vol. 289. – P. 1008–1012.
17. Gurevsky, E. Min-max controllable risk problems/ E. Gurevsky, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *4OR*. – 2021. – Vol. 19. – P. 93–101.
18. Min-sum controllable risk problems with concave risk functions of the same value range / E. Gurevsky, D. Kopelevich, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *Networks*. – 2022. – Vol. 79. – P. 105–116.
19. Halman, N. Max–max, max–min, min–max and min–min knapsack problems with a parametric constraint / N. Halman, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot // *4OR*. – 2023. – Vol. 21. – P. 235–246.
20. Brauner, N. A single representative min-max-min robust selection problem with alternatives and budgeted uncertainty / N. Brauner, E. Gurevsky, M. Y. Kovalyov // *Discrete Applied Mathematics*. – 2024. – Vol. 349. – P. 106–112.
21. Bi-criteria sequencing of courses and formation of classes for a bottleneck classroom // O. G. Czibula, H. Gu, F.-J. Hwang [et al.] // *Computers and Operations Research*. – 2016. – Vol. 65. – P. 53–63.
22. Matsveichuk, N. M. A stability approach to two-stage scheduling problems with uncertain processing times / N. M. Matsveichuk, Yu. N. Sotskov // *Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data* / ed.: Yu. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – P. 377–407.
23. Sotskov, Yu. N. A stability approach in sequencing and scheduling / Yu. N. Sotskov // *Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data* / ed.: Yu. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – P. 283–344.
24. Sotskov, Y. N. Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data / Y. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – 433 p.

25. Sotskov, Yu. N. Stability of a schedule minimising the makespan for processing jobs on identical machines / Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2023. – Vol. 61, no. 19. – P. 6434–6450.
26. Sotskov, Yu. N. Stability polyhedra of optimal permutation of jobs servicing / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1267–1282.
27. Lawler's minmax cost algorithm: optimality conditions and uncertainty / N. Brauner, G. Finke, Y. Shafransky, D. Sledneu // *Journal of Scheduling*. – 2016. – Vol. 19. – P. 401–408.
28. Brauner, N. Lawler's minmax cost problem under uncertainty / N. Brauner, G. Finke, Y. Shafransky // *Journal of Combinatorial Optimization*. – 2017. – Vol. 34 (1). – P. 31–46.
29. The optimality box in uncertain data for minimizing the sum of the weighted job completion times / T.-C. Lai, Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56, no. 19. – P. 6336–6362.
30. Sotskov, Yu. N. Single machine scheduling problem with interval processing times and total completion time objective / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Algorithms*. – 2018. – Vol. 11. – P. 21–40.
31. Sotskov, Yu. N. The optimality region for a single-machine scheduling problem with bounded durations of the jobs and the total completion time objective / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Mathematics*. – 2019. – Vol. 7, no. 382. – P. 1–21.
32. Сотсков, Ю. Н. Алгоритмы планирования рабочего времени в условиях интервальной неопределенности / Ю. Н. Сотсков, Н. Г. Егорова, Н. М. Матвейчук // *Информатика*. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 86–102.
33. Shafransky, Y. On the complexity of constructing a minmax regret solution for the two-machine flow shop problem under the interval uncertainty / Y. Shafransky, V. Shinkarevich // *Journal of Scheduling*. – 2020. – Vol. 23. – P. 745–749.
34. Fridman, I. Minimizing maximum cost for a single machine under uncertainty of processing times / I. Fridman, E. Pesch, Y. Shafransky // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – Vol. 286(2). – P. 444–457.
35. Sotskov, Yu. N. Schedule execution for two-machine job-shop to minimize makespan with uncertain processing times / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk, V. D. Hatsura // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, no. 1314. – P. 1–51.
36. Sotskov, Yu. N. Optimality region for job permutation in single-machine scheduling with uncertain processing times / Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 819–842.
37. Sotskov, Yu. N. Two-machine job-shop scheduling problem to minimize the makespan with uncertain job durations / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk, V. D. Hatsura // *Algorithms*. – 2020. – Vol. 13, no. 4. – P. 1–45.
38. Sotskov, Yu. N. Optimal selection and scheduling of jobs with uncertain durations for two employees / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. – 2024. – № 2. – С. 65–80.
39. Матвейчук, Н. М. Модели и методы календарного планирования и контроля выплавки и непрерывной разливки стали в условиях неопределенности данных / Н. М. Матвейчук, Ю. Н. Сотсков // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2024. – № 2. – С. 176–191.
40. Barketau, M. S. Evaluation of solution of discrete optimization problem with incomplete input / M. S. Barketau // *Optimization Letters*. – 2021. – Vol. 15. – P. 431–440.
41. Scheduling arbitrary number of malleable tasks on multiprocessor systems / M. S. Barketau, M. Y. Kovalyov, J. Weglarz, M. Machowiak // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. – 2014. – Vol. 62, no. 2. – P. 255–261.
42. Hwang, F. J. Scheduling for fabrication and assembly in a two-machine flowshop with a fixed job sequence / F. J. Hwang, M. Y. Kovalyov, B. M. T. Lin // *Annals of Operations Research*. – 2014. – Vol. 217, no. 1. – P. 263–279.
43. Janiak, A. On a single machine-scheduling problem with separated position and resource effects / A. Janiak, M. Y. Kovalyov, M. Lichtenstein // *Optimization*. – 2015. – Vol. 64, no. 4. – P. 909–911.
44. Semi-V-shape property for two-machine no-wait proportionate flow shop problem with TADC criterion / S. Kovalev, M. Y. Kovalyov, G. Mosheiov, E. Gerstl // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, no. 2. – P. 560–566.
45. Kononov, A. V. Minimizing machine assignment costs over  $\Delta$ -approximate solutions of the scheduling problem  $P||C_{\max}$  / A. V. Kononov, M. Y. Kovalyov, B. M. T. Lin // *Theoretical Computer Science*. – 2019. – Vol. 793. – P. 70–78.
46. Three parallel task assignment problems with shared resources / A. Diabat, A. Dolgui, W. Janiak, M. Y. Kovalyov // *IIE Transactions*. – 2020. – Vol. 52, no. 4. – P. 478–485.

47. A note on scheduling identical parallel machines with preemptions and setup times / M. Boudhar, A. Dolgui, A. Haned [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2024. – Vol. 62. – Art. 2362414. – DOI: 10.1080/00207543.2024.2362414.
48. Рубанов, И. В. Модель построения расписания непрерывного движения объектов по сети пересекающихся маршрутов / И. В. Рубанов, М. С. Баркетов, М. Я. Ковалев // *Информатика*. – 2018. – № 1(15). – С. 21–33.
49. Рубанов, И. В. Методы поиска нескольких решений системы разностных и интервальных ограничений / И. В. Рубанов, М. С. Баркетов, М. Я. Ковалев // *Информатика*. – 2016. – № 3(51). – С. 67–79.
50. Barketau, M. S. An approximation algorithm for a special case of the asymmetric travelling salesman problem / M. S. Barketau, E. Pesch // *International Journal of Production Research*. – 2016. – Vol. 54, iss. 14. – P. 4205–4212.
51. Баркетов, М. С. Полиномиальный рандомизированный алгоритм для задачи «Асимметричный коммивояжер» / М. С. Баркетов // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2022. – Т. 66, № 5. – С. 489–494.
52. Баркетов, М. С. Определение параметров заявок клиентов в цепи производства и поставок / М. С. Баркетов // *Экономика, моделирование, прогнозирование : сб. тр. / Науч.-исслед. эконом. ин-т М-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2015. – С. 105–112.
53. Шафранский, Я. М. Построение расписания работы отделочной фабрики / Я. М. Шафранский, В. И. Романов // *Танаевские чтения : докл. Девятой Междунар. науч. конф., Минск, 30 марта 2021 г.* – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2021. – С. 137–141.
54. Шафранский, Я. М. Особенности построения расписания работы отделочной фабрики (на примере ОАО «Моготекс») / Я. М. Шафранский, В. И. Романов // *Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере : докл. XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 сент. 2023 г.* – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 169–172.
55. Hasani, K. Minimizing interference for scheduling two parallel machines with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no 24. – P. 7148–7158.
56. Hasani, K. Block Models for Scheduling Jobs on Two Parallel Machines with a Single Server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Computers & Operations Research*. – Vol. 41. – 2014. – P. 94–97.
57. Hasani, K. Simulated Annealing and Genetic Algorithms for the Two-Machine Scheduling Problem with a Single Server / K. Hasani, S.A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3778–3792.
58. Hasani, K. Minimizing total weighted completion time approximately for the parallel machine problem with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Information Processing Letters*. – 2014. – Vol. 114. – P. 500–503.
59. Hasani, K. A hybridization of harmony search and simulated annealing to minimize mean flow time for the two-machine scheduling problem with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Operational Research Nepal (IJORN)*. – 2014. – Vol. 3, no. 1. – P. 9–26.
60. Вернер, Ф. Минимизация суммарного времени обслуживания для системы с двумя приборами и одним / Ф. Вернер, С. А. Кравченко, К. Хасани // *Информатика*. – 2014. – Т. 41, № 1. – P. 15–24.
61. Hasani, K. Minimizing the makespan for the two-machine scheduling problem with a single server: Two algorithms for very large instances / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Engineering Optimization*. – 2016. – Vol. 48, no. 1. – P. 173–183.
62. Cheng, T. C. E. Preemptive parallel-machine scheduling with a common server to minimize makespan / T. C. E. Cheng, S. A. Kravchenko, B. M. T. Lin // *Naval Research Logistics*. – 2017. – Vol. 64, no. 5. – P. 388–398.
63. Cheng, T. C. E. Server scheduling on parallel dedicated machines with fixed job sequences / T. C. E. Cheng, S. A. Kravchenko, B. M. T. Lin // *Naval Research Logistics*. – 2019. – Vol. 66, no. 4. – P. 321–332.
64. Gholami, O. A neural network algorithm for servicing jobs with sequential and parallel machines / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1203–1220.
65. Gholami, O. Solving parallel machines job-shop scheduling problems by an adaptive algorithm / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3888–3904.
66. Gholami, O. A fast heuristic algorithm for solving parallel-machine job-shop scheduling problems / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 70, no. 1–4. – P. 531–546.

67. Gholami, O. Scheduling algorithm with controllable train speeds and departure times to decrease the total train tardiness / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. – 2014. – Vol. 5. – P. 281–294.
68. Gholami, O. Mixed graph model and algorithms for parallel-machine job-shop scheduling problems / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55, no. 6. – P. 1549–1564.
69. Gholami, O. A genetic algorithm for hybrid job-shop scheduling problems with minimizing the makespan or mean flow time / O. Gholami, Yu. N. Sotskov, F. Werner // *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. – 2018. – Vol. 17, no. 4. – P. 461–486.
70. Sotskov, Yu. N. Mixed graph colorings: A historical review / Yu. N. Sotskov // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, no. 385. – P. 1–24.
71. Sotskov, Y. N. Mixed graph coloring as scheduling multi-processor tasks with equal processing times / Y. N. Sotskov // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. – 2021. – № 2. – С. 67–81.
72. Sotskov, Yu. N. Scheduling multiprocessor tasks with equal processing times as a mixed graph coloring problem / Yu. N. Sotskov, E. I. Mihova // *Algorithms*. – 2021. – Vol. 14, no. 246. – P. 1–22.
73. Sotskov, Yu. N. A makespan-optimal schedule for processing jobs with possible operation preemptions as an optimal mixed graph coloring. / Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2023. – Vol. 84, no. 2. – P. 167–186.
74. Mihova, E. I. Mixed graph coloring as scheduling a partially ordered set of interruptible multi-processor tasks with integer due dates / E. I. Mihova, Yu. N. Sotskov // *Algorithms*. – 2024. – Vol. 17, no. 299. – P. 1–33.
75. Cheng, T. C. E. An alternative approach for proving the NP-hardness of optimization problems / T. C. E. Cheng, Y. Shafransky, C. T. Ng // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 248. – P. 52–58.
76. Profitability of a multi-model manufacturing line versus multiple dedicated lines / A. Dolgui, S. E. Hashemi-Petroodi, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – Vol. 236. – Art. 108113.
77. Minimizing the number of workers in a paced mixed-model assembly line / X. Delorme, A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *European Journal of Operational Research*. – 2019. – Vol. 272, no. 1. – P. 188–194.
78. Minimizing setup costs in a transfer line design problem with sequential operation processing / A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov [et al.] // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – Vol. 151. – P. 186–194.
79. Workforce reconfiguration strategies in manufacturing systems: a state of the art / S. E. Hashemi-Petroodi, A. Dolgui, S. Kovalev [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2021. – Vol. 59, no. 22. – P. 6721–6744.
80. Optimal workforce assignment to operations of a paced assembly line / A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 264. – P. 200–211.
81. Sotskov, Y. N. Assembly and production line designing, balancing and scheduling with inaccurate data: a survey and perspectives / Y. N. Sotskov // *Algorithms*. – 2023. – Vol. 16, no. 100. – P. 1–43.
82. Guschinsky, N. N. On optimization of processes for sequential batch machining / N. N. Guschinsky, O. Battaia, A. Dolgui // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2016. – № 4. – С. 106–115.
83. Battaia, O. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55, no. 5. – P. 1368–1385.
84. Battaia, O. Integrated process planning and system configuration for mixed-model machining on rotary transfer machine / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Computer Integrated manufacturing*. – 2017. – Vol. 30, no. 9. – P. 910–925.
85. Battaia, O. MIP-based heuristics for combinatorial design of reconfigurable rotary transfer machines for production of multiple parts / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Economics*. – 2023. – Vol. 262(1). – Art. 108904. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108904.
86. Combinatorial techniques to optimally customize an automated production line with rotary transfer and turrets // O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, G. Levin // *IIE Transactions*. – 2014. – Vol. 46, no. 9. – P. 867–879.
87. Integrated configurable equipment selection and line balancing for mass production with serial–parallel machining systems // O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, G. Levin // *Engineering Optimization*. – 2014. – Vol. 46, no. 10. – P. 1369–1388.

88. Variety-oriented design of rotary production systems / O. Battaia, D. Brissaud, A. Dolgui, N. Guschinsky // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 64, no. 1. – P. 411–414.
89. Гущинский, Н. Н. Модели и методы синтеза структуры технологического процесса обработки деталей на поточной линии из станков со стационарным приспособлением / Н. Н. Гущинский, О. Баттаиа, А. Долгий // *Информатика*. – 2015. – № 3. – С. 72–80.
90. Battaia, O. Optimal cost design of flow lines with reconfigurable machines for batch production / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58, no. 10. – P. 2937–2952.
91. Battaia, O. Design of reconfigurable machining lines: A novel comprehensive / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 70, no. 1. – P. 393–398.
92. Гущинский, Н. Н. Оптимизация размещения детали на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н. Н. Гущинский, В. Е. Зданович, Б. М. Розин // *Информатика*. – 2015. – № 4. – С. 57–72.
93. Гущинский, Н. Н. Оптимизация размещения группы деталей на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н. Н. Гущинский, Б. М. Розин // *Информатика*. – 2017. – № 1. – С. 53–69.
94. Cost optimization for series-parallel execution of a collection of intersecting operation sets / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin, I. Kasabutski // *Engineering Optimization*. – 2016. – Vol. 48, no. 5. – P. 756–771.
95. Левин, Г. М. Линейная аппроксимация задачи оптимизации интенсивностей последовательно-параллельного выполнения пересекающихся множеств операций / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Информатика*. – 2014. – № 3. – С. 44–51.
96. Левин, Г. М. Оптимизация агрегирования и режимов последовательно-параллельного выполнения пересекающихся множеств операций / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Информатика*. – 2016. – № 1. – С. 5–13.
97. Левин, Г. М. Оптимизация выпуска и интенсивностей обработки группы деталей при нестационарном спросе / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2016. – № 3. – С. 102–109.
98. Левин, Г. М. Оптимизация выпуска комплектов изделий и интенсивностей их изготовления в условиях случайного спроса / Г. М. Левин, Б. М. Розин // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2017. – № 2. – С. 110–118.
99. Dolgui, A. Optimisation of the aggregation and execution rates for intersecting operation sets: an example of machining process design / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58, no 9. – P. 2658–2676.
100. Dolgui, A. Structural-Parametric Optimization of a Complex of Intersecting Sets of Operations under Nonstationary Demand / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 791–802.
101. Левин, Г. М. Оптимизация динамически изменяемых режимов групповой обработки резанием на многопозиционном многоинструментальном оборудовании / Г. М. Левин, Б. М. Розин, О. И. Стеблинская // *Информатика*. – 2014. – № 4. – С. 90–99.
102. Designing fast-charge urban electric bus services: An Integer Linear Programming model / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, M. Y. Kovalev // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2023. – Vol. 171. – Art. 103065. – DOI: 10.1016/j.tre.2023.103065.
103. MILP model for fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus services / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, B. Rozin // *Computers and Industrial Engineering*. – 2023. – Vol. 182. – Art. 109336. – DOI: 10.1016/j.cie.2023.109336.
104. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, B. Rozin, N. Brauner // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 135. – Art. 105449. – DOI: 10.1016/j.cor.2021.105449.
105. Kovalyov, M. Y. Mathematical Model and Random Search Algorithm for the Optimal Planning Problem of Replacing Traditional Public Transport with Electric / M. Y. Kovalyov, B. M. Rozin, N. N. Guschinsky // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 803–818.
106. Cost minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, B. Rozin // *Transportation Research Part E*. – 2023. – Vol. 180. – Art. 103337. – DOI: 10.1016/j.tre.2023.103337.
107. Ковалев, М. Я. Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов / М. Я. Ковалев, Б. М. Розин, И. А. Шатерник // *Информатика*. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 79–95.
108. Kovalyov, M. Y. A note on scheduling container storage operations of two non-passing stacking cranes / M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Ryzhikov // *Networks*. – 2018. – Vol. 71, no. 3. – P. 271–280.

109. Planning container inspection and repair: A case study / M. Y. Kovalyov, K. A. Kuzmicz, M. N. Lukashevich, E. Pesch // *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 164. – Art. 106555.
110. Kovalyov, M. Y. Cost minimizing planning of container inspection and repair in multiple facilities / M. Y. Kovalyov, M. N. Lukashevich, E. Pesch // *OR Spectrum*. – 2023. – Vol. 45, no. 1. – P. 181–204.
111. Barketau, M. S. Minimizing maximum weight of subsets of a maximum matching in a bipartite graph / M. S. Barketau, E. Pesch, Y. M. Shafransky // *Discrete Applied Mathematics*. – 2015. – Vol. 196. – P. 4–19.
112. Barketau, M. S. Scheduling dedicated jobs with variative processing times / M. S. Barketau, E. Pesch, Y. M. Shafransky // *Journal of Combinatorial Optimization*. – 2016. – Vol. 31. – P. 774–785.
113. Gribkovskaia, I. Minimizing takeoff and landing risk in helicopter pickup and delivery operations / I. Gribkovskaia, O. Halskau, M. Y. Kovalyov // *Omega*. – 2015. – Vol. 55. – P. 73–80.
114. Dolgui, A. Simple paths with exact and forbidden lengths / A. Dolgui, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot // *Naval Research Logistics*. – 2018. – Vol. 65, no. 1. – P. 78–85.
115. Bi-criteria path problem with minimum length and maximum survival probability / N. Halman, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot [et al.] // *OR Spectrum*. – 2019. – Vol. 41, no. 2. – P. 469–489.
116. Naumann, S. Pedestrian route search based on OpenStreet Map / S. Naumann, M. Y. Kovalyov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – Vol. 505. – P. 87–96.
117. A graph-theoretic approach to interval scheduling on dedicated unrelated parallel machines / C. T. Ng, T. C. E. Cheng, A. Bandalouski [et al.] // *Journal of the Operational Research Society*. – 2014. – Vol. 65, no. 14. – P. 1571–1579.
118. An overview of revenue management and dynamic pricing models in hotel business / A. M. Bandalouski, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, S. A. Tarim // *RAIRO – Operations Research*. – 2018. – Vol. 52, no. 1. – P. 119–141.
119. Dynamic pricing with demand disaggregation for hotel revenue management / A. M. Bandalouski, N. G. Egorova, M. Y. Kovalyov [et al.] // *Journal of Heuristics*. – 2021. – Vol. 27. – P. 869–885.
120. Internet shopping with price sensitive discounts / J. Blazewicz, P. Bouvry, M. Y. Kovalyov, J. Musial // *4OR – Quarterly Journal of Operational Research*. – 2014. – Vol. 12. – P. 35–48.

УДК 004.7.056;002:004.056;004:004.7;004.9;004722

## Лаборатория проблем защиты информации: основные результаты деятельности

**Дмитриев Владимир Александрович**

*заведующий лабораторией проблем защиты информации*

*E-mail: vladdmitr@newman.bas-net.by*

**Мартинovich Татьяна Сергеевна**

*научный сотрудник лаборатории проблем защиты информации*

Лаборатория проблем защиты информации создана в 1996 г. Первым ее руководителем был В. В. Анищенко, с 2016 г. лабораторию возглавляет В. А. Дмитриев. Основными направлениями деятельности и областями научных исследований лаборатории являются:

- разработка теоретических основ методологии обеспечения защиты информации в информационных системах;
- разработка моделей, методов и средств для обоснования требований к информационным системам по информационной безопасности;
- разработка и формирование показателей и требований для национальных стандартов по оценке защищенности;
- разработка методик испытаний защищенных информационных систем;
- аттестация систем защиты информации в реальных условиях эксплуатации информационных систем;
- разработка методов обнаружения атак в информационно-телекоммуникационных системах.



Коллектив лаборатории, 2015 г. Первый ряд (слева направо): Е. П. Максимович, Т. В. Грузд, В. К. Фисенко, В. Б. Алюшкевич, Т. С. Мартинович, А. И. Грубей;  
второй ряд (слева направо): В. Ю. Скобцов, Н. И. Трухнова, В. Г. Медведева, М. П. Тур,  
В. А. Дмитриев, С. А. Соломянко; третий ряд (слева направо): Д. С. Ким, Е. А. Пикин

В рамках шести программ Союзного государства, а также государственных программах научных исследований сотрудники лаборатории успешно выполнили работы по заданиям:

1. «СКИФ-Грид» (2007–2010 гг.) – разработка архитектурных принципов построения суперкомпьютеров СКИФ и грид-сетей, теоретических и алгоритмических основ обеспечения их

безопасности, надежности и отказоустойчивости; обоснование принципов построения и создание медицинских диагностических и телемедицинских систем на базе кластерных конфигураций семейства СКИФ.

2. «Космос-НТ» (2008–2011 гг.), задания 1.1, 1.2 «Разработать и реализовать систему контроля надежности и оперативного аудита наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли» – разработка автоматизированной системы контроля надежности наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ), представляющей собой комплекс программ системы автоматизированного контроля эксплуатационных показателей надежности БКСДЗ; автоматизированной системы оперативного аудита корпоративной сети БКСДЗ, которая обеспечивает системное объединение встроенных в операционные системы средств аудита информационной безопасности вычислительных средств, используемых в составе корпоративной сети БКСДЗ, и способствует обнаружению нарушения дисциплины обмена информацией, хищения информации, потери ее целостности, конфиденциальности и доступности.

3. «Совершенствование системы защиты общих информационных ресурсов Беларуси и России» (2006–2010 гг.), задание «Разработка методических и нормативных документов анализа и оценки безопасности объектов информационных технологий на этапах проектирования и модернизации информационных систем» – разработка экспериментального образца программного комплекса системы автоматизированного анализа и оценки безопасности объектов информационных технологий на этапах проектирования и модернизации, который представляет собой программную реализацию в автоматизированном режиме инструментальных средств для оценки качества профилей защиты и заданий по безопасности, оценки защищенности корпоративной информационной системы по степени соответствия информационной системы заданию по безопасности.

4. «Стандартизация-СГ» (2011–2014 гг.) – разработка стандарта СТБ ЕССS-Q-ST-30С-2014 «Космическая техника. Обеспечение качества продукции. Обеспечение надежности» (науч. руководитель – Л. И. Кульбак, отв.исполнитель – А. И. Трубей). Стандарт определяет программу обеспечения надежности и требования к надежности для космических систем, а также требования к надежности для функций, реализованных в программном обеспечении, и требования к осуществлению взаимодействия между аппаратными и программными средствами.

5. «Мониторинг-СГ» (2013–2014 гг.), задания:

1) «Разработать опытный образец программного комплекса системы мониторинга состояния информационной безопасности процессов интеграции и использования космической информации дистанционного зондирования Земли, обеспечивающий мониторинг аппаратных средств, парольной защиты, попыток несанкционированного доступа к циркулирующей информации (ПК СМСИБ)» (отв. исполнитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. К. Фисенко, А. Б. Степанян, А. В. Афанасьев, Е. П. Максимович). В результате выполнения задания был создан опытный образец ПК СМСИБ, реализующий следующие требования к функциональным характеристикам:

– автоматический анализ и обнаружение компьютерных атак на основе динамического анализа сетевого трафика стека протоколов TCP/IP для протоколов всех уровней модели взаимодействия открытых систем, начиная с сетевого и заканчивая прикладным;

– отображение обнаруженных атак в веб-интерфейсе консоли управления опытного образца ПК СМСИБ и уведомление администратора безопасности об обнаруженных атаках;

– автоматическое сохранение истории обнаруженных атак для последующего анализа.

Для обнаружения атак использованы сигнатурные методы.

ПК СМСИБ отслеживает события информационной безопасности, фиксируемые: операционной системой автоматизированных рабочих мест пользователей и серверов; системой управления базой данных; межсетевым экраном; коммутационным оборудованием; системой обнаружения атак; антивирусным программным обеспечением, установленным на автоматизированных рабочих местах пользователей и серверах; прикладным программным обеспечением.

2) «Разработать комплекс методик и программных средств для оценки надежности бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов при ее проектировании, наземных испытаниях и эксплуатации» (отв. исполнитель – В. Ю. Скобцов, исполнители – Д. А. Вяченин, Л. И. Кульбак, Т. С. Мартинович, Д. С. Ким, А. В. Доморацкий, Е. Д. Николаеня). В результате выполнения задания:

– разработаны метод и программный модуль разведочного анализа обучающих телеметрических данных бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов (БА МКА);

– разработан экспериментальный образец комплекса методик и программных средств оценки надежности (КМПС ОН БА МКА) в составе:

методики и программного модуля интервальной оценки показателей надежности БА МКА;

программного модуля визуализации структурных схем надежности;

методики и программного модуля интеллектуального анализа данных о состоянии БА МКА;

методики и программного модуля логико-вероятностной оценки надежности БА МКА;

программного модуля визуализации результатов интеллектуального анализа данных;

программного модуля импорта-экспорта телеметрических данных о состоянии БА МКА;

программного модуля разведочного анализа обучающих телеметрических данных (как submodule программного модуля интеллектуального анализа данных о состоянии БА МКА);

методики моделирования тепловых и механических воздействий на функциональные элементы БА МКА;

– осуществлена интеграция веб-версии экспериментального образца КМПС ОН БА МКА в программно-моделирующий комплекс многокритериального оценивания, анализа и прогнозирования значений показателей надежности и живучести БА МКА с учетом факторов космического пространства, а также управления их реконфигурацией на различных этапах жизненного цикла программно-моделирующего комплекса, разработанного в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН.

6. «СКИФ-НЕДРА» (2015–2018 гг.), задание «Разработать методологическое, программное, информационное, нормативно-правовое обеспечение информационной безопасности высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий обработки геолого-геофизических данных и систему управления информационной безопасностью» (отв. исполнитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. К. Фисенко, А. Б. Степанян, Д. С. Ким, Е. П. Максимович, Т. С. Мартинович, Н. А. Чуприс). Проведены работы по проектированию, созданию и аттестации системы защиты информации информационной системы обработки геолого-геофизических данных на базе высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий в соответствии с требованиями Приказа Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 30.08.2013 № 62.

*Межгосударственная программа инновационного сотрудничества государств – участников СНГ на период до 2020 года (2015–2020 гг.)* – выполнены ОКР «Развитие инфраструктуры суперкомпьютерных центров в интересах инновационного развития государств – участников СНГ» (отв. исполнитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. К. Фисенко, А. Б. Степанян, Д. С. Ким, Е. П. Максимович, Т. С. Мартинович, Н. А. Чуприс); работы по проектированию, созданию и аттестации системы защиты информации грид-системы в соответствии с требованиями Приказа Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 20.02.2020 № 66.

*Государственная комплексная программа научных исследований «Инфотех» (2006–2010 гг.)*, задания:

1) «Разработка экспериментального программного комплекса систем поддержки принятия решений для защиты информации от сетевых атак в реальном масштабе времени» – разработан экспериментальный программный комплекс системы поддержки принятия решений для защиты информации от сетевых атак в реальном масштабе времени.

2) «Разработка экспертной автоматизированной системы поддержки принятия решений при оценке безопасности объектов информационных технологий, качества профилей защиты и заданий по безопасности» – разработаны экспертная автоматизированная система поддержки принятия решений по оценке качества профилей защиты и заданий по безопасности и экспер-

ная автоматизированная система поддержки принятия решений по оценке соответствия объектов информационных технологий заданию по безопасности.

*Государственная комплексная программа научных исследований «Космические исследования» (2014–2015 гг.), задание «Исследовать и разработать методологические, нормативные и организационные основы обеспечения информационной безопасности наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли».*

*Государственная программа научных исследований «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Информатика» (2014–2015 гг.), задание «Исследование методологических основ новых версий международных стандартов и нормативно-технических правовых актов в области информационной безопасности и разработка программного комплекса аттестации систем защиты информации информационных систем» (науч. руководитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. К. Фисенко, А. В. Афанасьев, А. Б. Степанян, Н. С. Захаревич, Е. П. Максимович, Т. С. Мартинович). Разработаны программный комплекс оценки полноты и качества исходных данных по аттестации систем защиты информации и программный комплекс аттестации систем защиты информации информационных систем.*

*Государственная программа научных исследований «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Космические исследования» (2014–2015 гг.), задание «Разработка адаптивных технологий проектирования и применения средств противодействия угрозам геоинформационным системам в базе самообучающегося нечеткого классификатора» (науч. руководитель – Д. А. Вятчинин, исполнитель – А. В. Доморацкий). В результате выполнения задания:*

– предложены модель и методика анализа и оценки рисков информационной безопасности корпоративной сети БКСДЗ;

– разработаны специальные лингвистические ресурсы – экспертные правила и алгоритм преобразования «фонема – аллофон», генерирующий лингвистические ресурсы «слово-аллофонная запись», что позволяет эксперту корректировать работу двуязычного синтезатора речи при выявлении ошибок в обработке сверхбольшого множества текстовых запросов без привлечения инженера-программиста при синтезе белорусской или русской речи по сверхбольшому множеству текстовых запросов при возникновении угроз безопасности данным в корпоративной сети БКСДЗ;

– разработана методика прототипирования систем нечеткого вывода в случае тринаправленных обучающих данных, позволяющая производить классификацию объектов в условиях изменения их характеристик под воздействием внешней среды;

– разработана методика формирования обучающей выборки для систем обнаружения вторжений на основе базы KDD'99;

– разработаны алгоритмы построения лингвистических ресурсов для идентификации количественных выражений с единицами измерения СИ, производными от СИ и вне СИ для текстового процессора синтезатора речи, который будет использован при озвучивании текстовых данных с количественными выражениями в системе при возникновении угроз безопасности.

*Государственная программа научных исследований «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика и космические исследования» (2016–2020 гг.), задания:*

1) «Исследование и развитие процессного подхода к оценке и обработке рисков информационной безопасности продуктов и систем информационных технологий и их классификации по уровням безопасности» (науч. руководитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. К. Фисенко, Е. П. Максимович, А. Б. Степанян, В. Ю. Скобцов, Т. С. Мартинович, Д. С. Ким, Н. А. Чуприс). В результате выполнения задания разработаны:

– программный комплекс автоматизации процесса оценки и обработки рисков информационной безопасности продуктов и систем информационных технологий, который позволяет идентифицировать и классифицировать угрозы, уязвимости и риски, оценивать вероятности реализации угроз, уязвимостей и рисков, идентифицировать меры защиты, оценивать возможные последствия;

– алгоритмы обнаружения дефектов модулей программных средств на основе применения алгоритмов мягких вычислений и метаэвристик с целью уменьшения рисков нештатного функционирования программных модулей.

2) «Управление доступом к ресурсам распределенных информационных систем на основе отношений доверия с учетом механизмов централизации и децентрализации» (науч. руководитель – В. А. Дмитриев, исполнители – Е. П. Максимович, А. Б. Степанян, В. Ю. Скобцов, Т. С. Мартинович, Д. С. Ким, Н. А. Чуприс). Разработан программный комплекс управления доступом к ресурсам распределенных информационных систем на основе отношений доверия с учетом механизмов централизации и децентрализации, содержащий:

– программное средство управления логическим разграничением доступа субъектов к объектам сложных централизованных распределенных информационных систем путем использования отношений доверия;

– программное средство управления и защиты ресурсов распределенных децентрализованных информационных систем с элементами централизации или без таковых на основе алгоритмов консенсуса, алгоритмов хеширования и криптозащиты с возможностью поддержки смарт-контрактов или элементов криптохранилищ.

Программный комплекс обеспечивает:

- запуск и доступности всех компонентов меню генератора сети;
- выполнение полной установки компонентов сети: проверку и установку предварительных условий, проверку и установку компонентов HF (Hyperledger Fabric), установку компонентов HF;
- генерацию сети по заданным параметрам;
- установку инструментов разработчика CC (Chain Code) – VS (Visual Studio) Code;
- запуск и самотестирование сети, сгенерированной по заданным параметрам с тестовым и основным CC.

*Государственная программа научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика» (2021–2025 гг.), задание «Поведенческие и интеллектуальные методы обнаружения атак в телекоммуникационных сетях» (науч. руководитель – В. А. Дмитриев, исполнители – В. Ю. Скобцов, Е. П. Максимович, Т. С. Мартинович, А. Ю. Квач). Разработаны статистические, спектральные, фрактальные, параметрические методы обнаружения атак, методы вейвлет-анализа обнаружения атак, гибридная нейросетевая модель обнаружения атак с использованием методов машинного обучения.*

Поведенческие и интеллектуальные методы обнаружения атак будут использованы при разработке программного комплекса обнаружения атак.

*Государственная научно-техническая программа «Защита информации» (2006–2010 гг.), задания: ОКР «Экран-1», ОКР «Доступ», НИР «Модель», ОКР «Мониторинг». В результате выполнения заданий:*

- разработаны научно-методологические основы комплексной защиты информации;
- создан межсетевой экран для безопасного подключения локальной вычислительной сети к открытым вычислительным сетям;
- создана система контроля и обнаружения удаленных сетевых атак;
- разработан аппаратно-программный комплекс средств защиты информации от несанкционированного доступа с применением средств криптографии;
- разработан комплекс моделей синтеза и анализа требований безопасности информационных технологий.

*Государственная научно-техническая программа «Защита информации-2» (2011–2015 гг.), задание «Разработать технические нормативные правовые акты и методические документы для проведения аттестации систем защиты информации» (отв. исполнитель – Е. П. Максимович, исполнители – В. К. Фисенко, Т. С. Мартинович). В результате выполнения задания разработаны:*

- СТБ 34.101.1-2014 (ISO/IEC 15408-1: 2009) Информационные технологии и безопасность. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель;

– СТБ 34.101.2-2014 (ISO/IEC 15408-2: 2008) Информационные технологии и безопасность. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные требования безопасности;

– СТБ 34.101.3-2014 (ISO/IEC 15408-3: 2008) Информационные технологии и безопасность. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Гарантийные требования безопасности;

– типовые методики оценки качества профилей защиты и заданий по безопасности, разработанных в соответствии с требованиями стандартов СТБ 34.101.1-2014 – СТБ 34.101.3-2014;

– типовые методики испытаний функций безопасности продуктов информационных технологий.

Вышеуказанные стандарты являются базовыми в области оценки безопасности информационных технологий и гармонизированы с международными стандартами. На их основе предъявляются требования безопасности к продуктам информационных технологий. В стандартах излагается концепция оценки безопасности продуктов информационных технологий, содержатся каталоги функциональных и гарантийных требований безопасности, используемые для разработки профилей защиты и заданий по безопасности, а также для оценки защищенности продуктов информационных технологий.

Разработанные стандарты используются при разработке профилей защиты и заданий по безопасности, испытании продуктов информационных технологий, составлении экспертных заключений и выдаче сертификатов соответствия.

В каждой из методик определены:

– совокупности проверок, которые должен выполнить эксперт для всестороннего и полного анализа профилей защиты и заданий по безопасности, проведения испытаний функций безопасности объекта оценки на соответствие профилей защиты и заданий по безопасности определенного уровня гарантии;

– комбинированные (лингвистические и соответствующие им интервальные) шкалы оценок, используемые экспертом для выставления оценок при проведении установленной совокупности проверок;

– правила формирования обобщенных количественных оценок по совокупности выставленных экспертом оценок;

– правила принятия решения о результатах оценки качества профилей защиты и заданий по безопасности, испытаний функций безопасности объекта оценки на соответствие профилей защиты и заданий по безопасности определенного уровня гарантии на основе обобщенных количественных оценок.

### Публикации

Сотрудниками лаборатории опубликовано более 300 научно-технических статей и докладов по направлениям деятельности лаборатории, в том числе монографии:

1. Медицинские информационные системы и технологии / С. В. Абламейко, В. В. Анищенко, В. А. Лапицкий, А. В. Тузиков. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – 176 с.

2. Вятченин, Д. А. Нечеткая кластеризация и нечеткая математическая морфология в задачах обработки изображений / Д. А. Вятченин, А. В. Хижняк, А. В. Шевяков. – Минск : ВА РБ, 2012. – 271 с.

3. Вятченин, Д. А. Нечеткие методы автоматической классификации / Д. А. Вятченин. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 219 с.

4. Viattchenin, D. A. A heuristic approach to possibilistic clustering: algorithms and applications / D. A. Viattchenin. – Berlin : Springer-Verlag Berlin, 2013. – 227 p.

УДК 004.932

## Актуальные результаты, полученные в лаборатории обработки и распознавания изображений

**Залесский Борис Андреевич**

*заведующий лабораторией обработки и распознавания изображений,*

*доктор физико-математических наук*

*E-mail: zalesky@newman.bas-net.by*

В статье кратко описаны результаты, полученные в лаборатории обработки и распознавания изображений за последнее десятилетие. Каждый из представленных результатов опубликован в одном из журналов: «Доклады Национальной академии наук Беларуси», «Известия Национальной академии наук Беларуси» и «Информатика».

**Метод нечеткой кластеризации  $k$ -средних со штрафной функцией.** Предложена новая версия метода нечеткой кластеризации  $k$ -средних, названная методом нечеткой кластеризации  $k$ -средних со штрафной функцией. Разработан алгоритм кластеризации полутоновых, цветных и мультисканальных изображений, основанный на предложенной версии. Особенностью алгоритма является использование аддитивной штрафной функции гиббсовского типа для контроля гладкости кластерного представления изображения на его однородных областях. Локальная гладкость получаемых решений зависит от значений коэффициентов штрафной функции. Эти коэффициенты могут быть взяты как функции величины и направления градиента изображения. В отличие от известного алгоритма нечеткой кластеризации  $k$ -средних, который неустойчив по отношению к шумам и искажениям, присутствующим на изображении, предлагаемый алгоритм позволяет строить устойчивые кластерные представления на зашумленных и поврежденных изображениях. Свойства алгоритма проиллюстрированы на тестах с реальными изображениями. Эксперименты показали, что алгоритм, с одной стороны, корректно объединяет однородные области изображений в отдельные кластеры, а с другой – предотвращает слияние разнородных областей.

На рис. 1 показаны исходное тестовое изображение, результат его кластеризации известным методом нечетких  $c$ -средних и предложенным новым методом нечеткой кластеризации со штрафной функцией. Автор результата Б. А. Залесский.

**Методы, алгоритмы и программный комплекс «КреМ» анализа данных, полученных с датчиков давления горных крепей.** Построены методы и алгоритмы анализа данных, полученных с датчиков давления систем мониторинга, установленных на гидростойках забойных крепей, используемых в забоях Старобинского месторождения калийных солей, которое в настоящее время разрабатывается предприятием «Беларуськалий». Предложенные методы и алгоритмы использованы в реализованном сотрудниками лаборатории программном комплексе (ПК) «КреМ» и предназначенном для диагностики состояния соленосных горных пород и мониторинга опасных проявлений горного давления. В частности, разработаны и программно реализованы в составе ПК «КреМ» методы и алгоритмы: первичной обработки данных; вычисления 21-й характеристики данных, получаемых с датчиков давления; автоматического обнаружения горных ударов по крепям различного типа и других проявлений горного давления, в том числе являющихся предвестниками опасных обрушений кровли; обнаружения траектории прохода горного комбайна и времен опускания и подвигания крепей; оценки распределения ударов по крепям, обрушений и опасных пригрузок крепей во времени и пространстве.

На рис. 2 и 3 представлены результаты решения отдельных практических задач мониторинга состояния соленосных горных пород и мониторинга опасных проявлений горного давления.

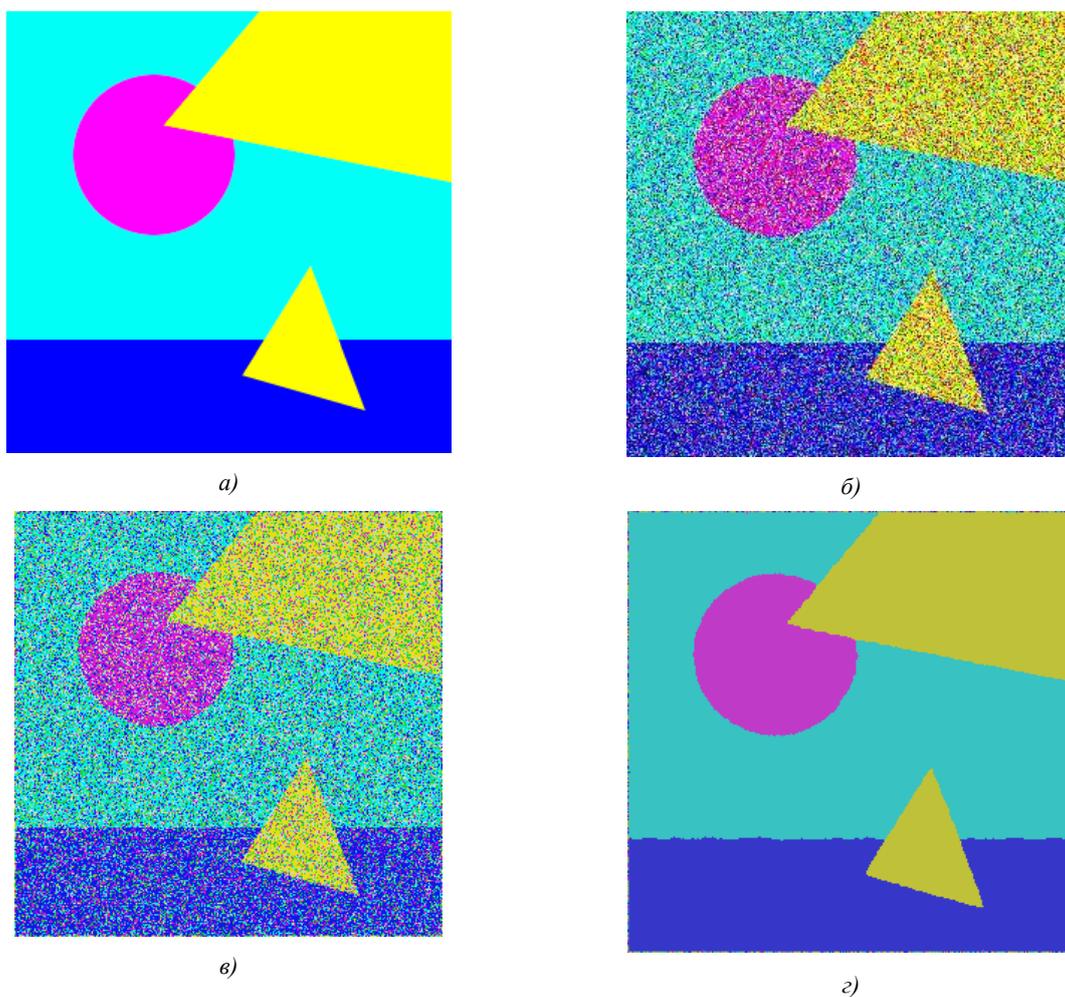


Рис. 1. Пример обработки синтезированного RGB-изображения с шумом:  
 а) исходное изображение; б) исходное изображение, наблюдаемое с аддитивным гауссовским шумом;  
 в) зашумленное изображение, обработанное известным методом нечетких  $c$ -средних;  
 з) предложенным методом нечеткой кластеризации со штрафной функцией

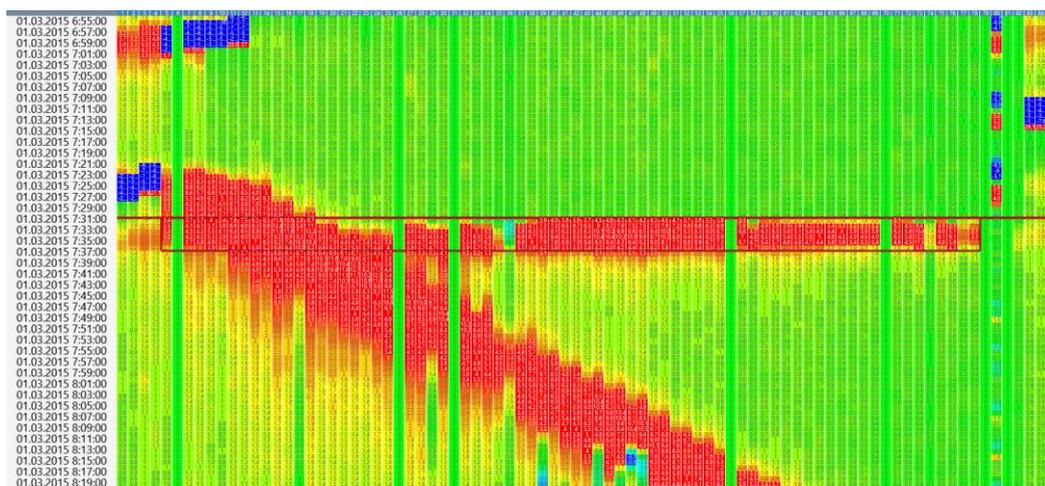


Рис. 2. Результат автоматического обнаружения сильного удара по горным крепям, выполненного ПК «КреМ»  
 (область удара найдена автоматически и выделена горизонтальными прямыми линиями)

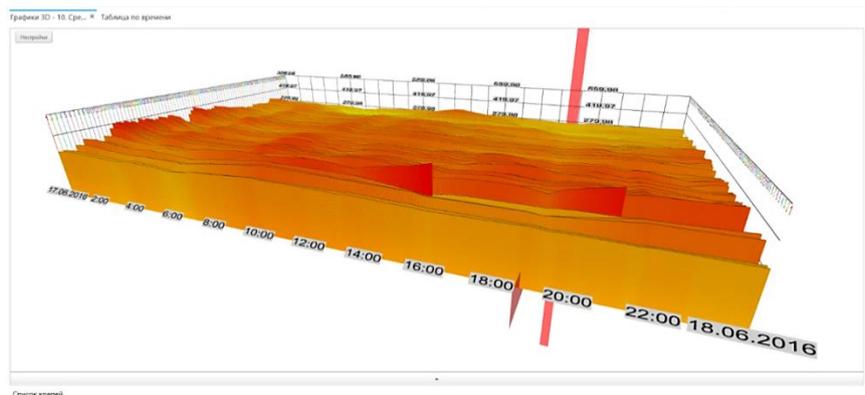


Рис. 3. Визуализация данных пригрузок горных крепей в виде 3D-модели

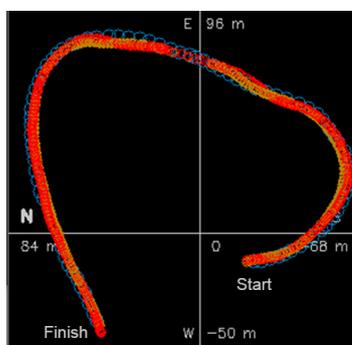
В разработке алгоритмов и ПК участвовали Р. С. Жук, Б. А. Залесский, Ф. С. Троцкий и Е. С. Чуйкина.

**Визуальная навигация автономно летящего БПЛА с целью его возвращения в точку старта.** Построен, программно реализован и протестирован алгоритм автономной визуальной навигации, предназначенный для возвращения в точку старта беспилотного летательного аппарата (БПЛА), оборудованного одной бортовой видеокамерой и бортовым вычислителем, без использования навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС. Предлагаемый алгоритм схож с широко известными алгоритмами визуальной навигации, такими как одновременная локализация и картографирование (V-SLAM) и визуальная одометрия, однако отличается от них раздельным выполнением процессов картографирования и локализации. Он вычисляет географические координаты точек-признаков, найденных на кадрах, которые снимаются бортовой видеокамерой при полете от точки старта до потери сигналов GPS и ГЛОНАСС. После потери сигнала запускается миссия возвращения и вычисляется лишь положение БПЛА относительно построенной на основе найденных ранее признаков карты, которая используется для возвращения в точку старта. Предложенный подход не требует таких сложных вычислений, как V-SLAM, и не накапливает со временем ошибки в отличие от визуальной одометрии и традиционных методов инерциальной навигации. Алгоритм был реализован и протестирован с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro.



Квадрокоптер DJI Phantom 3 Pro, использованный для тестирования алгоритма

На рис. 4 представлены результаты применения разработанного алгоритма автономной навигации. Авторы результата Р. С. Жук, Б. А. Залесский, Ф. С. Троцкий.



Результаты эксперимента:  
длина маршрута БПЛА – 1040 м;  
средняя точность оценки географических координат –  $\pm 2,9$  м;  
частота оценки координат – 6 кадров/с

Рис. 4. Траектория полета квадрокоптера: от точки старта до момента исчезновения навигационных GPS-сигналов (голубой цвет); к точке старта, управляемого с помощью разработанного решения (без использования сигналов GPS) (желтый); оценки координат квадрокоптера, возвращающегося в точку старта с помощью предложенного решения (красный)

**Многоуровневый алгоритм цветовой кластеризации МАСС (multilevel algorithm for color clustering).** Разработан алгоритм МАСС, предназначенный для быстрой кластеризации изображений. В настоящее время для цветовой кластеризации изображений активно используются несколько хорошо известных алгоритмов, в том числе  $k$ -средних (который является одним из наиболее часто используемых при обработке данных) и его нечеткие версии, водораздела, наращивания областей и целая серия новых более сложных нейросетевых и других алгоритмов. Однако их невозможно применять для кластеризации больших цветных изображений в режиме реального времени на малых вычислителях. Быстрая кластеризация бывает необходима, например, при обработке кадров видеопотока, создаваемого различными видеокамерами, или при работе с большими базами данных изображений.

Алгоритм МАСС позволяет выполнять на персональном компьютере кластеризацию больших изображений, например размера FullHD, по цвету со средним отклонением от исходных значений цвета около пяти единиц менее чем за 20 мс, в то время как параллельная версия классического алгоритма  $k$ -средних выполняет кластеризацию этих же изображений со средней ошибкой более 12 единиц за время, превышающее 2 с. Предложенный алгоритм многоуровневой кластеризации изображений по цвету достаточно прост в реализации. Он был использован для сегментации объектов на кадрах видео в режиме реального времени.

В табл. 1 приведены результаты сравнения быстродействия построенного алгоритма с параллельной версией алгоритма  $k$ -средних при кластеризации цветных изображений размера FullHD (1920×1080 пикселей). Средняя ошибка определяется как среднеквадратичное отклонение цветов кластеризованного изображения от цветов исходного. Алгоритм разработан Б. А. Залесским.

Таблица 1  
Результаты тестирования алгоритма МАСС

Алгоритм	Среднее время, мс	Среднее количество итераций	Средняя ошибка при Nclust = 20	Средняя ошибка при Nclust = 40	Средняя ошибка при Nclust = 2000
$k$ -средних, RAND	2492,34	200	13,81	–	–
$k$ -средних, FOUND	1067,80	90	<b>11,28</b>	–	–
МАСС	<b>4,36</b>	–	17,02	11,68	<b>4,80</b>

**Нейросетевой алгоритм отслеживания объекта, наблюдаемого на кадрах видеопотока.** Особенность алгоритма заключается в автоматическом обнаружении и захвате объекта одного из наперед заданных типов, его дальнейшем надежном сопровождении, быстром повторном захвате сопровождаемого объекта в случае срыва сопровождения, захвате другого объекта нужного типа при исчезновении сопровождаемого объекта. Обнаружение объекта интереса на кадрах видео осуществляется с помощью нейронной сети-детектора, а сопровождение – с помощью разработанного алгоритма. Разработанный алгоритм позволяет с высокой вероятностью обнаруживать и сопровождать объект интереса. Результаты экспериментального исследования алгоритма приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты экспериментального исследования алгоритма

Видео	Кол-во кадров	$IoU$ (Average)	Precision, %	Recall, %
Два квадрокоптера	1264	0,7415	100	100
Один квадрокоптер	5861	0,5728	99,67	99,67
Объединенное	7125	0,6027	99,76	99,76



Рис. 5. Кадр, полученный камерой во время работы алгоритма отслеживания квадрокоптера

На рис. 5 демонстрируется пример работы программной реализации алгоритма при отслеживании квадрокоптера наземной камерой. Результат получен Б. А. Залесским и В. А. Ивановичем.

В настоящее время разрабатывается новая версия алгоритма, в которой используется более точная нейронная сеть для обнаружения объекта.

УДК 004.93'1; 004.932; 004.8.032.26; 528.8:52(15)

## Лаборатория идентификации систем: основные результаты

**Инютин Александр Владимирович**

*заведующий лабораторией идентификации систем*

*E-mail: avin@newman.bas-net.by*

**Старовойтов Валерий Васильевич**

*главный научный сотрудник лаборатории идентификации систем,*

*доктор технических наук, профессор*

Лаборатория идентификации систем является базовой лабораторией института в области идентификации сигналов и систем. Образована она в 1994 г. на базе лаборатории проблем построения САПР СБИС Брестского отделения института (д-р техн. наук, проф. Р. Х. Садыхов – зав. лабораторией, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А. А. Дудкин, А. Г. Мачнев). С 2015 г. руководитель лаборатории – д-р техн. наук, проф. А. А. Дудкин, с 2023 г. – А. В. Инютин.

**Основные научные направления.** Основным научным направлением лаборатории является разработка методов и алгоритмов обработки изображений и распознавания объектов в системах технического зрения, а также направление прикладных исследований – разработка аппаратно-программных комплексов идентификации для различных областей народного хозяйства.

В настоящее время в лаборатории работают восемь человек, в том числе один доктор технических наук и четыре кандидата наук: заведующий А. В. Инютин, гл. науч. сотр., д-р техн. наук, проф. В. В. Старовойтов, вед. науч. сотр., канд. техн. наук, доц. Ю. И. Голуб, ст. науч. сотр. канд. техн. наук, доц. А. А. Воронов, канд. техн. наук В. В. Ганченко, канд. техн. наук, доц. М. М. Лукашевич, науч. сотр. Л. П. Поденок, мл. науч. сотр. В. В. Венгеренко.

В период с 1995 г. по 2020 г. в лаборатории работали канд. техн. наук Е. А. Шестаков, канд. техн. наук Д. А. Вершок, канд. техн. наук В. А. Самохвал, канд. техн. наук Н. А. Романовская, А. В. Отвагин, А. Л. Муравин, М. Е. Ваткин, канд. техн. наук, докторант В. А. Головко, А. М. Селиханович, канд. филос. наук Д. А. Вятчин, канд. техн. наук У. Ю. Ахунджанов.

Под научным руководством Р. Х. Садыхова сотрудниками лаборатории защищены две докторские диссертации: В. А. Головко (2003) и А. А. Дудкин (2010) и пять кандидатских: А. Г. Мачнев (1995), В. А. Самохвал (1998), Д. А. Вершок (2002), М. Е. Ваткин (2006), А. В. Отвагин (2007). Под научным руководством А. А. Дудкина защитились В. В. Ганченко (2010) и А. А. Воронов (2012), под научным руководством В. В. Старовойтова – У. Ю. Ахунджанов (2023).

В лаборатории разработаны: методы и алгоритмы идентификации изображений и пространственных образов, основанные на использовании спектральных дескрипторов в различных ортогональных базисах и аппарата моментных функций; технологии проектирования систем компьютерного видения, ориентированные на создание аппаратно-программных комплексов реального времени; эффективные по быстродействию алгоритмы генерирования нейронных сетей иерархической классификации образов; технология предварительной обработки и анализа видеоизображений слоев интегральных схем, которая является основой для создания компьютерных систем оперативного анализа электронных изделий большой степени интеграции.

Ряд разработок лаборатории внедрены на производстве: автоматизированная система восстановления топологии двухуровневой металлизации из оцифрованного изображения слоев металлизации кристалла интегральной схемы (концерн «Планар»), система цифровой обработки изображений образцов элементов и узлов электронных изделий (НПО «Интеграл»), система распознавания рукописных арабских цифр и система распознавания (верификации) рукописной подписи (НИИЭВМ).

Лаборатория поддерживает тесные научные контакты с учеными Центра нейрокомпьютеров РАН и ЛЭТИ (Россия), Сианьским институтом оптики и точной механики КАН (Китай), Biligoba Teknoloji Ltd. Sti (Турция), Институтом информационных технологий ВАНТ (Вьетнам), Тернопольской академией народного хозяйства и Львовским политехническим университетом (Украина), Силезским и Щетинским техническими университетами, Industrial Institute of Agricultural Engineering (Польша), Западным университетом Тимишоара (Румыния), Международным университетом Рифа (Пакистан), университетом Крайст (Индия), университетами Белграда (Сербия), Жилины (Словакия), PARIS XII (Франция), Зальцбурга (Австрия) и Тессалоники (Греция).

В настоящее время некоторые сотрудники лаборатории участвуют в подготовке специалистов вузов, читают курсы лекций: профессор В. В. Старовойтов – «Методы обработки изображений», БНТУ, Л. П. Поденок – «Системное программное обеспечение вычислительных систем», «Базы данных», БГУИР, доцент А. А. Воронов – «Компьютерная безопасность распределенных систем», «Нейросетевая обработка данных», БГУ, «Структурная и функциональная организация ВМ», «Вычислительные машины, системы и сети», «Теория алгоритмов обработки данных», БГУИР, а также руководят дипломным проектированием и НИР, являются членами ГЭК. Многие являются членами организационных и программных комитетов международных конференций PRIP, ICNNAI, CAD-DD, участвуют в конференциях Беларуси, СНГ и дальнего зарубежья.

Ежегодно публикуется около 30 статей в журналах и сборниках трудов конференций. Совместно с кафедрой ЭВМ БГУИР был проведен ряд международных конференций: The Third International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence ICNNAI-2003, The 8th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing PRIP'2005, The Fifth International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence ICNNAI'2008, The 11th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing PRIP'2011.

**Основные разработки.** Совместно с ОАО «КБТЭМ-ОМО» разработан и внедрен программный комплекс классификации дефектов топологии, обнаруживаемых в результате автоматического контроля топологических слоев полупроводниковых пластин. Программные средства используются в установке автоматического микроконтроля привносимых дефектов на пластинах с топологией ЭМ-6429 и позволяют накапливать информацию о дефектах, классифицировать их, просматривать дефекты на полупроводниковой пластине, работать с дефектными ведомостями (рис. 1). Интерфейс программы прост для освоения, удобен в работе и дает возможность сохранять концепцию предприятия проектировать все установки как единый комплекс. Разработанную программу можно использовать и для других установок автоматического контроля топологического рисунка шаблонов или пластин.

Также разработан и внедрен программный комплекс подготовки топологических данных для специализированного технологического оборудования контроля топологических структур на фотошаблонах. Он обеспечивает возможность преобразования и синтаксического анализа топологических данных из форматов САПР в формат специализированного технологического оборудования производства СБИС, установок автоматического контроля полупроводниковых пластин и фотошаблонов. Разработанные программные средства подготовки топологических данных для специализированного технологического оборудования контроля топологических структур на фотошаблонах предназначены для замены дорогостоящих зарубежных аналогов, позволяют сократить расходы и время разработки и производства оригиналов топологии СБИС со сложностью свыше 800 млн топологических элементов за счет сокращения времени преобразования данных с использованием параллельных вычислений. Программный комплекс работает совместно с установками автоматического контроля топологии на фотошаблонах ЭМ-6329 (рис. 2).

Совместно с НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» разработан программный комплекс обработки и анализа изображений для систем технического зрения в микроэлектронной промышленности (рис. 3). Комплекс предназначен для ввода проектной информации в системы автоматизированного проектирования; оперативного сбора объективной информации о качестве выполнения той или иной технологической операции; получения информации, необходимой для экспресс-анализа изделий предприятий-конкурентов.



Участники Седьмой Международной конференции ICNNAI2012, 10–12 октября 2012 г.:  
А. В. Мышев, А. А. Дудкин, Р. Хиромото, А. В. Инютин, А. Липницас (верхн. ряд); Я. Вассерман,  
В. Пьюри, К. Мадани, А. А. Воронов, К. Римкус (средн. ряд); А. Гречко, Р. Морено, Р. Х. Садыхов (нижн. ряд)

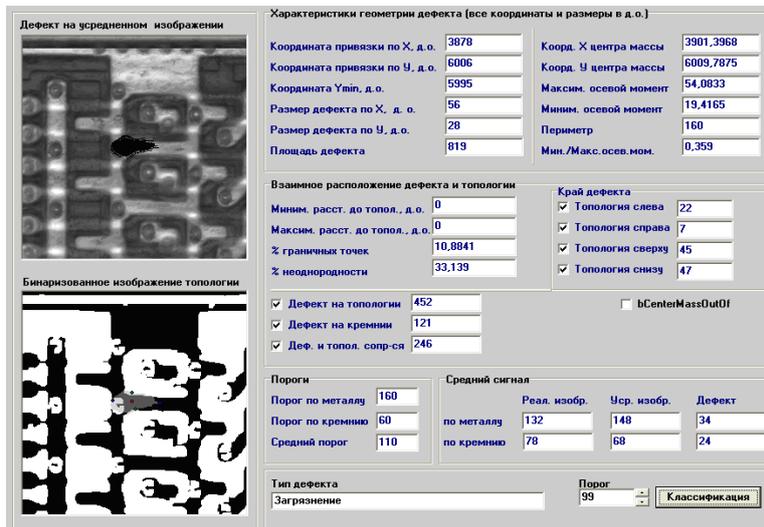


Рис. 1. Программный комплекс классификации дефектов топологии, обнаруживаемых в результате автоматического контроля топологических слоев полупроводниковых пластин



Рис. 2. Установка автоматического контроля топологии на фотоплашках ЭМ-6329

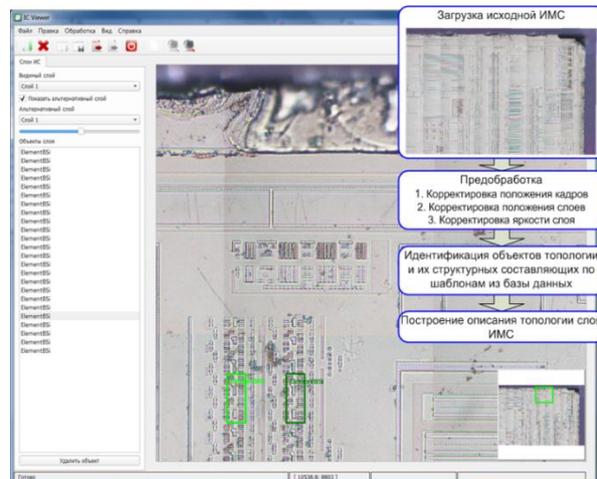


Рис. 3. Программный комплекс обработки и анализа изображений для систем технического зрения в микроэлектронной промышленности

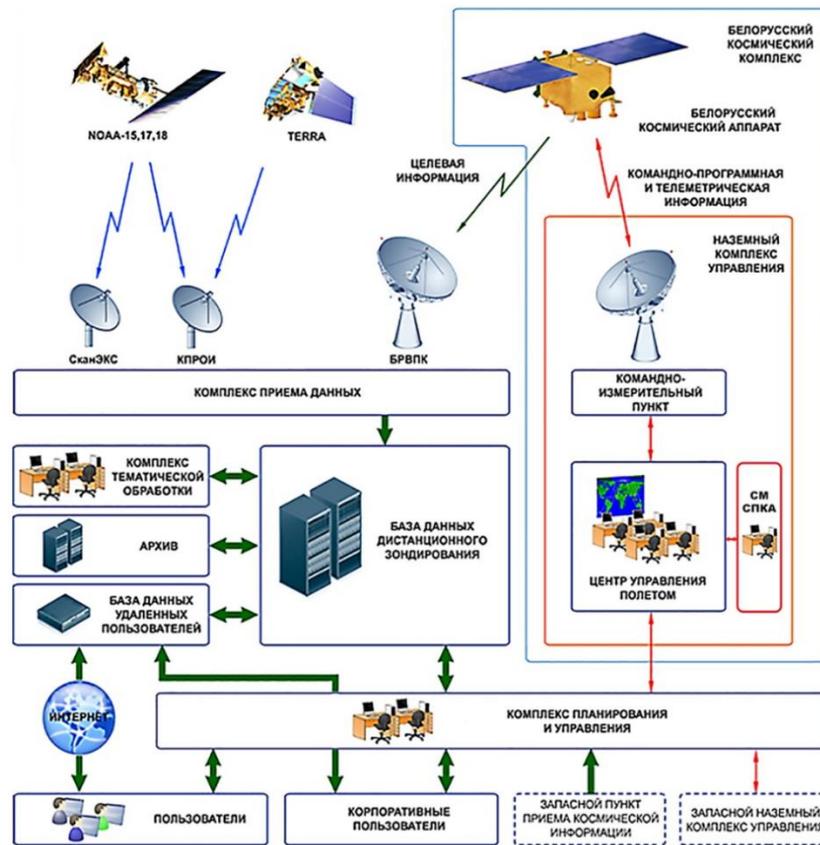


Рис. 4. Нейросетевая система мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным (СМ СПКА) в составе наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли

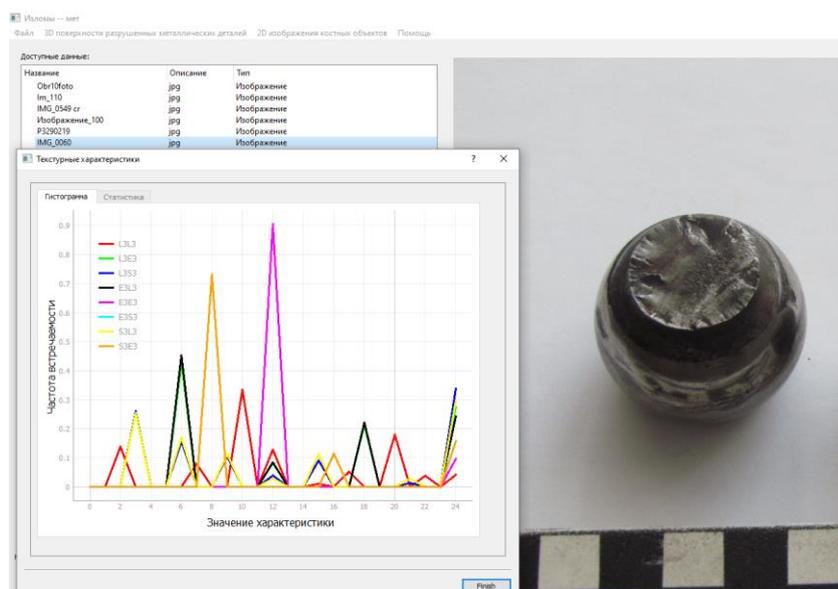


Рис. 5. Пользовательский интерфейс автоматизированной системы анализа изображений поверхностей изломов металлических деталей



Рис. 6. Изображения для верификации из базы CEDAR: слева – поддельная подпись, справа – подлинная (верхн. ряд). Семь подлинных подписей этого же человека (нижн. ряд)

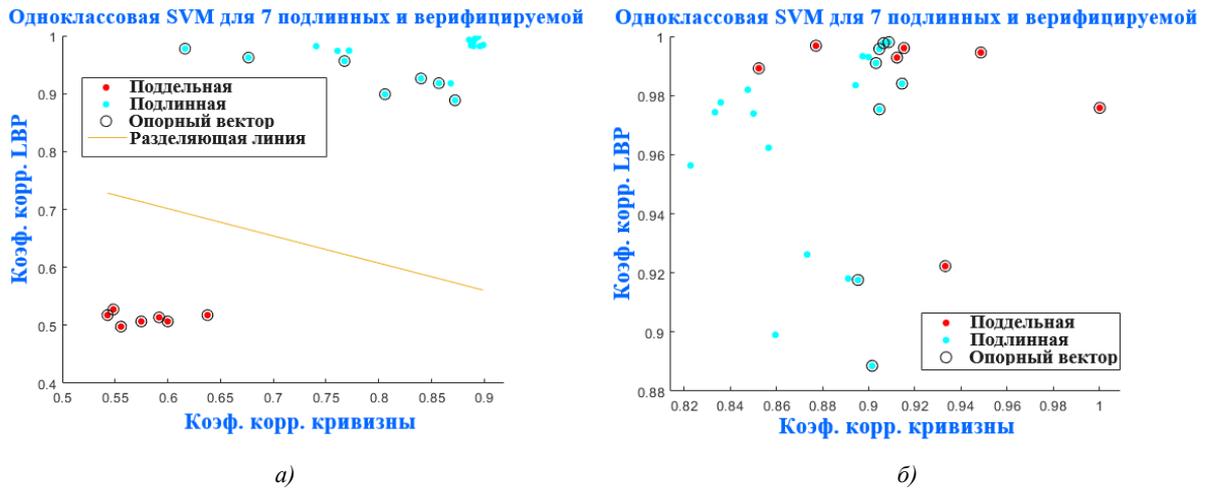


Рис. 7. Пример верификации подписи при сравнении с семью подлинными:  
а) подпись определена как поддельная; б) подпись подлинная

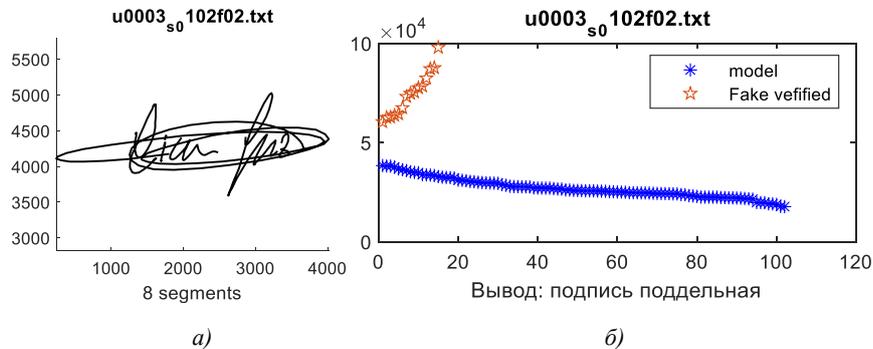


Рис. 8. Визуализация поддельной динамической подписи человека с ID0003 (а); результат ее верификации на базе  $N=15$  подлинных подписей (б)

Совместно с УП «Геоинформационные системы» разработан экспериментальный образец нейросетевой системы мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным для наземного командно-измерительного комплекса (рис. 4).

Использование нейросетевой системы позволяет повышать эксплуатационные характеристики систем космической телеметрии, обеспечивает эффективное использование программно-технических средств системы мониторинга состояния бортовых объектов и подсистем космического аппарата в решении проблемы повышения его живучести за счет рационального планирования сеансов телеметрии. В развитие данной системы сейчас ведется разработка нейросетевого программного комплекса для мониторинга и прогнозирования состояния подсистем аппаратов группировки спутников. Разрабатываемый комплекс отличается тем, что мониторинг и прогнозирование основаны на нейросетевом анализе телеметрических данных непосред-

ственно на борту космического аппарата с использованием моделей, подготовленных на Земле. Алгоритмы анализа телеметрии основаны на глубоких искусственных нейронных сетях и машинном обучении, ориентированных на учет корреляций состояний датчиков подсистем космического аппарата группировки для обеспечения надежного прогноза при высокой погрешности вычислений параметров датчиков в условиях наличия помех и высокой вероятности их отказа. Поддерживается возможность обновления используемых на борту нейросетевых моделей и сохранения полученной телеметрии от космического аппарата группировки в единой базе данных.

Совместно с Научно-практическим центром Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь разработана автоматизированная система анализа изображений повреждений изломов металлических деталей для судебно-экспертных исследований (рис. 5). Она используется для автоматизации процесса судебно-экспертных исследований объектов криминалистической и медико-криминалистической экспертизы в части решения диагностических и идентификационных задач с применением компьютерного анализа цифровых изображений определенных классов объектов.

Разработаны метод анализа подлинности статической подписи человека при малом числе образцов для обучения классификатора и методика унификации представления цифрового изображения рукописной подписи в виде ее контура фиксированного размера и ориентации, не зависящего от исполнения (типа ручки, цвета, наклона подписи, ее размера и разрешения при сканировании). Предложено вычислять индивидуальные новые структурные признаки подписи человека в виде векторов нормализованных частотных распределений значений локальных бинарных шаблонов точек и локальной кривизны контуров подписи. Также предложено новое признаковое пространство, в котором образы пар образцов подписей человека представлены коэффициентами ранговой корреляции между вышеназванными признаками. Такой подход позволяет увеличивать число образов (в условиях небольшого количества доступных подлинных подписей одного человека) для обучения классификатора. Разработан оригинальный алгоритм верификации подписи человека, основанный на построении модели одноклассовой машины опорных векторов и построении ее в качестве классификатора для распознавания подписей этого человека. При верификации всех 2640 подписей из доступной базы CEDAR (содержит подписи 55 человек, половина поддельные) только шесть подлинных были распознаны как поддельные, а все поддельные были классифицированы верно (рис. 6, 7). Точность классификации составила 99,77 %. Точность лучшего из известных результатов на данных этой базы составила 94,40 %.

Сейчас в лаборатории ведутся исследования по верификации нормализованных разными способами подписей онлайн, т. е. подписей, выполненных на планшете стилусом и заданных тремя параметрами: координатами X, Y и давлением на планшет P. Результаты показали, что верификацию подписей для выявления фальшивых с высокой точностью можно выполнять без вычисления дополнительных динамических признаков, используя ограниченный набор (от 5 до 15) подлинных подписей одного человека (рис. 8).

Сбалансированная точность верификации 5000 подписей 100 человек из базы МСУТ-100 составила 0,9926, а ошибка EER = 0,74 %, что является лучшим из известных показателей.

УДК 52(15):002.6; 002.6:004.65; 002.6:004.62/.63;004.738.5

## Научно-исследовательский отдел совместных программ космических и информационных технологий: основные результаты практической деятельности

**Кореняко Сергей Анатольевич**

*заведующий отделом совместных программ космических и информационных технологий*

*E-mail: korenjako@newman.bas-net.by*

**Степура Людмила Васильевна**

*научный сотрудник отдела совместных программ космических и информационных технологий*

*E-mail: stepura@newman.bas-net.by*

Научно-исследовательский отдел совместных программ космических и информационных технологий был создан в 2002 г. для научно-организационного сопровождения программ Союзного государства по разработке и использованию космических средств и технологий, а также для проведения научных исследований в рамках решаемых задач. На базе отдела были организованы исполнительные дирекции белорусской части союзных космических программ как органы оперативного управления процессом их реализации.

За указанный период успешно выполнены четыре программы Союзного государства в области космических исследований: «Космос-БР» (1999–2002 гг.), «Космос-СГ» (2004–2007 гг.), «Космос-НТ» (2008–2011 гг.) и «Мониторинг-СГ» (2013–2017 гг.). С 2022 г. реализуется союзная космическая программа «Комплекс-СГ».

Первым руководителем отдела и исполнительным директором белорусско-российских космических программ «Космос-БР» и «Космос-СГ» был назначен А. А. Кравцов, а с 2009 г. отдел и исполнительные дирекции последующих союзных программ возглавил С. А. Кореняко.

*Основными направлениями деятельности и областями научных исследований отдела являются:*

- разработка проектов целевых научно-технических программ в области космоса и подготовка документов по их формированию и согласованию в Республике Беларусь;
- разработка научно-методических документов и создание программно-технических средств для повышения эффективности системы управления и реализации союзных программ космических исследований;
- разработка и развитие интерактивных интеллектуальных методов поиска и аналитической обработки текстовой информации;
- разработка аппаратно-программных средств для реализации технологий мониторинга земной поверхности на основе данных дистанционного зондирования Земли в целях оценки эколого-геодинамического состояния среды и поиска природных ископаемых;
- создание программного обеспечения трехмерной реконструкции и визуализации архитектурных объектов, представляющих исторический и культурный интерес для Беларуси.

В рамках научных направлений и областей исследования отдел осуществлял свою деятельность по разработке и реализации программ Союзного государства и республиканских научно-технических программ в области космоса.

При непосредственном участии отдела была разработана, согласована и успешно выполнена первая белорусско-российская космическая программа «Разработка и использование космических средств и технологий получения, обработки и отображения космической информации» («Космос-БР») на 1999–2002 гг. [1]. Работа велась по 10 заданиям программы с участием 12 предприятий и организаций от Беларуси и по 18 заданиям – от России.

Сотрудники отдела обеспечили научно-организационное сопровождение реализации программы, а также спроектировали несколько веб-сайтов. В этот период разработаны интернет-представительства для белорусско-российской программы «Космос-БР», а также для Первого Белорусского космического конгресса и Национального совета по космосу Республики Беларусь. Полученные результаты по этой программе были широко представлены на Первом Белорусском космическом конгрессе в октябре 2003 г.

В 2004–2007 гг. отдел обеспечил разработку, согласование и научно-организационное сопровождение реализации программы Союзного государства «Разработка и использование перспективных космических средств и технологий в интересах экономического и научно-технического развития Союзного государства» («Космос-СТ»). В рамках программы было выполнено задание «Разработка информационно-аналитической системы для комплексного анализа и интерпретации данных по космической тематике. Проведение опытной эксплуатации системы» (ответственный исполнитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, исполнители: А. А. Кравцов, Д. Р. Насуро, Д. В. Прадун, Д. А. Черников).

Экспериментальный образец системы представлял собой комплекс взаимосвязанных информационных технологий, направленных на выполнение следующих функций:

- визуализацию текстовых документов, в результате которой в них выделялись информативные понятия и предложения;
- автоматическое индексирование текстовых документов;
- автоматическое реферирование текстовых документов;
- синтез речи по тексту для обеспечения речевого доступа к веб-сайтам;
- поиск необходимых документов в сети Интернет и на локальных дисках персонального компьютера.

Реализация указанных функциональных возможностей системы направлена на обеспечение информационно-аналитической поддержки деятельности системных аналитиков в части автоматического реферирования текстовых документов на русском, белорусском, английском и немецком языках, комплексного анализа и интерпретации данных по космической тематике.

Выполнение задания стало практической реализацией теоретических основ построения интеллектуальной информационной технологии автоматического поиска, реферирования и обработки научно-технической информации, заложенных под руководством гл. науч. сотр. отдела, д-ра техн. наук, доцента С. Ф. Липницкого.

В последующий период при непосредственном участии отдела осуществлены разработка, согласование и научно-организационное сопровождение реализации союзной научно-технической программы «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» («Космос-НТ») на 2008–2011 гг. [2].

В рамках программы сотрудники отдела выполнили два задания:

1. «Создание инструментальных программных средств и прикладных библиотек блочно-параллельной обработки многомерных космических изображений» (ответственный исполнитель – науч. сотр. Д. В. Прадун, исполнители: С. В. Овсянников, Д. А. Черников). Результатом выполнения задания стал экспериментальный образец программного комплекса и прикладные библиотеки блочно-параллельной обработки многомерных космических изображений, обеспечивающие:

- тематическую обработку изображений космической и аэросъемки на основе созданных технологических цепочек обработки изображений;
- использование распределенных вычислений с целью ускорения процесса обработки больших объемов графической информации за счет применения параллелизма по данным;
- разработку и программную реализацию алгоритмов обработки мультиспектральных изображений и их параллельную модификацию в условиях мультиагентной системы;
- мониторинг и настройку вычислительных узлов программного комплекса для организации эффективного технологического процесса обработки целевой информации с космических аппаратов.

2. «Разработка информационно-аналитической системы для интеллектуального поиска и обработки научно-технической информации по космической тематике» (ответственный исполнитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, исполнители: А. А. Кравцов, А. А. Мамчич, С. А. Сорудейкина, Л. В. Степура). В результате выполнения задания создан экспериментальный образец информационно-аналитической системы для индексирования, поиска и реферирования научно-технической информации по космической тематике, опубликованы 14 научных статей и докладов, защищена одна кандидатская диссертация (научный сотрудник А. А. Мамчич).

В 2013–2017 гг. отдел осуществлял разработку, согласование и научно-организационное сопровождение реализации научно-технической программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» («Мониторинг-СГ») [3].

В рамках программы сотрудниками отдела были выполнены два задания:

1. «Разработать информационную систему интернет-мониторинга публикаций по космической тематике и информационной поддержки работ по обеспечению надежности и живучести космических аппаратов в процессе их эксплуатации» (научный руководитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, ответственный исполнитель – науч. сотр. Л. В. Степура, исполнители: А. Г. Буравкин, А. В. Даниленко, Н. П. Дегтярев, В. А. Елисеев, Л. Г. Зиновенкова, С. А. Кореняко, Г. Н. Свириденко, И. А. Ляткевич, О. В. Мороз, О. И. Семенков, И. К. Стежко, В. В. Телегин, Е. С. Цветков).

В процессе реализации задания разработана информационная система интернет-мониторинга публикаций по космической тематике и информационной поддержки работ по обеспечению надежности и живучести космических аппаратов в процессе их эксплуатации. Актуализированы база данных о научно-технических достижениях в области космических исследований и база данных для информационной поддержки работ по обеспечению надежности и живучести космических аппаратов в процессе их эксплуатации.

2. «Создать экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса распределенной системы анализа и мониторинга космической информации с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях высокопроизводительных систем» (научный руководитель – науч. сотр. Д. В. Прадун, исполнители: С. А. Кореняко, В. В. Телегин).

В рамках выполнения задания решена задача по созданию распределенной системы анализа и мониторинга целевой информации, получаемой с БКА и космического аппарата «Канопус», которая позволила значительно увеличить быстродействие и скорость обработки данных за счет использования пакетной обработки, параллелизма по данным и распараллеливания алгоритмов тематического анализа космической информации.

С учетом имеющихся научно-технических заделов в 2009–2012 гг. отдел участвовал в реализации научно-технической программы Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» («Нанотехнология-СГ»), в рамках которой выполнено задание «Разработать экспериментальный программный комплекс поиска и аналитической обработки научно-технической информации для создания электронного банка данных о нанотехнологиях» (ответственный исполнитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, исполнители: А. А. Мамчич, Л. В. Степура).

Программный комплекс обеспечивал многоязычный, предметно-ориентированный и персонализированный поиск научно-технической информации в сети Интернет и локальных базах данных; мониторинг сети Интернет с учетом информационных потребностей пользователя; создание аналитических отчетов по результатам веб-мониторинга; автоматический подбор и категоризацию документов для разработки электронного банка данных о новых технологиях и материалах, обеспечивающих создание ракетно-космической техники и перспективных изделий других отраслей.

В рамках союзной научно-технической программы «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ») на 2016–2020 гг. отдел выполнил задание

«Разработать программный комплекс доставки и обработки текстовой научно-технической информации для формирования электронного банка данных новых технологий и материалов, обеспечивающих создание ракетно-космической техники и перспективных изделий других отраслей, конкурентоспособных на мировом рынке» (ответственный исполнитель – вед. науч. сотр. А. Г. Буравкин, исполнители: С. Ф. Липницкий, Л. Г. Зиновенкова, Г. Н. Свириденко, Л. В. Степура, Е. В. Медик, О. В. Мороз).

Созданный по заданию программный комплекс позволил реализовать следующие основные функции поддержки банка данных:

- многоязычный и предметно-ориентированный поиск тематической информации в сети Интернет и локальных базах данных;
- персонализированный поиск и мониторинг сети Интернет с учетом информационных потребностей пользователя;
- подготовку и создание аналитических отчетов по результатам веб-мониторинга;
- автоматический подбор документов-кандидатов для наполнения электронного банка данных;
- тематическое рубрицирование данных о новых технологиях и материалах, обеспечивающих создание ракетно-космической техники и перспективных изделий других отраслей.

С 2022 г. реализуется научно-техническая программа Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства» («Комплекс-СГ»), разработка, согласование и научно-организационное сопровождение которой возложены на отдел совместных программ космических и информационных технологий. В рамках программы сотрудники отдела выполняют следующие задания:

- «Разработать программный комплекс автоматизированного поиска и систематизации научно-технической информации для информационной поддержки технических решений и управленческой деятельности по реализации проектов и программ в области создания многоспутниковых группировок космических аппаратов малой размерности» (ответственный исполнитель – науч. сотр. Л. В. Степура, исполнители: В. А. Елисеев, Л. Г. Зиновенкова, С. А. Кореняко, Г. Н. Свириденко, Е. В. Котикова);

- «Разработать аппаратно-программный комплекс, реализующий технологию геодинамического мониторинга территории при прогнозировании и освоении месторождений нефти на основе данных дистанционного зондирования Земли» (ответственный исполнитель А. Ю. Сивенков, исполнители: Д. В. Морозов, Л. Г. Зиновенкова, И. А. Ляткевич) при участии Белорусского государственного университета.

В 2016–2020 гг. отдел принял участие в реализации подпрограммы 7 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «*Наукоемкие технологии и техника*» в рамках выполнения совместно с Белорусским государственным университетом задания «Разработка автоматизированной технологии подготовки регионального прогноза нефтегазоносности территории на основе комплексного анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и геолого-геофизической информации» (ответственный исполнитель – вед. науч. сотр. А. Г. Буравкин, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Е. С. Медик, О. В. Мороз, И. А. Ляткевич).

В результате выполнения задания создан опытный образец программно-информационного комплекса, реализующий автоматизированную технологию подготовки регионального прогноза нефтегазоносности территории на основе комплексного анализа данных ДЗЗ из космоса и геолого-геофизической информации, обладающий высокой информативностью и имеющий практическое значение при космоструктурном картировании нефтеперспективных объектов и оценке нефтегазоносности осадочных бассейнов. Созданная технология позволила устанавливать структурные закономерности платформенного чехла, определяющие условия образования и сохранения залежей углеводородов, и тем самым на основе данных ДЗЗ и геолого-геофизических исследований осуществлять подготовку регионального прогноза нефтегазоносности территории.



Коллектив отдела в 2014 г. Первый ряд (слева направо): Н. П. Дегтярев, А. А. Кравченко, Л. В. Степура, Т. В. Железнова, С. Ф. Липницкий. Второй ряд (слева направо): А. Г. Буравкин, В. В. Телегин, Г. Н. Свириденко, С. А. Коренько, А. В. Даниленко, Д. В. Прадун



Оргкомитет VII Белорусского космического конгресса в 2017 г.  
Первый ряд (слева направо): Т. И. Данилова, Л. В. Степура, Е. С. Медик, Л. Г. Зиновенкова.  
Второй ряд (слева направо): И. К. Стежко, В. В. Телегин, И. А. Ляткевич, С. А. Коренько, А. Г. Буравкин, В. А. Елисеев, С. Ф. Липницкий, Г. Н. Свириденко, Л. В. Орешкина, Е. С. Цветков

В настоящее время отдел совместно с ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» в рамках подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «*Научеёмкие технологии и техника*» на 2021–2025 гг. выполняет задание «Разработать технологию и программные средства мониторинга выбросов парниковых газов с торфяных месторождений Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа, с применением данных дистанционного зондирования Земли» (ответственный ис-

полнитель – зам. зав. отделом Д. В. Морозов, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Г. Н. Свириденко, И. А. Ляткевич).

Результаты выполнения задания направлены на совершенствование системы выбросов парниковых газов с торфяных месторождений, используемых для промышленной добычи торфа и их инвентаризации, данные которых являются основой для выполнения международных обязательств Республики Беларусь в части подготовки национальных сообщений для Секретариата Рамочной конвенции об изменении климата Организации Объединенных Наций и Киотского протокола, а также определения валовых выбросов парниковых газов и разработки национальных программных и стратегических документов в области адаптации к изменениям климата.

В рамках Государственной научно-технической программы «*Разработка и внедрение в отраслях экономики передовых технологий создания информационно-аналитических и информационно-коммуникационных систем*» на 2011–2015 гг. отделом выполнено задание «Создать трехмерные виртуальные реконструкции архитектурных объектов Брестской, Гродненской областей, Гомельского дворцово-паркового ансамбля, разработать технологию визуализации 3D-моделей на основе современных программно-технических средств» (ответственный исполнитель – науч. сотр. Д. В. Прадун, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Е. С. Медик).

В процессе реализации задания разработаны технология визуализации 3D-моделей архитектурных объектов и программный комплекс визуализации 3D-моделей архитектурных объектов в сети Интернет, который обеспечивает также интерактивное взаимодействие с пользователем: масштабирование 3D-моделей, поворот угла отображения, изменение угла обзора 3D-модели. Созданы виртуальные онлайн-реконструкции культурно-исторических памятников Брестской, Гродненской областей и Гомельского дворцово-паркового ансамбля.

В соответствии с *Перечнем мероприятий по развитию государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь на 2016–2018 годы и на перспективу до 2020 года в Национальной академии наук Беларуси* выполнено задание «Разработать и ввести в эксплуатацию систему автоматизированного реферирования многоязычных электронных массивов научно-технических публикаций» (научный руководитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, ответственный исполнитель – Л. В. Степура, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Г. Н. Свириденко, Е. В. Котикова).

Созданная в результате реализации задания система обеспечила автоматизированное реферирование, накопление и семантическое сжатие публикаций по сельскохозяйственной научной тематике, представленных в электронном формате в Белорусской сельскохозяйственной библиотеке им. И. С. Лупиновича НАН Беларуси (БелСХБ). Применение системы позволило существенно сократить время аналитической обработки архива публикаций библиотеки.

В рамках *Перечня научных исследований и разработок по развитию государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь на 2019–2021 годы и на перспективу до 2020 года в Национальной академии наук Беларуси* отделом реализовано задание «Разработать и ввести в эксплуатацию программный комплекс многопоточной обработки научной информации для сервисного обслуживания пользователей Белорусской сельскохозяйственной библиотеки» (научный руководитель – гл. науч. сотр. С. Ф. Липницкий, ответственный исполнитель – науч. сотр. Л. В. Степура, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Г. Н. Свириденко, Е. В. Котикова).

Созданный программный комплекс обеспечил автоматизацию многопоточной обработки научной информации в целях интеллектуализации сервисного обслуживания пользователей БелСХБ в части поиска, доставки и аналитической обработки научных интернет-публикаций аграрного профиля.

В настоящее время в соответствии с *Перечнем научных исследований и разработок по развитию государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь на 2021–2025 годы в Национальной академии наук Беларуси* отделом выполняется задание «Разработать программный комплекс инфометрической диагностики потока публикаций для обслуживания пользователей БелСХБ» (ответственный исполнитель – научный сотрудник Л. В. Степура, исполнители: Л. Г. Зиновенкова, Г. Н. Свириденко, Е. В. Котикова).

В результате внедрения программного комплекса в БелСХБ будут автоматизированы процессы обслуживания пользователей, способствующие повышению эффективности и качества информационного обеспечения научных исследований в области аграрных наук:

- получение и учет как разовых, так и постоянно действующих запросов отдельных исследователей на поиск и доставку реферативных и полнотекстовых документов по темам научных исследований;
- накопление полных текстов, отобранных в процессе интернет-мониторинга документов, в личном архиве пользователя;
- поиск научных публикаций и обновлений по заданной тематике в Интернете;
- генерация отчета с результатами интернет-мониторинга научно-технической информации;
- формирование инфографики.

В 2017–2018 гг. отделом был выполнен проект фундаментальных и прикладных научных исследований НАН Беларуси «Создание интерактивного интернет-портала "Виртуальный тур по заповедным территориям Беларуси" на основе научных исследований» (ответственный исполнитель – вед. науч. сотр. А. Г. Буравкин, исполнитель – Е. С. Медик).

В результате реализации проекта был создан программный комплекс интерактивного интернет-портала «Виртуальный тур по заповедным территориям Беларуси», позволяющий размещать в сети Интернет виртуальные онлайн-реконструкции созданных 3D-моделей, а также обеспечивать взаимосвязь и совмещение графической и текстовой информации в единой системе визуализации и интерактивного взаимодействия 3D-моделей с пользователем.

В целях повышения эффективности системы управления и реализации союзных программ космических исследований отделом разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная корпоративная информационная система для обеспечения процессов принятия решений по управлению жизненным циклом реализации союзных космических программ, а также методические материалы по подготовке заявочных и отчетных документов при разработке и реализации программных мероприятий. Это позволило оптимизировать деятельность исполнительных дирекций и их состав с учетом намеченных задач союзных космических программ и достижения планируемых результатов их реализации.

С 2003 г. на основе отдела были созданы организационные комитеты по подготовке и проведению I–VIII Белорусских космических конгрессов (Минск, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2014, 2017 и 2022 гг.), которые стали международными форумами для обсуждения актуальных проблем развития космической отрасли в Беларуси, России и сопредельных государствах, результатов реализации космических программ и проектов, а также установления деловых контактов профильных специалистов и ученых в космической области.

### Публикации

Сотрудниками отдела опубликовано более 140 научно-технических статей и докладов по направлениям деятельности отдела, а также три монографии:

1. Разработки Республики Беларусь в области исследования и использования космического пространства : информ. материалы // А. П. Войтович, В. С. Танаев, С. В. Абламейко [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси ; Науч.-исслед. об-ние «Кибернетика ; Ин-т техн. кибернетики ; под. ред. А. П. Войтовича. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – 28 с.

2. Коренько, С. А. Космические средства и технологии. Основные результаты реализации белорусской части научно-технической программы Союзного государства «Космос-НТ» / С. А. Коренько, О. И. Семенов, А. В. Тузиков. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2013. – 114 с.

3. Перспективные технические средства и технологии для развития космической отрасли: результаты реализации программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» («Мониторинг-СГ») ; ред. совет: М. И. Макаров, А. В. Тузиков, А. Н. Королев [и др.]. – Минск : Белорусская наука, 2019. – 557 с.

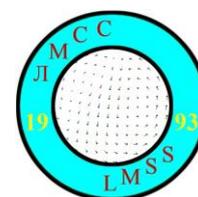
УДК 550.388.2

## О лаборатории моделирования самоорганизующихся систем

**Крот Александр Михайлович**

*заведующий лабораторией самоорганизующихся систем,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: alxkrot@newman.bas-net.by*

Лаборатория моделирования самоорганизующихся систем (ЛМСС) создана доктором технических наук А. М. Кротом 1 апреля 1993 г. на базе группы ученых из лаборатории имитационного моделирования, занимающихся анализом и моделированием дискретных динамических систем. ЛМСС – структурное подразделение ОИПИ НАН Беларуси, специализирующееся в области разработки и исследования моделей сложных динамических систем и процессов самоорганизации.



В течение всего периода своей деятельности в ЛМСС трудились от 6 до 15 научных сотрудников, в том числе один доктор наук (заведующий лабораторией, д-р техн. наук, профессор А. М. Крот) и восемь кандидатов наук (вед. науч. сотр., канд. техн. наук Е. Б. Минервина; науч. сотр., канд. техн. наук Б. Х. Абдурахманов; ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук В. Ф. Дайлюденко; ст. науч. сотр., канд. техн. наук В. М. Демко; ст. науч. сотр., канд. техн. наук М. Н. Долгих; науч. сотр., канд. физ.-мат. наук Н. А. Романовская; науч. сотр., канд. физ.-мат. наук В. А. Балдин; ст. науч. сотр., канд. техн. наук Г. А. Прокопович).

Указом Президента Республики Беларусь от 25 июля 2013 г. д-р техн. наук, профессор А. М. Крот был назначен на должность Первого заместителя Председателя ВАК, в которой работал до 25 июля 2016 г., одновременно оставаясь заведующим ЛМСС на общественных началах. В связи с необходимостью дальнейшего развития информационных технологий в области робототехники 18 ноября 2013 г. в ЛМСС был создан сектор «Робототехника». В его состав вошли три научных сотрудника ЛМСС, имеющих профильное инженерное образование в области разработки робототехнических комплексов. В декабре 2017 г. группа сотрудников сектора «Робототехника» выделилась в самостоятельную лабораторию робототехнических систем (заведующий лабораторией В. А. Сычев).

В настоящее время в ЛМСС работают восемь сотрудников: заведующий лабораторией, д-р техн. наук, профессор А. М. Крот; ст. науч. сотр., канд. техн. наук В. М. Демко; аспирант А. С. Шапкин; магистрант И. Э. Савиных; инженеры-программисты М. О. Фомин, А. С. Крамич, Е. И. Пехота и В. О. Басацкий.

**Основные направления деятельности.** Основным научным направлением ЛМСС является разработка и исследование моделей сложных динамических систем и процессов (нелинейных динамических систем с процессами самоорганизации). Реализация этого научного направления приводит к решению ряда задач:

- исследование фундаментальных вопросов и развитие теоретических основ сложных (самоорганизующихся) систем;
- разработка и исследование моделей сложных динамических систем, полученных на основе методов математического и имитационного моделирования;
- синтез новых алгоритмов нелинейного анализа и идентификации состояний сложных динамических систем;
- создание и развитие математических методов моделирования активных сред (в частности, космических газопылевых сред, аэрогидродинамических потоков, потоков заряженных частиц в ионосферной плазме, электрических импульсов в нервных волокнах) для исследования общих закономерностей возникновения, формирования и развития в них самоорганизующихся структур;

– разработка эффективных алгоритмов моделирования динамического поведения, диагностики и предсказания состояний сложных динамических объектов в машиностроении, космических исследованиях и медицине.

В настоящее время в ходе решения перечисленных задач выполняются следующие прикладные стратегические исследования:

– разработка методов и программно-аппаратных средств изучения волновых процессов и явлений в ионосфере с использованием зондирующих радиосигналов от спутниковых систем;

– разработка алгоритмических и программных средств автоматизированных систем управления динамическими испытаниями изделий машиностроения, а также автоматизированных систем цифровой обработки сигналов и изображений, внедренных на предприятиях России и Беларуси (1993–2002);

– развитие и применение компьютерных технологий численного моделирования и виртуального анализа аэрогидродинамических и электродинамических процессов в проточных частях реальных и проектируемых изделий машиностроения (2003–2016);

– разработка алгоритмических и программных средств анализа и моделирования волновых процессов и явлений в ионосфере на основе цифровой обработки зондирующих радиосигналов от спутниковых космических систем (2017–2026).

#### **Основные научные результаты.**

1. Разработана статистическая теория формирования гравитирующих космогонических тел, в рамках которой предложены модели и эволюционные уравнения статистической механики формирования гравитирующих космогонических тел:

– решена известная проблема гравитационной конденсации бесконечной распыленной космической материи на основе предложенной статистической модели антидиффузионного процесса, позволившая разрешить гравитационный парадокс для бесконечных однородных космических сред. Известно, что теория гравитационной неустойчивости Джинса не объясняет причину достижения критического значения длины волны возмущения, т. е. сам механизм возрастания длин волн возмущений в покоящейся однокомпонентной газовой среде. Между тем предложенная статистическая модель показала, что гравитационная неустойчивость газопылевого облака возникает в связи с возрастанием плотности массы конденсационных возмущений однокомпонентной космической газовой среды;

– в рамках разработанной статистической модели антидиффузионного процесса предложен новый закон распределения планетарных расстояний в Солнечной системе в зависимости от среднего значения удельного момента импульса сплошной среды в допланетном облаке. Предложенный закон обобщает знаменитый закон академика О. Ю. Шмидта. Кроме того, по сравнению с другими известными законами планетарных расстояний новый закон дает достаточно хорошую оценку наблюдаемых планетарных расстояний в Солнечной системе;

– выведено нелинейное времязависимое Шредингер-подобное волновое уравнение, описывающее возникающие нелинейные явления вследствие процессов самоорганизации в формирующемся космогоническом теле;

– выведен и обоснован закон звездного мироздания для внесолнечных планетарных систем, связывающий температуру, размер и массу каждой звезды. Анализ модифицированного закона звездного мироздания показал, что большая часть звезд соответствует категории идеальных (или классических) звезд (соответственно, внесолнечных планетарных систем) вне жесткой зависимости от их принадлежности к спектральным классам O, B, A, F, G, K, M, хотя имеется некоторая погрешность оценивания параметров звезд, зависящая от их спектральной принадлежности: наблюдается более низкая точность модифицированного закона звездного мироздания либо для очень ярких звезд, принадлежащих к спектральным классам высших порядков O, B и A, либо для наиболее тусклых звезд, принадлежащих к нижнему спектральному классу M или классу красных гигантов;

– выведен и обоснован комбинированный закон звездного мироздания и третьего закона Кеплера для внесолнечных планетарных систем и дана оценка на его основе параметров планетарных орбит;

– разработаны аналитические модели (конгломерационная модель «холодного синтеза» и термоэмиссионная модель «горячего синтеза») формирования протопланет в Солнечной и внесолнечных системах. Новая термоэмиссионная модель «горячего синтеза» объясняет известный парадокс Тер Хаара о неравномерном распределении момента импульса в нашей Солнечной системе.

2. Предложена теория матричной декомпозиции хаотических аттракторов в пространстве состояний сложных динамических систем, в рамках которой разработаны новые методы нелинейного анализа динамических систем:

– выведены аналитические выражения для декомпозиции операторов нелинейной динамической системы на основе векторно-матричных рядов в пространстве состояний;

– дается представление оператора сдвига по траекториям нелинейной динамической системы через соответствующие операторы сдвига по траекториям многомерных линейных динамических систем;

– развит количественный анализ известных аттракторов (Лоренца, Энона, Рёсслера, Фитц-Хью, Чжуа и др.) сложных динамических систем на основе предложенных матричных рядов;

– представлен метод оценивания характеристических показателей Ляпунова на основе теорий матричной декомпозиции;

– выполнен анализ динамических состояний нейронной сети Хопфилда с использованием матричной декомпозиции.

3. Разработан алгоритм определения минимальной размерности вложения аттрактора нелинейной динамической системы посредством локально-топологического анализа фазовых траекторий. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования топологической стабилизации для исследуемого аттрактора, показана эффективность представленного алгоритма в вычислительном аспекте (в среднем на порядок) по сравнению с известными корреляционно-топологическими алгоритмами (Грассберга – Прокаччиа, Шустера и др.).

4. Разработан оригинальный подход к распознаванию хаотических сигналов с использованием нелинейной декомпозиции сигналов посредством оценивания ядер Винера. В частности, предложено новое решение проблемы распознавания речевых фонем на основе расчета ядер Винера и синтезирована структура банка цифровых нелинейных фильтров для распознавания речевых фонем.

5. Построена новая аналитическая модель, основанная на системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и описывающая переход от ламинарного режима к турбулентному через периодический, а также возникающие при этом переходы динамические состояния жидкости в гидродинамической системе Куэтта – Тейлора (вращающихся коаксиальных цилиндров). Показано ее применение для исследования аэродинамических режимов функционирования роторных механизмов в проточных частях машиностроительных конструкций.

6. Разработана эволюционная модель хаотических волновых процессов в сложных динамических системах на основе теории матричной декомпозиции операторов нелинейных систем. Предложенная модель показала, что эффект самоорганизации в сложных системах различной физической природы заключается во взаимодействии нелинейных процессов высших порядков, приводящем к стабилизации (к конечной величине) амплитуды хаотического волнового процесса. Математически это выражается в синхронном «противодействии» нелинейных процессов четных и нечетных порядков. Векторно-матричная модель позволила найти более общие условия возникновения и эволюции хаотических волновых процессов по сравнению с моделью начальной турбулентности Л. Д. Ландау и, как следствие, объяснить возникновение согласованных нелинейных явлений в сложных системах.

#### **Завершенные разработки.**

1. Алгоритмические и программные средства цифровой спектральной обработки сигналов и изображений внедрены в состав автоматизированных систем:

– управления динамическими испытаниями машиностроительных конструкций на Волжском автомобильном заводе «АвтоВАЗ» (Тольятти);

– цифровой фильтрации, сжатия и корреляционно-экстремальной привязки полутоновых изображений в НПО «Точные приборы» и НПО «Геофизика» (Москва);

– двумерного цифрового спектрального анализа радиоастрономических изображений в Институте прикладной астрономии (Санкт-Петербург);

– спектральной обработки информации в реальном масштабе времени в НИИ «Алгоритм» УзНПО «Кибернетика» (Ташкент).

2. Развитие и применение компьютерных технологий численного моделирования и виртуального анализа аэрогидродинамических процессов в проточных частях реальных и проектируемых изделий машиностроения, внедренных на промышленных предприятиях Республики Беларусь:

– программное обеспечение вычислительной аэродинамики для компьютерного моделирования течений воздушных и газовых потоков в корпусах турбокомпрессоров ТКР6 и ТКР9 на РУП «Борисовский завод агрегатов»;

– программное обеспечение вычислительной аэродинамики для компьютерного моделирования движения технологической массы (твердых частиц) в воздушных потоках внутри механизмов кормоуборочного комбайна КВК-800 на РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике» (Гомель);

– программное обеспечение вычислительной гидродинамики для компьютерного моделирования на вращающихся расчетных сетках гидродинамических потоков, возникающих в рабочей области гидротрансформатора ТГД-340А на ОАО «Амкодор» (Минск);

– программное обеспечение вычислительной аэродинамики для компьютерного моделирования и анализа потоков сплошной среды с целью совершенствования системы очистки зерна и транспортировки зерновой массы в зерноуборочном комбайне КЗС-1218 на РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике» (Гомель);

– программное обеспечение вычислительной гидродинамики для компьютерного моделирования пароводяных потоков внутри рабочей камеры микротурбины и оценивания коэффициента полезного действия с целью усовершенствования конструкции турбоагрегата Р-0,25–1,4–25–250/0,6 на ООО «Промпривод» (Минск);

– программное обеспечение вычислительной аэродинамики для компьютерного моделирования и анализа потоков частиц в сплошной среде с целью совершенствования молотильно-сепарирующего устройства и транспортировки зерновой массы в зерноуборочном комбайне на РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике» (Гомель).

Для демонстрации результатов деятельности и поиска новых партнеров ЛМСС принимала участие в международных специализированных выставках: MILEX-2005, ТИБО-2007 (с экспонатом «Вычислительная аэрогидродинамика проточных частей машиностроительных конструкций»), MILEX-2017, а также в Молодежном инновационном форуме «ИНТРИ»–2010 (с экспонатом «Разработка интеллектуальной системы управления мобильным роботом для мониторинга помещений»).

3. Разработка алгоритмических и программных средств анализа и моделирования волновых процессов и явлений в ионосфере на основе цифровой обработки зондирующих радиосигналов от спутниковых космических систем.

С 2017 г. в ЛМСС развивается новое научное направление – методы и программно-аппаратные средства исследования волновых процессов и явлений в ионосферной плазме с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем. Предварительные исследования в области моделирования электродинамических процессов в плазме были выполнены в рамках проекта БРФФИ № Ф17-122 «Аналитическое и компьютерное моделирование нелинейных процессов, возникающих в устройствах плазменной эмиссионной электроники» (2017–2019 гг.), а с 2020 г. в ЛМСС выполнялся совместный российско-белорусский проект БРФФИ № Ф20Р-329 «Теоретические основы исследования волновых процессов и явлений в ионосфере с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем» (2020–2022 гг.) в кооперации с Самарским национальным исследовательским университетом (НИУ) им. академика С. П. Королева. На сайте Самарского НИУ (<https://ssau.ru>) содержится информация о научных исследованиях в рамках данного проекта. В частности, отмечается, что разрабатываются методы и средства обработки и преобразования информации, поступающей от систем ГЛОНАСС и GPS, с помощью которых можно построить динамические модели состояния ионосферы. Ре-

шение этой задачи важно для прогнозирования возможных перебоев в работе систем радиосвязи. Кроме того, понимание природы физических процессов, происходящих в ионосфере, открывает возможности для новых перспективных технологий передачи информации. Научным руководителем проекта со стороны Самарского НИУ стал заведующий межвузовской кафедрой космических исследований, доктор технических наук, профессор Игорь Белоконов, со стороны ОИПИ НАН Беларуси – заведующий ЛМСС, доктор технических наук, профессор Александр Крот. *«Предполагается исследование волновых процессов и выявление локальных флуктуаций плотности электронной концентрации, что позволит расширить знания о механизмах процессов, происходящих в ионосфере. Это первый совместный проект представителей научных сообществ России и Беларуси, который будет реализован в Самарском университете. Работы по этому гранту будут востребованы при реализации проекта консорциума российских вузов по созданию группировки наноспутников для изучения ионосферы, организатором которого является Самарский университет»*, – отметил И. Белоконов. Как продолжение и дальнейшее развитие проекта БРФФИ № Ф20Р-329 в настоящее время в ЛМСС реализуются два договора:

№ 220/12 на выполнение ОКР «Разработать алгоритмические и программные средства обработки радиотомографических данных низкоорбитального контроля ионосферы» (2022–2025 гг.), заключенный с УП «Геоинформационные системы» в рамках проекта «Разработать космическую систему радиометрического контроля околоземного пространства на базе малого космического аппарата и специализированных наземных средств» по мероприятию 8 подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» ГП «Научоемкие технологии и техника»;

№ 9СГ3.3–220 на выполнение НИР по заданию «Разработать аппаратно-программный и алгоритмический комплекс радиометрического анализа динамических состояний ионосферы» (2023–2026 гг.) в рамках мероприятия 3.3 НТП Союзного государства «Комплекс-СГ», предназначенный для радиометрического анализа динамических состояний ионосферы с целью оценки текущих данных и прогнозирования результатов гелио- и геофизической активности.

**Международные научные контакты.** В 1997–2000 гг. в ЛМСС был успешно выполнен крупный международный научный проект МНТЦ В-95 "Theory and methods of discrete dynamical systems in digital signal processing applications", профинансированный США и Швецией (руководитель проекта – профессор А. М. Крот, коллабораторы проекта – лауреат Нобелевской премии И. Пригожин (Бельгия/США), профессор М. Веттэрли (США/Швейцария), профессор С. Холм (Норвегия) и профессор П. Дюамель (Франция)).

Сотрудники ЛМСС активно участвуют в различных международных конференциях, проводимых такими известными научными организациями, как AIAA, IAF, IEEE, SPIE, EURASIP, URSI, ASME, EGU, IAU (среди них Генеральная ассамблея EGU, конгрессы COSPAR, IAC и симпозиум AeroSense, конференции EUSIPCO, Chaos, MeleCon, ICECS, IASTED, ANNIE, DSP, MAVEBA и др.). Заведующий ЛМСС, д-р техн. наук, профессор А. М. Крот был докладчиком, членом программных комитетов и руководителем сессий ряда международных симпозиумов и конференций, проводимых под эгидой международных научных обществ за рубежом: в США (1998, 1999, 2000, 2001), Греции (1997, 1998, 2002), Италии (1999, 2001), Германии (1998, 2006, 2009, 2016), Финляндии (2000), Кипре (2000), Дании (2002), Австрии (2006, 2009). В частности, в период с 1997 по 2003 г. он был членом программных комитетов и руководителем сессий конференций:

- 13<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup> International Conferences on Digital Signal Processing (DSP), Greece, 1997, 2002;
- 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> IMACS/IEEE International Conferences on Circuits, Systems and Computers, Greece, 1998, 1999;
- 10<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference (MeleCon), Cyprus, 2000;
- 14<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup> International Symposium AeroSense, Orlando, Florida, USA, 2000, 2001;
- 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> International Workshops on Models and Analysis of Vocal Emission for Biomedical Applications (MAVEBA), Florence, Italy, 2001, 2003.



Д-р техн. наук, профессор А. М. Крот – руководитель сессии и докладчик на 13<sup>th</sup> International Conferences on Digital Signal Processing (DSP), 1–6 июля 1997, о. Санторини, г. Фира, Греция



Участники IX European Signal Processing Conference (EUSIPCO-98), 8–11 сент. 1998, о. Родос, Греция (слева направо: д-р техн. наук, профессор А. М. Крот; д-р, профессор А. Скодрас (Греция), вед. науч. сотр., канд. техн. наук Е. Б. Минервина и канд. физ.-мат. наук, доцент БГУ Е. И. Бовбель)



Профессор В. Н. Касьянов (Новосибирск, СО РАН) и профессор А. М. Крот – руководители сессии и докладчики на 2<sup>nd</sup> IMACS/ IEEE International Conference on Circuits, Systems and Computers (IMACS-CSC'98), 26–29 окт. 1998, Афины, Греция



Д-р техн. наук, профессор А. М. Крот – член программного комитета и докладчик на 14<sup>th</sup> International Symposium AeroSense, 24–28 апр. 2000, Орlando, шт. Флорида, США





Участники 10<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference (Meleson 2000), 27 мая – 1 июня 2000, о. Кипр, г. Лимассол, г. Никосия (слева направо: вед. науч. сотр., канд. техн. наук Е. Б. Минервина; д-р техн. наук, профессор А. М. Крот и канд. филол. наук, доцент П. П. Ткачева)



Профессор А. М. Крот и доцент П. П. Ткачева – докладчики на Международной школе-семинаре "Vocal Emissions for Biomedical Applications" (MAVEBA), 12–18 сент. 2001, Флоренция, Италия



Профессор А. Крот обсуждает с коллегами возможности нового турбокомпрессора // СБ. Беларусь сегодня. – 2005. – 15 окт. – С. 16–17. (слева направо: вед. науч. сотр., канд. техн. наук Е. Б. Минервина, канд. филол. наук, доцент П. П. Ткачева и д-р техн. наук, профессор А. М. Крот)



На XIV Международной специализированной выставке ТИБО-2007, 24–27 апр. 2007, Минск, с экспонатом «Вычислительная аэрогидродинамика проточных частей машиностроительных конструкций» (слева направо: науч. сотр. А. М. Криштофик и сотрудники ЛМСС: д-р техн. наук, профессор А. М. Крот; канд. филол. наук, доцент П. П. Ткачева; ст. науч. сотр., канд. техн. наук В. М. Демко и науч. сотр., канд. физ.-мат. наук В. А. Балдин)



Доктор технических наук Александр Крот и аспирант Александр Калиновский в сотрудничестве с российскими коллегами участвуют в реализации союзных программ // СБ. Беларусь сегодня. Вкладка «Союз Беларусь–Россия». – 2009. – 12 мар. – С. 7.



Д-р техн. наук, профессор А. М. Крот – организатор Международной научной сессии PS9 "Extrasolar planets and planet formation, exoplanetary magnetospheres and radio emissions" под эгидой European Geosciences Union General Assembly, 19–24 апр. 2009, Вена, Австрия



Д-р техн. наук, профессор А. М. Крот – член организационного комитета и докладчик на Международном симпозиуме "Satellite & Space Missions" – Satellite-2016, 21–23 июля 2016, Берлин, Германия



В период с 2006 по 2022 г. А. М. Крот являлся *организатором* международных научных сессий в рамках Генеральной ассамблеи Европейского союза геонаук (European Geosciences Union General Assembly) и Европейского конгресса планетарных наук (European Planetary Science Congress):

- PS 15 "Models of Solar system forming" (2–7 апреля 2006 г., Вена, Австрия);
- PS7.1 "Extrasolar Planets and Planet Formation" (16–20 апреля 2007 г., Вена, Австрия);
- PS 8 "Extrasolar Planets and Planet Formation" (13–18 апреля 2008 г., Вена, Австрия);
- PS9 "Extrasolar planets and planet formation, exoplanetary magnetospheres and radio emissions" (19–24 апреля 2009 г., Вена, Австрия);

ON1 "Planetary formation and the origin of the Solar System" (18–22 сентября 2006 г., Берлин, Германия);

OG1 "Origin and Evolution" (14–18 сентября 2009 г., Потсдам, Германия);

*членом программных и организационных комитетов* международных научно-технических конференций и симпозиумов:

– членом организационного комитета Международной школы-семинара "Vocal Emissions for Biomedical Applications" (Флорентийский университет, Италия);

– членом программного комитета Международного симпозиума "The Issues of Calculation Optimization" (Институт кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины, Киев);

– членом организационного комитета Международного симпозиума "Satellite&Space Missions", в частности "2<sup>nd</sup> International Conference and Exhibition on Satellite&Space Missions" – Satellite-2016 (Берлин, Германия, 21–23 июля 2016 г.);

– членом программного комитета International Conference on Digital Signal Processing (DSP) (Лондон, Великобритания, 25–29 августа 2017 г.),

а также *руководителем сессий* международных научно-технических конференций, проводимых под эгидой международных организаций IEEE, EGU, IAU и *докладчиком* на многих международных научно-технических конференциях и симпозиумах.

**Участие в подготовке специалистов.** Заведующий ЛМСС, д-р техн. наук А. М. Крот работал по совместительству в должности профессора в БГУИР (с 1993 по 1997 г.) и БГУ (с 1996 по 1998 г.). В 1997 г. ему присвоено ученое звание профессора. С 2008 по 2016 г. работал по совместительству в должности профессора кафедры математической физики и кафедры компьютерных технологий физики БГУ, где читал курсы лекций по дисциплинам «Основы аналитической и компьютерной аэрогидродинамики» и «Методы математического моделирования и анализа сложных динамических систем».

Под его научным руководством были подготовлены восемь кандидатов наук:

канд. техн. наук Е. Б. Минервина (диссертация «Разработка эффективных алгоритмов спектрального анализа и генерирования процессов в системах управления испытаниями», 1989 г.);

канд. техн. наук Б. Х. Абдурахманов (диссертация «Разработка и применение методов двумерной цифровой фильтрации в системах идентификации изображений», 1992 г.);

канд. техн. наук М. Н. Долгих (диссертация «Развитие и реализация быстрых алгоритмов дискретных ортогональных преобразований с рекурсивной структурой в системах обработки изображений», 1993 г.);

канд. физ.-мат. наук Н. А. Романовская (диссертация «Разработка быстрых алгоритмов дискретных преобразований и сверток на основе алгебраического подхода в задачах сжатия и цифровой фильтрации», 1996 г.);

канд. физ.-мат. наук В. Ф. Дайлюденко (диссертация «Построение математических моделей процессов самоорганизации в активных средах для задач обработки экспериментальных данных», 1997 г.);

канд. техн. наук В. М. Демко (диссертация «Быстрые алгоритмы собственных преобразований процессов в цифровых системах управления и обработки сигналов», 2001 г.);

канд. физ.-мат. наук В. А. Балдин (диссертация «Модели образования аэрогидродинамических структур и их аттракторное представление в задачах анализа и компьютерного моделирования течений с кривизной линией тока», 2010 г.);

канд. техн. наук Г. А. Прокопович (диссертация «Нейросетевые модели интеллектуальных систем управления робототехническими аппаратами», 2013 г.).

Подготовлена кандидатская диссертация девятого ученика В. А. Сычева. В настоящее время А. М. Крот руководит аспирантом (А. С. Шапкин), магистрантом (И. Э. Савиных) и тремя соискателями (В. А. Сычев, А. Г. Иванов, В. С. Кожух).

## Публикации

### Монографии

1. Крот, А. М. Дискретные модели динамических систем на основе полиномиальной алгебры / А. М. Крот. – Минск : Наука і тэхніка, 1990. – 312 с.

2. Крот, А. М. Быстрые алгоритмы и программы цифровой спектральной обработки сигналов и изображений / А. М. Крот, Е. Б. Минервина. – Минск : Наука і тэхніка, 1995. – 407 с.

3. Крот, А. М. Статистическая теория формирования гравитирующих космогонических тел / А. М. Крот. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 448 с.

4. Krot, A. M. A Statistical Theory of Gravitating Body Formation in Extrasolar Systems / A. M. Krot. – Newcastle upon Tyne (UK) : Cambridge Scholars Publishing, 2021. – 817 p.



### Статьи

1. Крот, А. М. О классе дискретных квазистационарных линейных динамических систем / А. М. Крот // Доклады Академии наук СССР. – 1990. – Т. 313, № 6. – С. 1376–1380. (Переиздана в США: Krot, A. M. On a class of discrete quasistationary linear dynamic systems / A. M. Krot // Soviet Physics Doklady. – 1990. – Vol. 35, no. 8. – P. 711–713.)
2. Крот, А. М. О мультипликативной сложности билинейных форм, для которых преобразование Вандермонда является собственным / А. М. Крот // Доклады Академии наук СССР. – 1990. – Т. 314, № 6. – С. 1312–1315. (Переиздана в США: Krot, A. M. On the multiplicative complexity of bilinear forms for which the Vandermonde transformation is an eigentransformation / A. M. Krot // Soviet Mathematics Doklady. – 1991. – Vol. 42, no. 2. – P. 646–650.)
3. Крот, А. М. Об одном классе операторов обобщенного сдвига в теории сигналов и систем / А. М. Крот // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31, № 8. – С. 1563–1570. (Переиздана в США: Krot, A. M. On a class of generalized shift operators in the theory of signals and systems / A. M. Krot // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1986. – Vol. 31, no. 12. – P. 110–118.)
4. Крот, А. М. Синтез алгоритмов дискретного преобразования Фурье для действительных последовательностей на основе полиномиальной алгебры / А. М. Крот, Е. Б. Минервина // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1987. – Т. 32, № 5. – С. 1217–1229. (Переиздана в США: Krot, A. M. Synthesis of digital Fourier transformation algorithms for real sequences on the basis of polynomial algebra / A. M. Krot, H. B. Minervina // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1987. – Vol. 32, no. 11. – P. 9–19.)
5. Крот, А. М. Анализ линейных динамических систем на основе полиномиальных преобразований числовых последовательностей / А. М. Крот // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. 33, № 7. – С. 1458–1466. (Переиздана в США: Krot, A. M. Analysis of linear dynamic systems based on polynomial transformations of numerical sequences / A. M. Krot // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1989. – Vol. 34, no. 1. – P. 6–13.)
6. Крот, А. М. Об одном классе дискретных случайных процессов, нестационарных относительно оператора обобщенного сдвига / А. М. Крот // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. 33, № 12. – С. 2515–2523. (Переиздана в США: Krot, A. M. Class of discrete random processes, nonstationary relative to a generalized shift operator / A. M. Krot // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1989. – Vol. 34, no. 8. – P. 23–31.)
7. Крот, А. М. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье для действительных и эрмитово-симметричных последовательностей / А. М. Крот, Е. Б. Минервина // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34, № 2. – С. 369–376. (Переиздана в США: Krot, A. M. Fast Fourier transform algorithms for the real and Hermitian-symmetrical sequences / A. M. Krot, H. B. Minervina // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1990. – Vol. 34, no. 12. – P. 122–129.)
8. Крот, А. М. Метод собственных преобразований в различных полях для вычисления циклических сверток и дискретного преобразования Фурье / А. М. Крот // АН СССР. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Т. 29, № 5. – С. 675–692. (Переиздана в Великобритании: Krot, A. M. The method of eigentransforms in different fields for computing cyclic convolution and discrete Fourier transforms / A. M. Krot // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1989. – Vol. 29, no. 3. – P. 23–34.)

9. Крот, А. М. Синтез алгоритмов БПФ по расщепляемому основанию для действительных и эрмитово-симметричных последовательностей / А. М. Крот, Е. Б. Минервина // Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 32, № 12. – С. 12–17. (Переиздана в США: Krot, A. M. Synthesis of fast-Fourier-transform (FFT) split-radix algorithms for real-valued and Hermite-symmetrical series / A. M. Krot, H. B. Minervina // Radioelectronics and Communication Systems. – 1989. – Vol. 32, no. 12. – P. 10–15.)

10. Крот, А. М. Синтез быстрых алгоритмов собственных преобразований дискретных сверток в рациональном и действительном полях / А. М. Крот // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 2. – С. 372–381. (Переиздана в США: Krot, A. M. Synthesis of fast proper transformation algorithms for discrete convolution in rational and real fields / A. M. Krot // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1990. – No. 15. – P. 16–25.)

11. Крот, А. М. Единый подход к вычислению сверток и дискретного преобразования Фурье на основе собственных преобразований в рациональном и действительном полях / А. М. Крот // АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 4. – С. 805–815. (Переиздана в США: Krot, A. M. A Unified approach to calculating convolutions and the discrete Fourier transform based on proper transforms in rational and real fields / A. M. Krot // Soviet Journal of Communications Technology and Electronics. – 1991. – No. 2. – P. 26–34.)

12. Крот, А. М. О вычислительной сложности обобщенных  $K_N$ -сверток и алгоритмов быстрого преобразования Вандермонда / А. М. Крот // АН СССР. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 11. – С. 1625–1637. (Переиздана в Великобритании: Krot, A. M. Computational complexity of generalized  $K_N$ -convolutions and the fast Vandermonde transform algorithm / A. M. Krot // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1990. – Vol. 30, no. 6. – P. 17–26.)

13. Krot, A. M. Comment: Conjugate pair fast Fourier transform / A. M. Krot, H. B. Minervina // Electronics Letters. – 1992. – Vol. 28, no. 10. – P. 1143–1144.

14. Крот, А. М. Быстрый алгоритм вычисления обратной свертки для восстановления сигналов и изображений / А. М. Крот, А. Т. Касько, Е. Б. Минервина // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – Т. 36, № 2. – С. 164–175. (Переиздана в Великобритании: Krot, A. M. A fast algorithm for calculating the inverse convolution for signal and image reconstruction / A. M. Krot, A. T. Kas'ko, H. B. Minervina // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1996. – Vol. 36, no. 2. – P. 269–277.)

15. Крот, А. М. Синтез быстрых алгоритмов для решения задач оптимального дискретного управления методом полиномиальных уравнений / А. М. Крот // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 8. – С. 22–35. (Переиздана в США: Krot, A. M. Synthesizing fast algorithms for optimal discrete control by the method of polynomial equations / A. M. Krot // Automation and Remote Control. – 1996. – Vol. 57, no. 8. – P. 1079–1090.)

16. Krot, A. M. New approach to speech signal recognition using nonlinear signal decomposition by measuring Wiener kernels / A. M. Krot, P. P. Tkachova, B. A. Goncharov // Smart Engineering System Design. – 2002. – Vol. 4. – P. 265–276.

17. Krot, A. M. The development of model for boundary layers past a concave wall with usage of nonlinear dynamics methods / A. M. Krot, V. A. Baldin, H. B. Minervina // Advances in Space Research. – 2006. – Vol. 37, no. 3. – P. 501–506.

18. Krot, A. M. A statistical approach to investigate the formation of the solar system / A. M. Krot // Chaos, Solitons and Fractals. – 2009. – Vol. 41, no. 3. – P. 1481–1500.

19. Krot, A. M. On the principal difficulties and ways to their solution in the theory of gravitational condensation of infinitely distributed dust substance / A. M. Krot // Proc. of IAG General Assembly in the book "Observing our Changing Earth" / ed. M. G. Sideris. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – Vol. 133. – P. 283–292.

20. Krot, A. M. On the universal stellar law for extrasolar systems / A. M. Krot // Planetary and Space Science. – 2014. – Vol. 101C. – P. 12–26.

21. Krot, A. M. A model of stabilization of chaotic wave processes in complex dynamical systems from the point of view of the matrix decomposition theory / A. M. Krot // Chapter in the book "Springer Proc. in Complexity : 13th Chaotic Modeling and Simulation Intern. Conf. (CHAOS 2020)" / ed.: C. H. Skiadas, Y. Dimotikalis. – Springer, Cham, 2021. – Ch. 32. – P. 413–429. – DOI: 10.1007/978-3-030-70795-8\_32.

22. Krot, A. M. On the analytical models of protoplanetary formation in extrasolar systems / A. M. Krot // Space: Science & Technology. – 2022. – Vol. 2022, article ID 9862389. – 19 p. – DOI: 10.34133/2022/9862389.

23. Krot, A. M. The generalized nonlinear Schrödinger-like equation of cosmogonical body forming: Justification and determination of its particular solutions / A. M. Krot // Partial Differential Equations in Applied Mathematics. – 2022. – Vol. 5 (June), ID 100376. – 13 p. – DOI: 10.1016/j.padiff.2022.100376.

УДК 353.5

## Становление и развитие «умных регионов»

**Кругликов Сергей Владимирович**

*генеральный директор ОИПИ НАН Беларуси,  
доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент  
E-mail: kruglikov\_s@newman.bas-net.by*

**Потетенко Сергей Викторович**

*заведующий центром сопровождения цифрового развития НАН Беларуси –  
заведующий отделом научно-методического обеспечения цифрового развития  
E-mail: digital@newman.bas-net.by*

Цифровое развитие экономики и социальной сферы сегодня является приоритетным направлением в Республике Беларусь в целях повышения конкурентоспособности страны на мировом рынке и создания благоприятных условий жизни граждан. Президентом Республики Беларусь отмечено, что «В современном мире высокие технологии – важная движущая сила развития экономики и улучшения качества жизни населения. Цифровая трансформация всех сфер современного общества является одним из национальных приоритетов Беларуси» [1].

Один из основных мировых трендов в области цифрового развития – концепция Smart City (умного города), подразумевающая обустройство городов, в которых управлением городской инфраструктуры занимаются технологии. Smart City представляет собой взаимосвязанную систему коммуникативных и информационных технологий, создающих пространство, где всем комфортно и безопасно.

Понятие Smart City стало широко известно в 2008 г., когда компания IBM представила схему построения новых городов в рамках программы «Умная планета», предназначенной обеспечить высокий уровень жизни населения, количество которого постоянно растет. Идею, представленную IBM, сразу же подхватили многие IT-компании.

Концепция Smart City особенно популярна в высокоурбанизированной среде, ее по всему миру внедряют мегаполисы: Нью-Йорк, Сингапур, Барселона, Токио, Москва, Амстердам и десятки других. Такие страны, как Южная Корея, Китай и ОАЭ, стали первопроходцами и начали активно развивать эту концепцию. Первым построенным Smart City является южнокорейский город Сонгдо. Сегодня программа реализуется во многих уголках мира. Рейтинг «умных городов» ежегодно составляется Институтом развития менеджмента в сотрудничестве со Всемирной организацией «умных» устойчивых городов, базирующейся в Сеуле, Южная Корея. Они оценивают города по технологическим, экономическим и социальным критериям (например, качеству жизни, окружающей среде и инклюзивности) на основе данных, проанализированных исследователями, а также ответов 120 жителей каждого города, выставляя значение индекса. Фактически индекс «умных городов» на самом деле показывает, насколько «умны» городские власти в поддержании и улучшении качества жизни жителей и прочности их экономики. Исследование дает представление о том, как инфраструктура и технологии, доступные в городе, влияют на его благоустройство и качество жизни горожан, путем выставления оценки в следующих категориях:

- здоровье и безопасность (санитария, переработка отходов, общественная безопасность, загрязнение воздуха, медицинские услуги, стоимость аренды жилья);
- мобильность (дорожное движение и общественный транспорт);
- активность (зеленые насаждения, культурные мероприятия);
- возможности (качество школ и высшего образования, насколько легко найти работу, насколько город гостеприимен для меньшинств);
- управление (доступность государственных услуг, коррупция, демократические права).

Городам присваивался балл по каждому разделу, а также оценивалась эффективность использования технологий и инноваций во всех категориях. Каждому городу был присвоен балл от ААА до D. Города, показавшие хорошие результаты в списке, также поддерживают инициативы, направленные на повышение общего качества жизни населения.

Топ-10 «умных городов» согласно индексу «умных городов» 2024 г. [2]:

Цюрих, Швейцария;

Осло, Норвегия;

Канберра, Австралия;

Женева, Швейцария;

Сингапур;

Копенгаген, Дания;

Лозанна, Швейцария;

Лондон, Англия;

Хельсинки, Финляндия;

Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты.

В 2024 г. Цюрих пятый год подряд был назван самым «умным городом» мира, получив общую оценку ААА, частные оценки ААА за физическую инфраструктуру самого города и оценку АА за то, как город использует технологии для улучшения жизни жителей.

Цюриху, занявшему первое место в рейтинге, помогли высокие оценки за здоровье и безопасность, возможности, активность и управление. Однако в некоторых областях, таких как дорожное движение и наличие доступного жилья, еще есть проблемы. Например, отмечена недостаточность некоторых технологических факторов: снижение загруженности дорог, эффективность совместного использования автомобилей, уменьшение загрязнения воздуха, простота открытия нового бизнеса в Интернете и снижение уровня коррупции благодаря прозрачности правительства в Интернете.

За последние годы в Цюрихе реализован ряд серьезных нововведений. Город провел испытания беспилотных шаттлов, которые планируются к вводу в дополнение к общественному транспорту, ввел систему объединения поездок по запросу в одном транспортном средстве. В помощь домовладельцам была запущена информационная платформа EnerGIS, где собраны данные об источниках энергии, доступных и планируемых, а также вариантах их подключения. Цифровое решение объединило всех участников перехода на возобновляемые источники энергии и экологически чистые энергетические сети, которые будут использовать тепло даже от очищенных сточных вод.

Оцифровано и управление водными ресурсами города. Сеть IoT-датчиков LoRaWAN для постоянного мониторинга качества воды собирает данные о ее физических и химических свойствах, таких как уровень pH, температура, концентрация загрязняющих веществ и кислородное насыщение. «Умные» системы позволяют моментально выявлять источники загрязнений и оперативно принимать меры по их устранению. Помимо этого, система помогает прогнозировать экологические риски, например цветение водорослей.

Интересна система зеленых крыш (рис. 1) в Цюрихе, которые не только украшают здания, но и улучшают микроклимат, поглощая углекислый газ и снижая температуру воздуха в жаркие дни. Также они снижают нагрузку на кондиционирование, создают приятные глазу природные островки в центре города. Зеленые крыши задерживают дождевую воду, уменьшая пиковую нагрузку на городскую канализационную систему и предотвращая наводнения. Кроме того, зеленые покрытия кровли способствуют биоразнообразию, создавая места обитания для различных видов растений и животных, предоставляют площадки для организации городского пчеловодства. В долгосрочной перспективе зеленые крыши не только улучшат экологическую обстановку, но и сделают город более устойчивым к изменениям климата.

Вышеуказанные решения в рамках единой системы управления «умным» Цюрихом (рис. 2) объединяет Smart City Zurich – платформа для территориального планирования, цифрового строительства, управления городскими ресурсами, «умным» освещением, парковками и мусорными отходами. На этой платформе доступен сервис HoloPlanning для проектирования и строительства, позволяющий видеть будущие объекты недвижимости с помощью VR-очков и циф-

ровых моделей, виртуально прогуливаться по зданию, которое находится еще только на стадии проектирования. Искусственный интеллект предсказывает угрозы квартирных краж, и жителям не нужно переживать, если они оставят дверь открытой.



Рис. 1. Система зеленых крыш

Цюрих уделяет большое внимание развитию человеческого капитала, привлекая талантливых специалистов со всего мира, создавая благоприятную среду для инноваций и предпринимательства. В нем расположены ведущие университеты и исследовательские центры, которые активно сотрудничают с бизнесом, способствуя появлению новых технологий и решений. Так, в настоящее время в городе расположены Федеральная политехническая высшая школа Цюриха (включая Институт робототехники и интеллектуальных систем), офисы компаний Boston Dynamics AI Institute (предприятие из США, которое разрабатывает и продает роботов «завтрашнего дня»), Open AI (разработчик Chat-GPT), Google, Apple, Disney, Huawei, Microsoft, Meta и ряд других IT-компаний, что фактически превращает Цюрих в мировую столицу искусственного интеллекта.

Цюрих является международным банковским форпостом и вместе с Сингапуром – самым дорогим городом для жизни из всех «умных городов» в рейтинге. Одно из важнейших преимуществ этого города, как и всей Швейцарии, в Западной Европе – стабильное и либеральное законодательство. Граждане Швейцарии сами решают, какие нормы права у них действуют, в то время как в странах Европейского союза из-за потока непродуманных решений еврбюрократии уже давно нет правовой определенности.



Рис. 2. Система управления «умным» Цюрихом

Осло и Канберра заняли следующие места на пьедестале почета в 2024 г., Женева продемонстрировала наибольшее улучшение в топ-10, поднявшись с девятого места в 2023 г. на четвертое в 2024 г. Рейтинг города Лозанна в этом году, напротив, снизился, он опустился на седьмое место, уступив Сингапуру и Копенгагену.

Примечательно, что впервые с момента создания индекса в 2019 г. в топ-20 отсутствуют города Северной Америки. IMD отмечает, что они регрессировали в 2024 г., в основном из-за «недовольства их жителей». Наиболее высокий рейтинг среди городов США в 2024 г. получил Нью-Йорк, занявший 34-е место, за ним следуют Бостон на 36-м и Вашингтон на 50-м месте. В то время как европейские города доминируют в этом списке, азиатские города также набирают обороты.

Пять самых «умных городов» Азии:

Сингапур (5-е место);

Пекин (13-е место);

Тайбэй (16-е);

Сеул (17-е);

Шанхай (19-е).

С момента создания индекса в 2019 г. Сингапур неизменно входит в первую десятку. Он занимал седьмое место с 2020 по 2023 г. за исключением 2022 г., когда рейтинг не публиковался, и поднялся на две позиции в 2024 г. Ограниченность территории Сингапура вынуждает постоянно искать инновационные решения для улучшения городской среды, включая повышение экологичности, безопасности и устойчивости его домов и районов. Основные инициативы [3]:

– беспилотные летательные аппараты выявляют возможные очаги распространения лихорадки денге и борются с любыми вспышками;

– система обнаружения утопления в общественных бассейнах использует компьютерное зрение для выявления потенциальных случаев утопления, помогая оповещать спасателей и позволяя им быстрее реагировать на ситуации, когда пловцам требуется помощь;

– система мониторинга пожилых людей изучает повседневные привычки пожилых людей с помощью датчиков движения и оповещает лиц, осуществляющих уход, в случае необходимости или при обнаружении отклонений в поведении;

– электронные платежи в рамках простой и безопасной платформы, работающей в разных системах, чтобы сделать финансовые операции более удобными и эффективными;

– цифровой двойник окружающей среды – интегрированный и масштабируемый инструмент для моделирования влияния факторов окружающей среды на проектирование открытых пространств и планировку зданий с использованием новейших технологий высокопроизводительных вычислений;

– приложения myENV и OneService как удобные инструменты для информирования общественности о вспышках лихорадки денге, о последних новостях и проблемах, с которыми горожане сталкиваются в своих районах. Чат-бот OneService также помогает жителям предоставлять и получать необходимую информацию в режиме реального времени, обеспечивая полную регистрацию отзывов;

– кнопка персонального оповещения для пожилых людей, нуждающихся в помощи, отправляет сигнал о помощи в Центр помощи пожилым людям либо в круглосуточную службу телемедицины CareLine, предоставляемую Больницей общего профиля Чанги;

– «умные» счетчики воды с дистанционным съемом показаний делают данные об использовании воды доступными для жильцов, чтобы они могли лучше контролировать потребление воды и свои счета;

– разумное городское планирование (цифровые технологии) помогает градостроителям эффективнее использовать ограниченные территории с целью создания экологичных и качественных пространств для работы и жизни в Сингапуре.

Указанные инициативы реализуются в рамках программы Smart Nation, задачами которой являются использование всей мощи и потенциала цифровых и интеллектуальных технологий с целью создания новых рабочих мест и возможностей для бизнеса, а также увеличение продуктивности экономики за счет более эффективных государственных и бизнес-процессов.

Основные направления программы Smart Nation включают:

– цифровизацию государственных услуг. Программа стремится обеспечить более удобный и эффективный доступ граждан к государственным услугам, предоставляя широкий спектр онлайн-сервисов и уменьшая бюрократическую нагрузку;

– «умные города» и транспорт. Оптимизация управления транспортной инфраструктурой, включая улучшение движения транспорта, оптимизацию маршрутов общественного транспорта и создание «умных» парковок, способствует развитию мобильности и снижению транспортных пробок;

– «умное» здравоохранение. Внедрение технологий в области здравоохранения, таких как электронные медицинские записи, телемедицина и аналитика данных, улучшает качество медицинского обслуживания и облегчает доступ к нему;

– кибербезопасность и защита данных. Программа придает большое значение безопасности данных и информационной инфраструктуре, что способствует защите граждан и предприятий от киберугроз;

– инновации и предпринимательство. Программа стимулирует инновации и предпринимательство, поддерживая развитие стартапов и технологических компаний. Государство предоставляет финансовую поддержку и инфраструктуру для исследований и разработок в области цифровых технологий, что способствует привлечению талантов и созданию инновационных продуктов и услуг;

– участие граждан. Одной из важных черт программы является участие граждан. Правительство активно привлекает общество к разработке и реализации проектов «умного» города, организуя консультации и обратную связь, что обеспечивает более точный учет интересов и потребностей граждан и повышает уровень доверия к цифровым инициативам;

– национальную цифровую идентификационную систему (National Digital Identity, NDI) граждан и предприятий для осуществления транзакций в цифровом виде удобным и безопасным способом;

– платформу датчиков умной нации (Smart Nation Sensor Platform) для ускорения внедрения датчиков и других устройств IoT (Internet of Things – интернет вещей), которые сделают город более привлекательным для проживания и безопасным;

– умную городскую мобильность (Smart Urban Mobility). Подразумевает использование данных и цифровых технологий, включая искусственный интеллект и автономные транспортные средства, для дальнейшего улучшения системы общественного транспорта;

– акселератор технических навыков. TechSkills Accelerator включает две инициативы: «Искусственный интеллект для всех» и «Искусственный интеллект для промышленности» под руководством «Искусственного интеллекта Сингапура», предназначенные для повышения квалификации 12 000 специалистов и студентов в области искусственного интеллекта ежегодно. Данные инициативы побуждают граждан участвовать в преобразованиях, направленных на то, чтобы город стал «цифровым», и активно возглавлять это движение;

– сервис «Моменты жизни» (Moments of Life). Обеспечивает установление связи между ответственными государственными службами и агентствами с гражданами в ключевые моменты их жизни, исключая необходимость обращаться в несколько правительственных учреждений.

Апробация решений «умного города» производится в прибрежном районе Пунггол северо-восточной части Сингапура, ранее населенном в основном католиками. Объединив жителей, предпринимателей бизнес-парка и студентов Сингапурского технологического института, цифровой район Пунггол должен стать процветающим, технологичным, экологичным городом, демонстрирующим амбиции в области «умной нации».

В целом Сингапур считается одним из самых «умных городов» в мире, где применяются различные законодательные меры и технологии для создания инновационной и технологически развитой городской среды. Поскольку взяточничество и кумовство – бич многих бюрократических систем, а автор сингапурского «экономического чуда» Ли Куан Ю (сингапурский народ считает отца нации жестким и справедливым правителем) не раз говорил, что для победы над

коррупцией нужно быть безжалостным, готовым отправить за решетку родственников и знакомых, если те берут взятки, в стране существует строгая система наказаний. Согласно отчетам пенитенциарной системы, в Сингапуре самый высокий уровень смертной казни, чаще всего на виселицу отправляются убийцы и наркоторговцы. Активно развивающиеся основные аспекты законодательства и технологий, которые применяются в Сингапуре, имеют свою специфику:

*Законодательство в области кибербезопасности.* Принимаются серьезные меры по защите киберинфраструктуры и данных граждан. Законы и нормативные акты регулируют кибербезопасность, обязательную отчетность о нарушениях и требования к защите данных.

*Законодательство об «умном городе».* Разработаны законодательные акты, которые поддерживают развитие и внедрение технологий «умного города», способствуют улучшению городской инфраструктуры, мобильности, энергоэффективности и общего качества жизни граждан. Около 80 % граждан (все население – 5,6 млн человек) живут в государственных квартирах. Хотя в Сингапуре демократия, страной руководит одна партия. Граждане доверяют государству и принимают политику контроля (включающую ограничения на публичные выступления и цензуру в СМИ) в обмен на более эффективное управление страной. По этой причине проект пользуется популярностью.

### **Технологии Сингапура**

*Интернет вещей.* Активно внедряются технологии IoT для связи и управления различными устройствами в городе. Это позволяет собирать и анализировать данные для улучшения управления городской инфраструктурой, такой как освещение, транспорт и утилизация отходов.

*Искусственный интеллект.* Технологии искусственного интеллекта используются для автоматизации процессов, анализа данных и предоставления «умных» решений. Например, системы искусственного интеллекта используются для мониторинга трафика, прогнозирования погоды, управления энергопотреблением и оптимизации городских сервисов.

*Беспилотные транспортные средства.* Внедрены беспилотные автобусы и такси, которые работают на основе самоуправляемых систем и технологий искусственного интеллекта. Это способствует повышению эффективности общественного транспорта и улучшению мобильности граждан.

*«Умные» датчики и мониторинг.* Используются «умные» датчики для мониторинга различных аспектов городской среды, таких как качество воздуха, уровень шума, уровень воды и другие параметры. Это позволяет оперативно реагировать на проблемы и улучшать качество городской жизни.

Таким образом, в классическом мировом понимании «умный город» – это населенный пункт, где благодаря использованию информационных технологий инфраструктура и услуги эффективны как с точки зрения правительства, так и с позиции жителей и бизнеса. Другими словами, когда мэрия счастлива, потому что все городские службы по-максимуму справляются со своими задачами, бизнес счастлив, потому что городская инфраструктура позволяет ему генерировать прибыль, а люди – потому что им комфортно жить и все их потребности удовлетворены. Наибольших успехов достигают города с наивысшим уровнем доходов населения, так как финансирование проектов осуществляется крупными корпорациями (в целях извлечения максимальной выгоды из места компактного проживания обеспеченных лиц), органами местного управления (в целях повышения инвестиционной привлекательности) и самими жителями (в целях обеспечения устойчивого роста стоимости своей недвижимости). Применяемые цифровые решения являются, как правило, уникальными, что обуславливает высокую стоимость их внедрения, сопровождения и развития.

Рейтинг Smart City Index не является единственным показателем «умности» города. Существуют и другие рейтинги, которые учитывают другие критерии. Так, 14 июня 2024 г. Минстрой России обнародовал разработанный совместно с МГУ индекс IQ городов, сформированный для определения эффективности цифровизации, технологических решений и сервисов, которые внедряются в российских населенных пунктах [4]. Их подразделяют на четыре категории – крупнейшие, крупные и большие города, а также административные центры. По итогам 2023 г. лидерами по цифровизации в России стали Москва, Тюмень, Южно-Сахалинск и Чернушинский городской округ.

При подсчете показателя учитывается работа интеллектуальных систем тепло-, водо- и газо-снабжения, датчиков контроля качества воздуха и пр. Эти решения направлены на создание эффективной системы управления городской инфраструктурой, а также комфортных и безопасных условий для жизни россиян. В 2023 г. индекс был рассчитан для 235 городов. Его среднее значение достигло 61 балла из 120 возможных, что на 11 % выше по сравнению с предыдущим годом.

Внедрение и развитие «умных городов» в России осуществляются, как правило, крупными финансовыми и (или) технологическими корпорациями с частичным госфинансированием и при поддержке Российского фонда развития информационных технологий, например Росатомом [5], Сбером [6], Ростехом, Ростелекомом. Регулятором и системным интегратором в этой области выступает Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства России. Интеграционный проект Минстроя, осуществляемый совместно с консалтинговой компанией DV-Consulting, имеет три направления:

– городское управление (цифровая трансформация государственного и муниципального управления, развитие городской среды и ЖКХ, экология, энергетика, транспорт, геоинформационные технологии);

– благосостояние людей (здравоохранение, культура, молодежная политика, образование, наука и высшая школа, безопасность, спорт);

– инвестиционный климат (строительство, предпринимательство).

Ключевыми технологиями реализации «умных городов» являются: интернет вещей, геолокация и городское планирование, роботы, технологии виртуальной и дополненной реальности, искусственный интеллект, мобильные сети электросвязи, блокчейн, цифровой двойник.

Таким образом, в России, несмотря на то, что отдельные технологии Smart City активно внедряются практически повсеместно, до полной реализации концепции «умного города» еще далеко. Городов, в которых хотя бы две трети инфраструктуры «умные», очень мало. Это понятно, так как такой масштабный процесс по определению не может происходить стремительно. Несмотря на разнородность принимаемых цифровых решений, осуществляются меры по их унификации, создан банк цифровых решений для «умных городов». Ведется работа по преодолению таких сдерживающих факторов, как риск монополизации рынка, злоупотребления при участии в госконтрактах, недоступность программы для регионов из-за высоких цен, аффилированность исполнителей и власти на местах, сложности в реализации комплексных программ и экономическая неэффективность отдельных инвестпроектов.

В Республике Беларусь основная специфика «умных городов» заключается в том, что территориально под термином «умный город» понимается административно-территориальная единица, как правило, второго уровня, включающая населенный пункт и прилегающие административно-подчиненные территории, т. е. районный центр и всю территорию района [7]. Обоснован подобный подход тем, что концепция «умный город» применима к административной территории любого масштаба [8]. В то же время реализация цели «умная страна» основывается на развитии каждого отдельного региона как «умного пазла» одной общей «умной системы» (рис. 3).



Рис. 3. «Умный пазл» как основа формирования концепции Smart City

Региональное цифровое развитие, подразумевающее внедрение и развитие технологий «умных городов» в Республике Беларусь, является одним из основных направлений цифрового развития, цели которого – создание условий для ускоренного социально-экономического развития регионов, сокращение межрегиональной дифференциации путем создания равных возможностей для достижения высокого уровня и качества жизни населения. Основные программно-стратегические документы, определяющие региональное цифровое развитие:

- Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы»;
- Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденная Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2020 г. № 292;
- Программа деятельности Правительства Республики Беларусь на период до 2025 года, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 декабря 2020 г. № 758;
- Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 2 февраля 2021 г. № 66;
- План мероприятий по реализации комплексного «проекта будущего» «Умные города Беларуси», утвержденный первым заместителем премьер-министра Республики Беларусь 20 июля 2021 г.;
- Указ Президента Республики Беларусь от 7 апреля 2022 г. № 136 «Об органе государственного регулирования в сфере цифрового развития и вопросах цифровизации».

Финансирование мероприятий по региональному цифровому развитию в настоящее время осуществляется из фонда универсального обслуживания цифрового развития и связи, Минского городского и областных инвестиционных фондов.

Комплексный проект «Умные города Беларуси» сформирован Министерством связи и информатизации в соответствии с поручением главы государства о разработке «проектов будущего» (подп. 1.7 п. 1 протокола от 2 июля 2019 г. № 15). Первым шагом к созданию «умных городов» в Республике Беларусь стала разработка в 2019 г. Типовой концепции развития «умных городов» с последующей ее адаптацией в 2020 г. к рабочим концепциям развития «умных городов» для отдельных административно-территориальных единиц. В процессе разработки рабочих концепций был проведен опрос потребностей в «умных решениях» населения и администрации. По результатам анализа полученных данных выяснилось, что потребности различных административно-территориальных единиц коррелируют более чем на 90 % [9]. Это позволило отказаться от разработки отдельных систем «умного города» для каждой административно-территориальной единицы и сосредоточиться на типовом платформенном решении [10].

В 2021 г. было разработано и утверждено техническое задание системообразующего мероприятия № 68 «Реализация комплексного проекта „Умные города Беларуси“. Создание типовой региональной государственной цифровой платформы „Умный город (регион)“» Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Цифровое развитие регионов». Также была разработана система бизнес-требований к типовой региональной государственной цифровой платформе «Умный город (регион)» и определен необходимый перечень разворачиваемых на ней сервисов [11]. Проект предусматривает объединение совокупности «умных городов» в рамках единой цифровой экосистемы «цифровое государство», интеграцию существующих и перспективных «умных» решений (государственных, отраслевых, общественных, частных и др.) в границах административно-территориальной единицы, предоставление сервисов и услуг цифровой платформы для решения широкого круга задач обеспечения комфортной среды проживания и деятельности.

Системообразующее «ядро» проекта – типовая региональная государственная цифровая платформа «Умный город (регион)» (далее Платформа) – предназначена для интеграции «умных решений» в границах города (района) с «единой точкой входа» для доступа к широкому спектру удобных цифровых сервисов и услуг для местных органов власти, бизнеса и граждан, включая вопросы безопасности, жизнедеятельности, транспортного обеспечения, экологии, сферы жилищно-коммунального хозяйства, энергетики, социального обслуживания, здравоохранения, образования.

В 2024 г. завершена разработка программного обеспечения первой очереди Платформы с проведением предварительных испытаний, опытной эксплуатации на базе Минска, областных центров и 11 городов 80-тысячников, определенных потенциальными центрами экономического роста (Орша, Барановичи, Пинск, Новополоцк, Полоцк, Мозырь, Лида, Борисов, Солигорск, Молодечно, Бобруйск), и приемочных испытаний.

В рамках первой очереди Платформы уже разработан основной набор сервисов в интересах местных органов власти, юридических лиц и граждан: комплекс приложений для информационно-аналитического обеспечения деятельности местных органов власти и поддержки принятия ими управленческих решений (мониторинг и прогнозирование социально-экономического развития, общественно-политической ситуации, реализации проектов, планов и программ); сервисы электронного участия: прием и обработка заявок и предложений по решению проблем горожан и развитию инфраструктуры города (региона), проведение опросов и общественных обсуждений, оценка организаций и качества их услуг; городские сервисы: информация об организациях, оказываемых ими услугах, заказ и оплата услуг, доставка товаров, поиск вакансий; деловые сервисы: размещение, актуализация и предоставление в машиночитаемом формате (открытые данные) информации о деятельности государственных органов и организаций, политической, экономической, культурной и международной жизни, состоянии окружающей среды и другой информации); туристические сервисы: информация о достопримечательностях, афиша культурных и спортивных мероприятий.

На 2025 г. запланированы и уже проводятся мероприятия по разработке и внедрению второй очереди Платформы с обеспечением полноценной работы в 17 регионах (Минск, областные центры, Барановичи, Пинск, Новополоцк, Орша, Полоцк, Мозырь, Лида, Борисов, Солигорск, Молодечно, Бобруйск). В том числе предусмотрены разработка и апробация программного обеспечения второй очереди Платформы, включая расширенные компоненты ядра Платформы, прикладные приложения и сервисы, интеграция второй очереди Платформы с государственными информационными системами и ресурсами, сторонними решениями и учетными системами организаций, проведение приемочных испытаний и мероприятий по вводу второй очереди Платформы в постоянную эксплуатацию.

В период с 2026 по 2030 г. планируются дальнейшее развитие новых сервисов и услуг и масштабирование Платформы на территории республики.

Практика проектирования и внедрения сложных систем показывает, что они устаревают еще в процессе разработки. В полной мере данное утверждение относится и к разрабатываемой Платформе. Так, например, определенные ранее прикладные приложения и сервисы не предусматривают использования технологий искусственного интеллекта, решений IoT и т. д. Платформа не является системой реального времени, что не позволяет в настоящее время строить на ней полный спектр сервисов управления. Все это указывает на необходимость научно-технического сопровождения проекта на всем протяжении его жизненного цикла в целях постоянного развития Платформы исходя из выявляемых потребностей, изменений в действующей нормативной правовой и технической нормативной правовой базе, совершенствования IT-технологий и т. п.

Нерешенным в настоящее время остается и вопрос организационного и правового обеспечения функционирования Платформы. Права пользователей из состава местной администрации, представителей бизнеса и населения однозначно не определены. Вопросы администрирования Платформы требуют тщательной проработки в процессе опытной эксплуатации. Эти и многие другие проблемы потребуют организации работы не только оператора Платформы, но и операторов отдельных сервисов, а также аналитической группы по выявлению проблем и выработке рекомендаций по их устранению.

Отдельным аспектом является неопределенная пока, но вероятная проблема взаимодействия с отраслевыми цифровыми платформами. Так, например, разрабатываемые в настоящее время цифровые решения в областях здравоохранения, сельского хозяйства, транспорта, национальной безопасности и пр. не предусматривают взаимодействия с Платформой, а нормативная правовая база в данной области отсутствует. Для решения указанных проблем требуются ком-

петенции в различных отраслях экономики и социальной сферы, соединенные с научным и практическим опытом исследований и разработки цифровых решений. В Республике Беларусь данным требованиям в полной мере удовлетворяет Объединенный институт проблем информатики как офис цифровизации НАН Беларуси.

### Публикации

1. Приветствие участникам и гостям XXVII Международного форума «ТИБО-2021». – URL: <https://president.gov.by/ru/events/privetstvie-uchastnikam-i-gostyam-hhvii-mezhhdunarodnogo-foruma-tibo-2021> (дата обращения: 23.12.2024).
2. Smart City Observatory. Smart City Index 2024. – URL: <https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/> (date of access: 23.12.2024).
3. Smart City Projects. Smart Urban Living. – URL: <https://www.smartnation.gov.sg/initiatives/urban-living/> (date of access: 23.12.2024).
4. Умный город : [сайт]. – URL: <https://russiasmartcity.ru/about> (дата обращения: 23.12.2024).
5. Цифровая платформа «Умный город» : [сайт]. – URL: <https://rosatom.city/> (дата обращения: 23.12.2024).
6. Цельный город от Сбера : [сайт]. – URL: <https://sbercity.ru/> (дата обращения: 23.12.2024).
7. О проекте «Умные города Беларуси». – URL: <https://mpt.gov.by/ru/o-proekte-umnye-goroda-belarusi> (дата обращения: 23.12.2024).
8. Кругликов, С. В. Концепция реализации проекта «Малый умный (цифровой) регион» / С. В. Кругликов // Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2019 : тр. Междунар. науч.-техн. конгресса. – Таганрог : Изд-во С. А. Ступина, 2019. – С. 177–185.
9. Кругликов, С. В. Каким должен быть умный город и как его построить? / С. В. Кругликов, С. В. Потетенко // Веснік сувязі. – 2021. – № 3(167). – С. 16–21.
10. Кругликов, С. В. Цифровая платформа как основа управления умным городом / С. В. Кругликов, М. С. Абламейко // Проблемы управления. – 2021. – № 3(81). – С. 43–51.
11. Кругликов, С. В. Цифровые сервисы как ключевой элемент умных городов / С. В. Кругликов, К. А. Радкевич, А. М. Шантарович // Веснік сувязі. – 2023. – № 4(180). – С. 60–64.

УДК 528,88; 528,9; 004,06; 004,891; 004,9

## Научно-технические разработки в области цифровой картографии и геоинформационных технологий

**Крючков Александр Николаевич**

*заведующий лабораторией картографических систем и технологий*  
E-mail: lab210@newman.bas-net.by

Лаборатория картографических систем и технологий была образована в 2000 г. на базе отдела № 210 «Автоматизированные картографические системы и технологии», созданного в 1975 г. В 1977 г. отдел стал головным подразделением Института технической кибернетики НАН Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси) в области разработки методов, алгоритмов и программного обеспечения создания и обновления цифровых моделей местности на основе ручных и сканерных методов обработки картографических изображений. За успешное выполнение работ по созданию автоматизированных картографических систем и внедрению их в промышленную эксплуатацию заведующий отделом А. В. Старцев был удостоен Государственной премии СССР, а ряд сотрудников отдела – правительственных наград.

В настоящее время основными областями исследований лаборатории являются разработки:

- моделей представления геопространственной информации;
- методов, алгоритмов и программного обеспечения обработки данных дистанционного зондирования Земли;
- технологий и программно-информационных комплексов автоматизации картографических работ (создание и обновление цифровой информации о местности, автоматизированная подготовка карт и планов к изданию, автоматизированное составление топографических и специальных карт, создание картографических баз данных и др.);
- технологий и комплексов поддержки принятия решений на основе методов оперативного анализа свойств местности в экологии, чрезвычайных ситуациях, военных приложениях, а также создание геоинформационных систем различного назначения.

За период 2015–2024 гг. в лаборатории выполнены работы по девяти заданиям государственных программ научных исследований, 26 договорам на осуществление научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также две работы в рамках программ Союзного государства «Мониторинг-СГ», «Интеграция-СГ».

Лаборатория выполнила ряд международных контрактов с организациями России, Украины, Индии, Китая, Армении и Казахстана.

Ниже приводится краткое описание наиболее значимых разработок, выполняемых в период 2015–2024 гг.

1. *Специализированное программное обеспечение подвижного навигационно-топографического комплекса (СПО ПНТК)* (рис. 1, 2). Изготовитель и поставщик ПНТК – ООО «Мидивисана», Минск.

СПО ПНТК предназначено для решения задач по топографическому обеспечению боевых действий войск на оперативно-тактическом и тактическом уровнях. СПО ПНТК включает семь программно-информационных комплексов (ПИК) и обеспечивает:

- создание цифровой информации о местности (ЦИМ);
- обновление ЦИМ по данным, полученным с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- формирование цифровых фотодокументов;
- мониторинг местности с использованием БПЛА;
- мониторинг местоположения ПНТК по данным GPS/ГЛОНАСС;
- комплексный анализ геопространственной информации и подготовка приложений по ее применению;

- определение координат наблюдаемых стационарных и движущихся объектов в реальном масштабе времени;
- формирование пространственных моделей и их визуализацию на экране коллективного пользования;
- решение расчетных и информационных задач по электронной карте;
- формирование банка данных ЦИМ.

Программно-информационные средства картографического обеспечения ПНТК предназначены для повышения оперативности решения частями навигационно-топографической службы Вооруженных Сил Республики Беларусь (НТС ВС РБ) задач по обеспечению войск и штабов актуальной информацией о местности на основе электронных карт и цифровых фотодокументов. В настоящее время в воинские части НТС ВС РБ поставлены восемь комплектов СПО в составе ПНТК и один комплект СПО в составе ПНТК в Министерство обороны Республики Казахстан.

2. *Специализированное программное обеспечение подвижного навигационно-геодезического комплекса (СПО ПНГК)* (рис. 3, 4). Изготовитель и поставщик ПНГК – ООО «Мидивисана».

СПО ПНГК предназначено для оперативного решения задач по топогеодезической подготовке районов боевого применения войск и маршрутов выхода в них и по ведению топографической разведки местности. ПНГК включает три ПИК: БД ЦИМ, ГИС ПНГК, РАЗВЕДКА-М, которые обеспечивают:

- ведение топографической разведки местности с использованием оптико-электронных средств и интегрированного навигационно-информационного комплекса;
- определение собственного местоположения ПНГК по данным интегрированного навигационно-информационного комплекса с автоматическим отображением местоположения на электронной карте местности;
- решение расчетных и информационно-аналитических задач по электронной карте с использованием геоинформационной системы (ГИС);
- формирование и ведение (хранение, обновление, поиск и выдачу) банка данных ЦИМ, в том числе данных топографической разведки;
- формирование и тиражирование текстовых и графических документов о местности.

Разработанные программно-информационные средства ПНГК обеспечивают повышение оперативности топогеодезической разведки местности и доведение данных разведки до войск и воинских формирований.

СПО ПНГК поставляется в двух модификациях: ПНГК в составе трех ПИК без БПЛА и ПНГК-БАК в составе двух ПИК без комплекса РАЗВЕДКА-М с двумя БПЛА.

В настоящее время в воинские части НТС ВС РБ поставлено 16 комплектов СПО в составе ПНГК и ПНГК-БАК и один комплект СПО в составе ПНГК в Министерство обороны Республики Казахстан.

3. *Специализированное программное обеспечение подвижного полиграфического комплекса (СПО ППК)* (рис. 5, 6). Изготовитель и поставщик ППК – ООО «Мидивисана».

СПО ППК предназначено для повышения оперативности решения частями НТС ВС РБ задач по обеспечению войск и штабов средствами топогеодезической информации на твердой основе и электронном виде в полевых условиях. СПО ППК включает три ПИК (СОСТАВЛЕНИЕ-СК, ИЗДАНИЕ-ПК, РЕШЕНИЕ-УОЗ), которые обеспечивают:

- составление специальных карт военного назначения (путей сообщения, автомобильных дорог, геодезических данных, искусственных препятствий, условий маскировки, условий проходимости, участков рек) и расширенной справки о местности;
- решение специальных задач по анализу оперативно-тактических свойств местности;
- формирование и ведение банка данных ЦИМ и полиграфической продукции;
- решение учетно-операционных задач (наличие карт на складах, учет движения полиграфической продукции и др.);
- автоматизированную подготовку к изданию топографических и специальных карт.

СПО ППК обеспечивает снижение затрат на составление специальных карт военного назначения и подготовку их к изданию, на получение расчетных характеристик по объектам местности, а также снижение временных затрат на решение специальных задач.



Рис. 1. Технологический модуль ПНТК

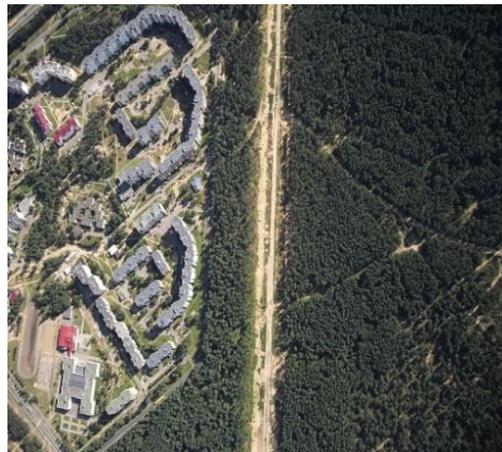


Рис. 2. Фотоснимок местности по результатам полета БПЛА

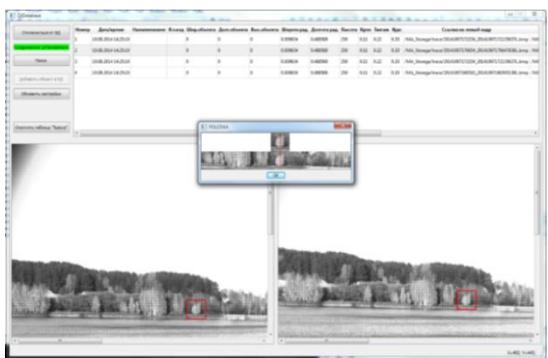


Рис. 3. Получение двух снимков на объекты разведки с использованием оптико-электронных средств

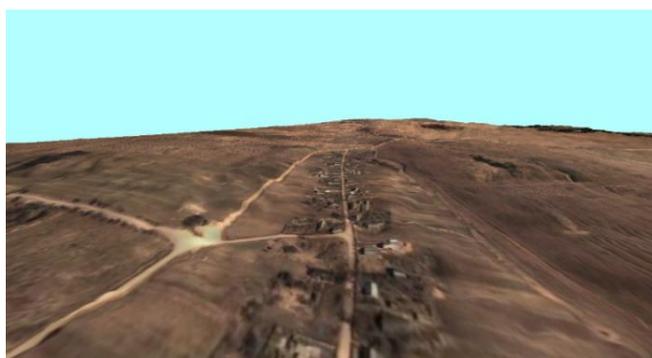


Рис. 4. 3D-модель рельефа с наложением текстуры снимка

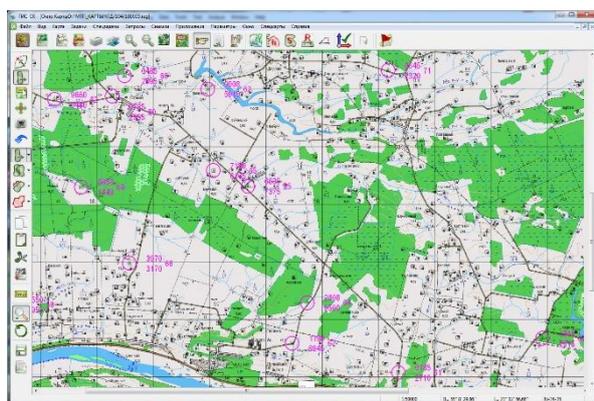


Рис. 5. Карта геодезических данных

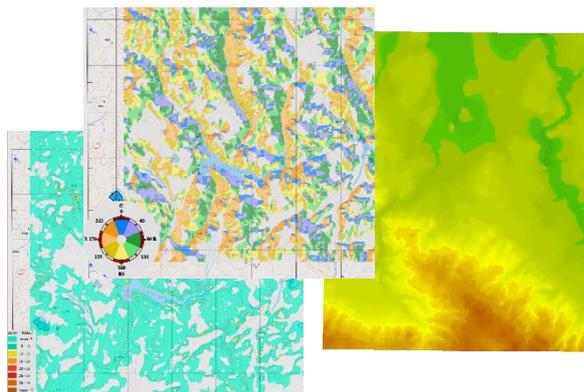


Рис. 6. Построение матричных карт: рельефа, уклонов и экспозиции склонов

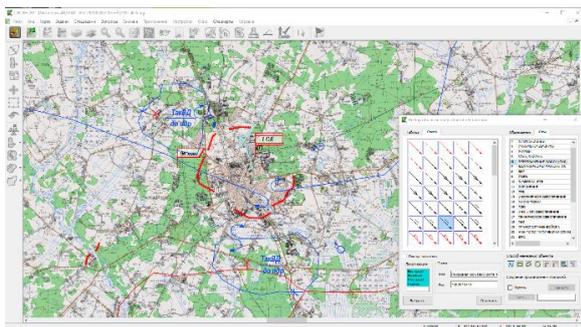


Рис. 7. Нанесение оперативно-тактической обстановки



Рис. 8. Построение трехмерной модели местности



Рис. 9. Подготовка к изданию цифровых карт

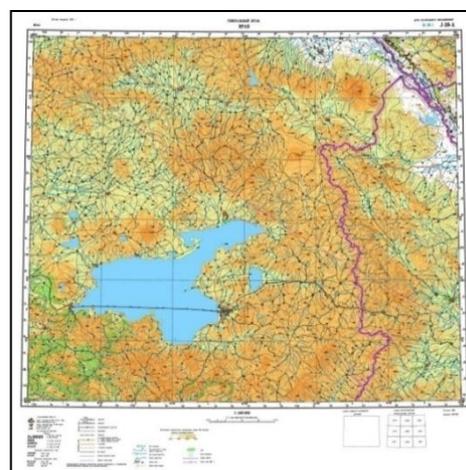


Рис. 10. Формирование слоя гипсометрической окраски

Исходная ЦТК



Составляемая ЦТК

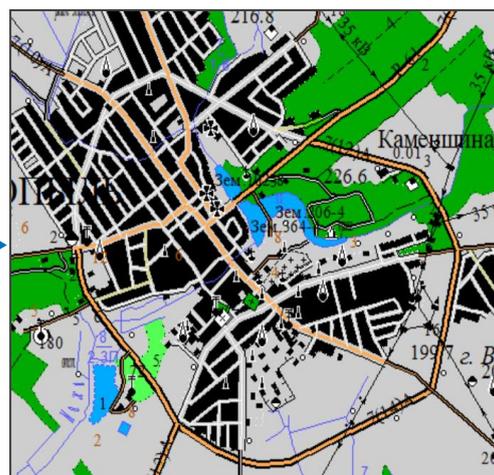


Рис. 11. Генерализация населенных пунктов ЦТК ПМ

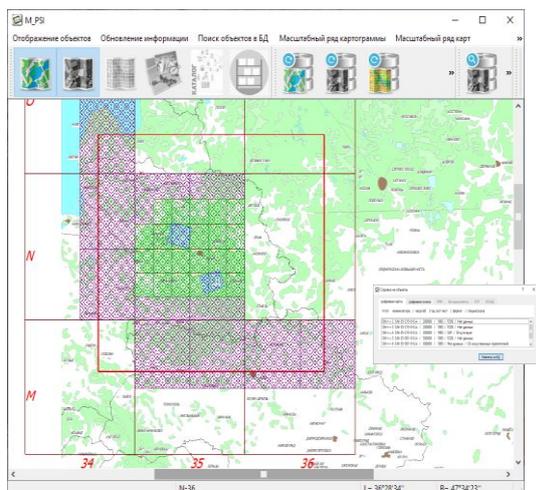


Рис. 12. Формирование картограммы

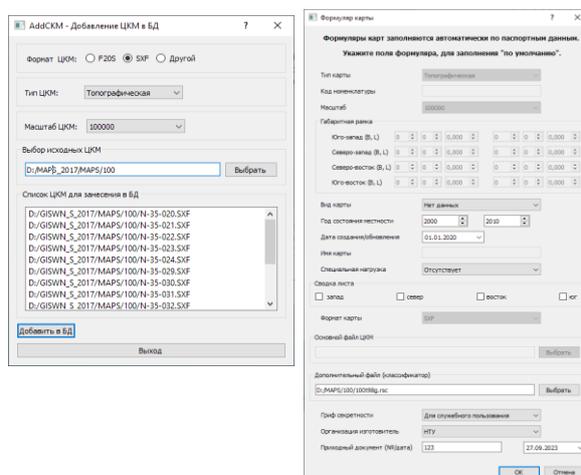


Рис. 13. Формирование фондов цифровых карт

4. Программно-информационный комплекс поддержки принятия решений в части выполнения специальных задач по анализу оперативно-тактических свойств местности ГИС-ВН-2М (рис. 7, 8).

ГИС-ВН-2М предназначен для использования органами военного управления при проведении командно-штабных учений и планирования боевых операций на основе анализа оперативно-тактических свойств местности и оперативно-тактической обстановки. Комплекс обеспечивает:

- оперативный анализ местности на основе цифровых карт местности и цифровых снимков земной поверхности;
- ввод, редактирование и ведение разнородных данных оперативно-тактической обстановки на электронной карте;
- визуализацию ЦИМ (цифровых карт, снимков, фотодокументов, тематической информации, трехмерных моделей местности и др.);
- подготовку графических документов для задач планирования и выполнения боевых задач;
- выполнение расчетно-аналитических и информационных задач (построение буферных зон, построение матриц высот рельефа и местности, вычисление площади и длины объектов, получение справочной и статистической информации по объекту, группе объектов, листу карты и др.);
- выполнение оперативно-тактических и специальных задач (расчет марша, расчет оптимального маршрута с учетом задаваемых ограничений, поиск областей с заданными характеристиками, расчет запаса топографических карт и др.);
- обработку цифровых снимков;
- поддержку многопользовательского доступа к данным оперативно-тактической обстановки, экспорт-импорт векторных данных форматов SXF, Share и MID/MIF во внутренний формат комплекса.

Комплекс построен по модульному принципу и реализован в операционных системах Windows и Linux.

Модификации ПИК ГИС-ВН-2М поставляются в составе подвижных навигационно-топографических, навигационно-геодезических и полиграфических комплексов.

5. Программно-информационный комплекс автоматизированной подготовки карт и планов населенных пунктов к изданию (ПИК ИЗДАНИЕ-М) (рис. 9, 10).

Комплекс предназначен для использования в воинских частях НТС ВС РФ для подготовки издательских оригиналов по обновленным (или пересоставленным) цифровым топографическим, обзорно-географическим, специальным картам и планам населенных пунктов с последующим получением заданного тиража карт и планов типографскими средствами. ПИК ИЗДАНИЕ-М обеспечивает:

- автоматизированное формирование электронных издательских оригиналов по цифровым топографическим, обзорно-географическим, специальным картам и планам населенных пунктов в условных знаках и подписях, принятых для карт отечественного издания;
- создание и редактирование библиотек условных знаков; автоматизированное формирование справки о местности;
- автоматизированное формирование математической основы карты;
- формирование зарамочного оформления;
- формирование слоя гипсометрической окраски;
- формирование формуляра;
- редактирование с помощью встроенного редактора;
- получение контрольных копий в виде цветного изображения;
- подготовку и вывод издательских оригиналов и их контрольных копий на технические средства графического документирования;
- создание комплектов цветоделенных издательских оригиналов в формате Postscript.

Комплекс обеспечивает снижение затрат на изготовление единицы продукции не менее 70 % и является отечественной разработкой, обеспечивающей импортозамещение зарубежных аналогов при решении задач по подготовке издательских оригиналов по цифровым картам и планам населенных пунктов.

ПИК ИЗДАНИЕ-М передан в воинские части НТС ВС РБ, а его модификация поставляется в составе ППК. Пять комплектов СПО комплекса поставлены в топографическую службу ВС Армении.

6. Программно-информационный комплекс автоматизированного составления топографических карт производного масштаба (ПИК СОСТАВЛЕНИЕ-Ц) (рис. 11).

Комплекс предназначен для обновления цифровых топографических карт (ЦТК) путем составления топографических карт производного масштаба (ЦТК ПМ) по обновленному базовому масштабу (БМ) топографической карты 1:10 000 с использованием методов картографической генерализации цифровых карт. Комплекс обеспечивает:

- загрузку и выгрузку ЦТК в формате SXF и F20S;
- входной, промежуточный и выходной контроль метрики ЦТК БМ и ЦТК ПМ;
- автоматизированное составление ЦТК ПМ, включающее сшивку номенклатурных листов ЦТК БМ в номенклатурные листы ЦТК ПМ, установление пространственно-логических связей между объектами, переклассификацию кодов, объединение контуров растительности, изменение характера локализации объектов, цензово-нормативный отбор объектов, согласование контуров растительности, генерализацию горизонталей, генерализацию объектов населенных пунктов;
- изменение характеристик и перерасположение подписей; генерализацию заполняющих условных знаков.

ПИК СОСТАВЛЕНИЕ-Ц обеспечивает уровень автоматизации 60 % и выше, что позволяет значительно повышать производительность труда и уменьшать временные затраты на обновление ЦТК всего масштабного ряда.

Комплекс передан в промышленную эксплуатацию на государственное предприятие «Белгеодезия» Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь и в 31-й навигационно-топографический центр Министерства обороны Республики Беларусь.

7. Банк данных цифровой информации о местности (БД ЦИМ) (рис. 12, 13).

БД ЦИМ обеспечивает формирование и ведение банка данных ЦИМ, осуществление архивного хранения цифровых и аналоговых картографических материалов, ведение складского учета картографических материалов и предоставление потребителю ЦИМ и их производных продуктов.

С помощью БД ЦИМ обеспечивается:

- формирование фонда цифровых топографических, обзорно-географических и специальных карт;
- формирование фонда цифровых матриц высот рельефа и местности;
- формирование фонда цифровых снимков и фотодокументов;
- формирование фонда каталогов геодезических пунктов;
- формирование каталога мировых координат и опорных точек;

- организация складского учета и хранения картографических материалов;
- поиск, просмотр, редактирование и скачивание элементов банка данных;
- ведение справочника организаций и подразделений;
- ведение технологических справочников БД ЦИМ;
- учет прохождения информации в базе данных;
- управление учетом информации в базе данных;
- составление отчетов о наличии материалов, видов данных масштабов хранения, отчетов по дате состояния местности;
- выдача справочной информации о состоянии архивов банка данных в текстовом и графическом виде с использованием картограммы.

Для управления базами данных используется СУБД PostgreSQL. СПО разработано под операционные системы Windows 7/10 и Linux Ubuntu 20.04. LTS.

Модификации БД ЦИМ поставляются в подвижные навигационно-топографические, навигационно-геодезические и полиграфические комплексы. СПО БД ЦИМ эксплуатируется в воинских частях НТС ВС РФ.

УДК 502.5; 614.8; 004,891.5

## Научно-технические разработки по анализу состояния водных объектов Беларуси для предотвращения чрезвычайных ситуаций

**Левкевич Виктор Евгеньевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории обработки и распознавания изображений,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: v.lev2014@mail.ru*

**Мильман Виктор Абрамович**

*ведущий научный сотрудник лаборатории обработки и распознавания изображений,  
кандидат физико-математических наук  
E-mail: VictorMi29@mail.ru*

**Крючков Александр Николаевич**

*заведующий лабораторией картографических систем и технологий  
E-mail: Lab210@newman.bas-net.by*

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси) участвует в выполнении государственных программ научных исследований, направленных на обеспечение безопасности человека, общества и государства. В частности, исследуются вопросы безопасности при чрезвычайных ситуациях. В лаборатории картографических систем и технологий и лаборатории обработки и распознавания изображений ОИПИ НАН Беларуси выполнялись работы, связанные с рисками чрезвычайных ситуаций на водных объектах и гидротехнических сооружениях (ГТС). Актуальность этой тематики обусловлена следующими факторами:

- бóльшая часть водохранилищ и ГТС на территории Беларуси построена в период с 1950 по 1970 г. и с тех пор израсходовала значительную долю своего ресурса;
- в связи с масштабной мелиорацией и климатическими изменениями условия на водных объектах стали иными и, по мнению многих специалистов, возросла вероятность экстремальных метеорологических явлений;
- в силу ряда экономических перемен изменился режим использования многих водных объектов, на некоторых из них установлены малые гидроэлектростанции.

Работы по оценке безопасности эксплуатации водных объектов выполнялись совместно с БНТУ, БГТУ и Университетом гражданской защиты (УГЗ) МЧС. Специалисты из БНТУ разрабатывали теоретические вопросы гидрологии и механики. В БНТУ и УГЗ проводили экспериментальные исследования в гидротехнической лаборатории. Специалистами из УГЗ, БГТУ и ОИПИ НАН Беларуси осуществлялись натурные обследования водных объектов и ГТС, разрабатывались базы данных для информации о водных объектах. В УГЗ и ОИПИ НАН Беларуси создавались алгоритмы и программы расчета разрушения дамб, плотин и берегов, а также расчета экономических ущербов от аварий на водных объектах. В ОИПИ НАН Беларуси велись работы по применению цифровой картографии к изучению водных объектов. Специалисты из ОИПИ НАН Беларуси и БНТУ выполняли аэросъемку водных объектов с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и исследовали вопросы применимости результатов аэросъемки. Научными руководителями работ на разных этапах были доктор технических наук, профессор В. Е. Левкевич (БНТУ, ОИПИ НАН Беларуси), кандидат физико-математических наук В. А. Мильман (ОИПИ НАН Беларуси) и доктор технических наук, академик С. В. Абламейко (БГУ, ОИПИ НАН Беларуси).

Рассматривались следующие водные объекты:

- водохранилища с малыми гидроэлектростанциями;
- водохранилища для водоснабжения и регулирования стока;

- водохранилища технического назначения (охладительные, технологические, очистные);
- пруды-накопители мелиоративных и польдерных систем;
- шламоохранилища;
- судоходные реки и каналы.

По перечисленным типам водных объектов выделены группы тестовых объектов на территории всех областей Беларуси. На тестовых объектах проведены натурные обследования, в ходе которых зафиксированы деформации и повреждения гидротехнических сооружений, разрушения берегов, заболачивания прибрежной зоны. Замерены количественные показатели повреждений, определены вероятные повреждающие факторы и явления.

По итогам результатов обследований предложена классификация типичных повреждений ГТС водных объектов. Выделены основные группы повреждений, несущих опасность возникновения чрезвычайных ситуаций. Наиболее часто встречаются повреждения сооружений напорного фронта (дамб и плотин). Типичны повреждения верхового откоса, такие как поломка плит крепления и вынос грунта из-под крепления. Встречается опасное разрушение низового откоса – суффозионный вынос грунта, возникающий при нарушении нормальной фильтрации воды через сооружение. На многих водохранилищах и прудах отмечены повреждения водосбросных и водорегулирующих сооружений, особенно это характерно для прудов-накопителей мелиоративных и польдерных систем, а также разрушения берегов. Некоторые типичные повреждения проиллюстрированы ниже.

Наиболее вероятной причиной разрушения верховых откосов дамб и плотин признано комплексное воздействие природных факторов: волн и течений (абразия), дождей и ветров (эрозия), а также льда. Возможной причиной нарушения фильтрационной устойчивости плотин являются изменения условий эксплуатации водохранилищ, ошибки при проектировании и эксплуатации.

Натурные обследования показали, что состояние большинства водных объектов не несет непосредственной угрозы чрезвычайных ситуаций с тяжелыми последствиями. Однако многочисленные повреждения и деформации ГТС повышают вероятность аварий, особенно при экстремальных природных явлениях (паводках, ледоходе). Из этого следует целесообразность периодического обследования состояния водных объектов. Предложены понятие экспресс-обследования состояния водных объектов с целью оценки опасности чрезвычайных ситуаций и методические рекомендации по проведению экспресс-обследования.

Для накопления информации об обследованиях водных объектов разработаны два варианта специализированных баз данных (БД), обеспечивающих ввод, хранение, поиск и выдачу информации. Первый вариант специализированной БД является простым и рассчитан на быстрое освоение пользователем с начальным уровнем подготовки. БД основана на стандартных средствах пакета программ Microsoft Office и реализована в виде шести независимых частей, каждая из которых соответствует одной из областей Беларуси. Части БД заполнены общей информацией о водных объектах и результатами натурных обследований. Этот вариант БД передан для использования во все областные управления МЧС. Некоторые экранные диалоговые формы БД изображены на рис. 1 и 2.

Второй вариант БД водных объектов предназначен для работы совместно с геоинформационной системой, разработанной в лаборатории картографических систем и технологий ОИПИ НАН Беларуси. БД позволяет вводить, хранить и выдавать пользователю в удобной форме наиболее полный в настоящее время перечень характеристик водных объектов и ГТС. БД ГТС построена с помощью реляционной модели представления данных. В качестве системы управления базами данных используется Microsoft SQL Server. Система строится по трехуровневой архитектуре: клиент (средство веб-просмотра), веб-сервер, SQL-сервер (сервер БД). Доступ к БД с рабочих мест пользователей выполняется с помощью средств клиентской операционной системы. Клиент отображает серверные страницы и обеспечивает интерактивное взаимодействие с системой БД.

Для хранения информации о водных объектах и ГТС в БД разработаны несколько десятков видов таблиц и справочников. Для взаимодействия с пользователем созданы экранные диалоговые формы в виде окон, некоторые из них показаны на рис. 3.



Повреждения в нижнем бьефе на вдхр. Волпа



Повреждения водосбросных сооружений на вдхр. Лаздуны



Разрушения плит креплений откоса на Чигиринском вдхр.



Вывос грунта из-под плит крепления откоса на вдхр. Млынок



Разрушение берега на Вилейском вдхр.



Подтопление леса на вдхр. Гродненской ГЭС

Область	Район	Название водохранилища	Бассейн реки	Река, озеро, канал	Тип	Вид регулирования	Основное назначение	Год ввода в эксплуатацию	Объем, км³ пользой по летам	Площадь, км²	Отметка НПУ/УМО, м	Длина, км вдр, береговая линия	Ширина, км максимальная по средине	Глубина, м максимальная по средине					
Могилевская	Горький	Днепр	Днепр	р. Днепр	руслонное	сезонное	орошение, работа водозабора	1979	4,43,6	0,98	184,0179,0	6,016,2	0,30,16	8,54,5					
Крытая характеристика сооружений напорного фронта		Состав гидротехнических сооружений		Техническое состояние сооружений		Берегоукрепительные сооружения		Водосборные сооружения		Вольфутьски		Плотина		Дата проведения натурной обследования		Фотоаэрирование (состояние)		Расположение на карте Республики Беларусь	
Плотина—земляная, длиной 375 м, с трубчатой дренажной, верховой откос пологого заложения, максимальная высота плотины —10,0 м, ширина плотины по гребню —6,5 м. Водосброс —бетонный, лотный, трубчатый, с тремя вальцовыми ковшо-вамя оголовками и латно вышки трубопроводов диаметром 500 мм, автоматиче-ский. Водоспуск —лотный, трубчатый, диаметром 400 м, рассчитан на пропуск рас-хода воды—1,4 м³/с.		плотина, водосброс, водоспуск		Эксплуатирует водохранилище РУП «Учхоз ВГСМА».		0		0		0		0		29.09.2011		0		0	

Рис. 1. Главная страница БД на основе Microsoft Office

Область	Район	Название водохранилища	Бассейн реки	Река, озеро, канал	Тип	Вид регулирования	Основное назначение	Год ввода в эксплуатацию	Объем, км³ пользой по летам	Площадь, км²	Отметка НПУ/УМО, м	Длина, км вдр, береговая линия	Ширина, км максимальная по средине	Глубина, м максимальная по средине					
Могилевская	Горький	Днепр	Днепр	р. Днепр	руслонное	сезонное	орошение, работа водозабора	1979	4,43,6	0,98	184,0179,0	6,016,2	0,30,16	8,54,5					
Крытая характеристика сооружений напорного фронта		Состав гидротехнических сооружений		Техническое состояние сооружений		Берегоукрепительные сооружения		Водосборные сооружения		Вольфутьски		Плотина		Дата проведения натурной обследования		Фотоаэрирование (состояние)		Расположение на карте Республики Беларусь	
Плотина—земляная, длиной 375 м, с трубчатой дренажной, верховой откос пологого заложения, максимальная высота плотины —10,0 м, ширина плотины по гребню —6,5 м. Водосброс —бетонный, лотный, трубчатый, с тремя вальцовыми ковшо-вамя оголовками и латно вышки трубопроводов диаметром 500 мм, автоматиче-ский. Водоспуск —лотный, трубчатый, диаметром 400 м, рассчитан на пропуск рас-хода воды—1,4 м³/с.		плотина, водосброс, водоспуск		Эксплуатирует водохранилище РУП «Учхоз ВГСМА».		0		0		0		0		29.09.2011		0		0	

Рис. 2. Данные по выбранному объекту в диалоговой форме БД

**База данных гидротехнических сооружений**

Меню: Главная администратор

**Комплекс ГТС**

Наименование сооружения\* вдр. Петровича

Назначение сооружения Водоснабжение

Дата включения в реестр 13.10.2000

Местоположение сооружения (В, L):  
Основная точка 52° 17' 27" N, 27° 22' 01" E  
Вспомогательная точка

Организация собственник: Контракт 1

Эксплуатирующая организация: Контракт 1

Численность службы эксплуатации ГТС: всего 200

в т.ч. лиц, имеющих специальное образование 120

Балловная стоимость ГТС (на год включена в реестр) 1000000

Остаточная стоимость ГТС (на год включена в реестр) 800000

Процент износа 35

Ввод в эксплуатацию 01.01.1988

Максимальный размер распространения последствий аварии ГТС (км. кв) 40

Наличие системы оповещения об угрозе ЧС Да

**Выбор и редактирование справочников**

Меню: Главная администратор

**Справочники**

- предназначения гидротехнических сооружений
- единицы измерения уровня безопасности ГТС
- ГТС по виду сооружения
- ГТС по виду и типу сооружения
- ГТС по материалу строительства
- ГТС по расположению в устье сооружения
- ГТС по типу оборудования водосливной части
- ГТС по конструкции головной части
- ГТС по конструкции водоподъемного устройства
- ГТС по типу сооружения водопровода
- ГТС по высокому расположению водопровода
- ГТС по способу управления затвором водозабора по способу подвода воды
- водозабора по способу подвода воды
- водозабора по материалу изготовления канавок по назначению
- канавок по материалу облицовки
- ГТС по конструкции и материалу крепления
- ГТС по виду складываемых опорах
- зданий ГТС по назначению и расположению
- насосных станций по надежности подвода воды
- радиотехнических сооружений по конструкции
- оповещения по способу удаления наносов
- оповещения по месту расположения
- оповещения по назначению
- техническим оповещением
- типов групп основания
- иные отраслей и подотраслей экономики
- коды классов ГТС

ВД ГТС - версия 1.1  
разработчик: СИЭИ НАН Беларуси

Рис. 3. Диалоговые формы ввода информации о ГТС

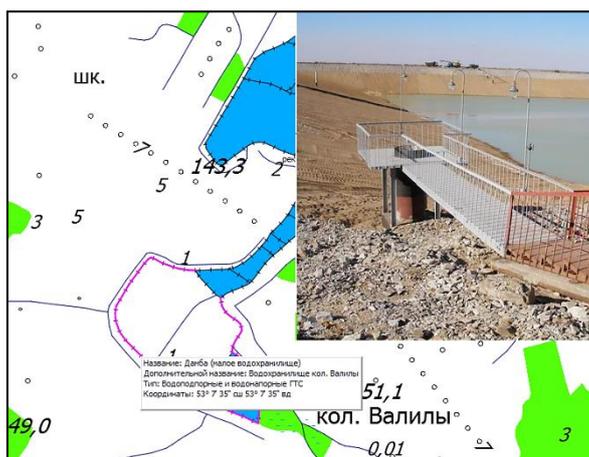


Рис. 4. Вывод краткой справочной информации для объекта «Дамба»

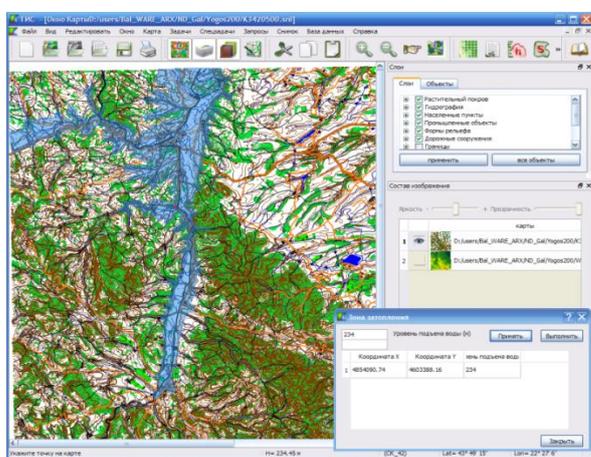


Рис. 5. Моделирование зоны затопления на основе матрицы высот



Рис. 6. Квадрокоптер модели DJI Phantom 3 Professional



Рис. 7. Разрушение берегов (съемка с БПЛА)

Геоинформационная система (ГИС) выполняет функции создания, редактирования, трансформирования и отображения картографической информации. Имеется возможность подключения пользовательских БД и отображения пользовательской информации в картографической форме. Для возможного использования в задачах анализа безопасности водных объектов в ГИС выполнены доработки. В частности, обеспечена возможность отображения информации из БД водных объектов, привязанной к конкретному объекту карты (рис. 4). Это позволяет использо-

вать ГИС как на этапе планирования обследования водных объектов, так и на этапе анализа результатов обследований. Для анализа последствий возможных прорывов плотин в ГИС включена функция расчета высот рельефа в матричной форме и процедура моделирования затопления местности (рис. 5).

Для оценки и прогнозирования развития деформаций и повреждений ГТС и берегов водных объектов разработаны модели, формулы, алгоритмы и программы расчета следующих показателей:

- волнового воздействия на берега водоема;
- общей и местной устойчивости откосов земляных гидротехнических сооружений;
- устойчивости креплений откосов;
- фильтрационной устойчивости плотин из грунтовых материалов;
- подтопления при воздействии водных объектов на прилегающие территории;
- подпора грунтовых вод при подъеме уровня воды в водоемах,

а также величины деформации берегов от воздействия водных объектов на прилегающие территории; алгоритмы отбора объектов, подвергающихся опасности при аварии на водохранилище; размеры подтопления прибрежной территории русловых водохранилищ и модели формирования и развития подводной части береговой отмели.

При расчете волнового воздействия на берега водоема программно реализован алгоритм вычисления длины разгона волны в соответствии с государственным стандартом Республики Беларусь. Выявился недостаток данного алгоритма, проявляющийся в резком изменении длины разгона при малом изменении координат точки береговой линии, в которой рассматривается волновое воздействие. Это случается при рассмотрении водохранилищ вытянутой формы, что характерно для водохранилищ руслового типа. Предложен другой алгоритм вычисления длины разгона волны, лишенный указанного недостатка.

Для прогнозирования величин деформации берегов от воздействия водных объектов применен подход, предложенный В. Е. Левкевичем. Величина деформации выражается в виде линейного уравнения от трех безразмерных агрегированных показателей. Первый показатель описывает морфометрические характеристики водохранилища на расчетном створе, второй – гидрологический режим водохранилища и третий – геоморфологические характеристики берегового склона. Коэффициенты линейного уравнения определяются методом наименьших квадратов на основе натурных измерений.

К настоящему времени натурные наземные обследования являются единственным способом наблюдения за состоянием ГТС и берегов водных объектов. Натурное обследование водохранилищ большого размера требует значительного времени, что не всегда удобно в задачах предупреждения чрезвычайных ситуаций. Для ускорения процесса обследования предложено использовать съемку с БПЛА. Необходимо установить, какие повреждения и деформации ГТС и берегов водных объектов распознаются по фотосъемке с БПЛА. Проведены экспериментальные съемки ряда водохранилищ с БПЛА – квадрокоптера модели DJI Phantom 3 Professional (рис. 6).

Установлено, что съемка с БПЛА позволяет выявить следующие повреждения:

- разломы плит крепления откосов плотин;
- раскрытие стыков между плитами крепления плотин;
- значительные деформации гребня плотин;
- разрушения откосов плотин;
- разрушения берегов водных объектов (рис. 7);
- подтопление прибрежных территорий, в том числе лесов.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что если БПЛА под управлением оператора способен облететь береговую линию водного объекта, то результаты съемки дают достаточную информацию для экспресс-обследования состояния объекта.

Результаты выполненных работ служат научной основой мониторинга состояния водных объектов и ГТС для выявления опасных процессов, приводящих к чрезвычайным ситуациям. Регулярный мониторинг позволяет вовремя выявлять нарушения и принимать меры по профилактике чрезвычайных ситуаций и снижению возможного ущерба.

УДК 681.32

## Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования

### **Маршалович Виктор Егорович**

*заведующий научно-исследовательским отделом «Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования»*

*E-mail: marshalovich@newman.bas-net.by*

### **Рымарчук Александр Григорьевич**

*главный конструктор проекта научно-исследовательского отдела*

*«Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования»*

*E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by*

### **Чиж Олег Петрович**

*заведующий лабораторией высокопроизводительных систем*

*E-mail: otchij@newman.bas-net.by*

### **Мурашко Владимир Владимирович**

*ведущий инженер-программист научно-исследовательского отдела*

*«Республиканский суперкомпьютерный центр коллективного пользования»*

*E-mail: uladm@newman.bas-net.by*

**Введение.** Разработка и использование технологий высокопроизводительных параллельных вычислений выступают важной мировой тенденцией развития. Так, созданное в 2018 г. совместное предприятие ЕугоНРС занимается разработкой общеевропейской инфраструктуры суперкомпьютеров и поддержкой научно-исследовательской и инновационной деятельности. Три суперкомпьютера ЕугоНРС входят в ТОП 10 мирового рейтинга ТОП 500 июля 2024 г. Для Союзного государства актуальной задачей является продолжение работ по развитию суперкомпьютерных вычислений. Экономический прогресс, политическая стабильность и безопасность Союзного государства существенно зависят от успехов в решении данной задачи. Поэтому важно рассмотреть уровень развития суперкомпьютерного направления СКИФ в Республике Беларусь, а также структуру и состав ресурсов Республиканского суперкомпьютерного центра коллективного пользования (далее – РСКЦ КП), включая системное и лицензионное прикладное программное обеспечение.

**Общие сведения.** Создание РСКЦ КП связано с завершением работ по первой программе развития суперкомпьютерных технологий Союзного государства «СКИФ». Венцом этой программы стало создание кластерных суперкомпьютерных конфигураций СКИФ VM-5100, K-500, K-1000.

Для объединения вычислительных мощностей кластерных суперкомпьютерных конфигураций (суперкомпьютеров) СКИФ VM-5100, K-500 и K-1000 и продолжения работ по созданию высокопроизводительных систем на основании постановления Бюро Президиума НАН Беларуси от 09.09.2004 № 503 было принято решение о создании РСКЦ КП.

Суперкомпьютерное направление СКИФ развивается в Республике Беларусь в рамках программ Союзного государства. Важнейшим практическим результатом выполнения программы СКИФ (2000–2004 гг.) стал выпуск образцов кластерных конфигураций семейства СКИФ ряда 1 и ряда 2 с пиковой производительностью в диапазоне от десятков миллиардов до нескольких триллионов операций в секунду. Суперкомпьютеры семейства СКИФ ряда 2 СКИФ-K500 и СКИФ-K1000 входили в Top 500 самых мощных суперкомпьютеров мира и в Top 50 самых мощных суперкомпьютеров СНГ. При этом в 2003 г. суперкомпьютер СКИФ-K500 занимал 407-е место в 22-м выпуске мирового рейтинга Top 500. В 2004 г. суперкомпьютер СКИФ-K1000 занял 98-е место в 24-м выпуске рейтинга Top 500 и возглавил рейтинг Top 50 самых мощных компьютеров СНГ [1].

Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ ряда 3 и ряда 4 (очередная генерация моделей семейства СКИФ) созданы в рамках программы Союзного государства «СКИФ-ГРИД» (2007–2010 гг.). Примером конфигурации ряда 3 является созданный в Республике Беларусь кластер СКИФ К-1000М (пиковая производительность 5,0 Тфлопс).

В 2010 г. суперкомпьютер СКИФ-ГРИД имел самую высокую производительность в семействе белорусских моделей СКИФ ряда 4. Пиковая производительность суперкомпьютера СКИФ-ГРИД (36 вычислительных узлов и два управляющих узла) составляла на тесте Linpack без учета графических ускорителей вычислений 8,0 Тфлопс при показателе эффективности 82,15 %. Все суперкомпьютеры семейства СКИФ ряда 4 в свое время входили в соответствующие редакции рейтинга Top 50 самых мощных суперкомпьютеров СНГ.

Во время выполнения программы «Триада» (2005–2008 гг.) основное внимание уделялось внедрению суперкомпьютерных технологий в науку, образование, промышленность, а также созданию малогабаритных суперкомпьютерных конфигураций, которые в дальнейшем стали основой для персональных (офисных) кластеров.

В соответствии с программой Союзного государства «СКИФ-НЕДРА» (2015–2018 гг.) в Республике Беларусь были созданы три опытных образца суперкомпьютеров серии СКИФ-ГЕО. Суперкомпьютер СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ предназначался для решения ресурсоемких геолого-геофизических задач в центрах обработки данных (ЦОД). Мини-суперкомпьютер СКИФ-ГЕО-АПК РБ – для обеспечения вычислительными ресурсами небольших предприятий типа «НПЦ геология». Компактный вычислительный кластер СКИФ-ГЕО-Офис РБ, удовлетворяющий требованиям условий эксплуатации в офисных помещениях, – для структурных подразделений (офисов) геолого-геофизической отрасли. В офисном кластере были реализованы отечественные конструктивно-технологические решения компоновки кластера и отвода тепла от процессора на основе радиатора с запрессованными тепловыми трубами. Суперкомпьютер СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ вошел в 29-ю редакцию от 24 сентября 2018 г. рейтинга Top 50 самых мощных суперкомпьютеров СНГ под номером 37 с пиковой производительностью 100 Тфлопс. Вычислительный кластер СКИФ-ГЕО-Офис РБ включен в Топ 10 лучших разработок НАН Беларуси за 2017 г.



СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ



СКИФ-ГЕО-ОФИС

В 2020 г. в рамках программы «Развитие инфраструктуры суперкомпьютерных центров в интересах инновационного развития стран – участниц СНГ» были завершены работы по созданию суперкомпьютера СКИФ-ГРИД-СНГ. Его вычислительные узлы оснащены графическими видеокартами для ускорения потоковых вычислений и поддержки визуализации вычислений на каждом узле [1].

В процессе разработки суперкомпьютерных конфигураций по программам «СКИФ» были получены следующие патенты Республики Беларусь и Российской Федерации [1]:

Корпус кластера персонального VM5300: пат. ВУ 1904 от 01.03.2010.

Серверная стойка с воздушным охлаждением: пат. ВУ 2339 от 01.02.2010.

Теплоотвод для процессора: пат. ВУ 12012 от 01.04.2019.

Компактный вычислительный кластер: пат. ВУ 12417 от 28.02.2020.

Теплоотвод для процессора: пат. RU 189231 от 16.05.2019.

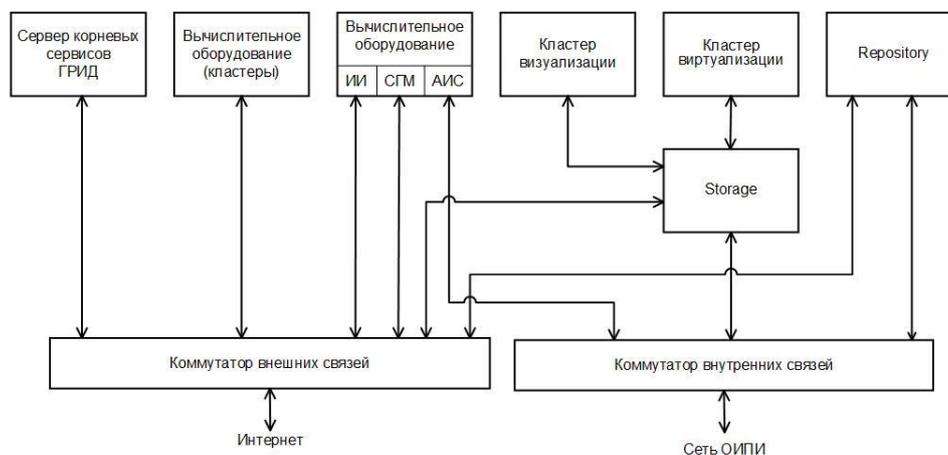
В настоящее время находятся в эксплуатации в РСКЦ КП опытные образцы суперкомпьютеров СКИФ-ГРИД-СНГ, СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ и СКИФ-ГЕО-Офис РБ, опытный образец СКИФ-ГЕО-АПК РБ в НПЦ геология. В таблице представлены основные технические характеристики этих моделей.

Технические характеристики моделей кластеров

Характеристики	СКИФ-ГРИД-СНГ	СКИФ-ГЕО-ЦОД-РБ	СКИФ-ГЕО-АПК-РБ	СКИФ-ГЕО-ОФИС-РБ
Количество узлов / GPU	17/17 (дискретные GPU)	34/1 (дискретный GPU)	6/1 (дискретный GPU)	9/9 (встроенные GPU)
Количество ядер	340	1224	120	18
Объем ОП на узле, ГБ	96	192–768	64	32
Производительность в архитектуре x86-64 на Linpack, Тфлопс	10,62 (16 узлов)	65,95 (36 узлов)	3,43 (6 узлов)	0,591 (9 узлов без GPU)
Системная сеть, Гбит/с	InfiniBand EDR, 100	InfiniBand EDR, 100	Ethernet 10	Ethernet 1,0
Объем дисковой памяти файлового сервера, ТБ	80	32	24	1,2

В зале РСКЦ КП размещаются суперкомпьютерные конфигурации, созданные по программам «СКИФ», «СКИФ-ГРИД», «ТРИАДА», «СКИФ-НЕДРА», «Развитие инфраструктуры суперкомпьютерных центров в интересах инновационного развития стран – участниц СНГ». Также в нем расположены вычислительные установки ОИПИ НАН Беларуси, требующие для своей работы определенные условия эксплуатации, которые поддерживаются в РСКЦ КП.

На структурной схеме (рисунок) показаны основные функциональные группы оборудования РСКЦ КП и сетевые связи между ними. На схеме не показаны отдельные вычислительные кластеры и вычислительные установки ОИПИ НАН Беларуси, так как они объединены в две отдельные группы.



Укрупненная структурная схема вычислительного оборудования РСКЦ КП  
(ИИ – искусственный интеллект; СГМ – система глобального мониторинга;  
АИС – автоматизированная информационная система)

**Технические сведения.** Вычислительный зал центра занимает площадь  $\sim 90 \text{ м}^2$  и имеет два подключения к трехфазной электросети мощностью 120 и 98 кВт·А. Для контроля работы источников бесперебойного питания, электропитания, подаваемого в монтажные шкафы с оборудованием, температуры и влажности в монтажных шкафах используется разработанный сотрудниками РСКЦ КП аппаратно-программный комплекс управления инфраструктурой суперкомпьютерного центра.

Для поддержания климатических условий в РСКЦ КП применяется комбинированная система воздушного охлаждения на основе гибридного фрикулинга. Для этого имеются приточно-вытяжная вентиляция и кондиционирование (три кондиционера). Подача уличного воздуха, прошедшего через фильтры, осуществляется в зал с вычислительным оборудованием и на вхо-

ды кондиционеров. С выходов кондиционеров происходит заброс охлаждающего воздуха через воздуховоды и жалюзи в зал непосредственно перед монтажными шкафами с оборудованием. Горячий воздух от монтажных шкафов отводится в вытяжную вентиляцию (на улицу). В зависимости от температуры холодного воздуха, поступающего с улицы, производится автоматическое управление положением заслонок в воздуховодах приточно-вытяжной вентиляции и смешивание входящего воздуха с нагретым воздухом, который отводится из зала. Выбранная комбинированная система охлаждения позволяет с сентября по май (семь – восемь месяцев) обходиться возможностями приточно-вытяжной вентиляции, обеспечивая экономию электроэнергии для охлаждения.

Также РСКЦ КП оборудован системой газового пожаротушения с контролем задымления вычислительного зала.

**Программное обеспечение РСКЦ КП.** Программное обеспечение суперкомпьютеров поддерживает разработку параллельных программ и выполнение задач в распределенной среде.

Системное программное обеспечение для суперкомпьютерных конфигураций включает следующие основные программные компоненты:

- операционную систему (ОС). В качестве базовой используется ОС Linux на основе последних версий дистрибутива Fedora с обновлениями для повышения производительности вычислительных кластеров;

- программные средства поддержки системной сети Infiniband (IB). Для работы с сетевой средой Infiniband используются программные средства проекта OFED (Open Fabrics Enterprise Distribution) – набор программного обеспечения (ПО) с открытым исходным кодом для развертывания и управления сетей IB;

- средства разработки параллельных программ. В качестве средства параллельного программирования используется библиотека функций обмена данными между процессами MPI, реализованная для различных языков программирования (C, C++, Fortran);

- системы пакетной обработки заданий. В качестве программных средств пакетной обработки заданий используется свободно распространяемая версия системы пакетной обработки PBS (Portable Batch System) – Torque (Terascale Open-source Resource and QUEue Manager), разработанная компанией ClusterResources, Inc. на основе OpenPBS; в качестве планировщика задач – свободно распространяемый программный пакет Maui. Применяются последние версии пакетов Torque и Maui, полученные с сайтов разработчиков.

С целью контроля работоспособности суперкомпьютеров используется свободно распространяемая система Ganglia, которая предназначена для мониторинга вычислительных комплексов, ведет сбор статистики и отслеживает историю (загруженность процессоров, сети) вычислений в реальном времени для каждого из наблюдаемых вычислительных узлов суперкомпьютеров.

На вычислительных кластерах также установлено лицензионное прикладное ПО. Оно оптимизировано под вычислительную архитектуру кластеров. Коммерческая версия LS-DYNA используется для решения задач в области нелинейных быстропротекающих динамических процессов (машиностроение, приборостроение, электроника, строительство). Многоцелевой программный пакет ANSYS применяется для проведения инженерных расчетов. Квантово-химические расчеты осуществляются в программном комплексе Gaussian, молекулярно-механические – Amber. Также для инженерных расчетов используется пакет открытого свободно распространяемого ПО OpenFoam, для молекулярно-динамического моделирования – пакет NAMD. Большинство прикладных программных пакетов функционируют в режиме распределенных вычислений MPI.

**ГРИД-инфраструктура.** Полноценное развитие грид-технологий в Республике Беларусь связано с выполнением программы Союзного государства «СКИФ-ГРИД», в рамках которой началось создание национальной грид-инфраструктуры с целью привлечения пользователей к использованию новых технологий.

В основу грид-инфраструктуры положено открытое ПО системы Unicore. Физически грид-система подключается к сети Интернет через шлюзы. Главными ее функциями являются сопо-

ставление внешних и внутренних адресов и на основе совпадений организация безопасных соединений как между клиентской частью и сервисами грида, так и между компонентами грида.

Вычислительные сервисы грида работают на Linux-системах. Клиентская часть может работать также с другими ОС, такими как Windows, Android.

Для подключения к шлюзу используется протокол SSH (Secure SHell). SSH – сетевой протокол прикладного уровня, предоставляющий возможность удаленного управления ОС или туннелирования TCP-соединений (для передачи файлов). Поскольку при помощи SSH возможна безопасная передача практически любых других сетевых протоколов, становится возможным не только удаленное управление компьютером, но и защищенная передача информации по зашифрованному каналу.

Для прохождения аутентификации необходимо наличие сертификатов X.509 как у клиента, так и у серверных компонентов системы.

В процессе формирования национальной грид-инфраструктуры были созданы опытный участок грид-сети на базе ресурсов ОИПИ НАН Беларуси, Объединенного института энергетических и ядерных исследований «Сосны» НАН Беларуси, Белорусского государственного университета, Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Белорусского национального технического университета и региональный грид-сегмент на базе ресурсов Гродненского государственного университета. В ОИПИ НАН Беларуси созданы операционный центр и удостоверяющий центр по выдаче сертификатов сервисов и пользователей [2].

Информационная телекоммуникационная инфраструктура РСКЦ КП базируется на республиканской академической сети BAS-NET. РСКЦ КП подключен к сети BAS-NET посредством волоконно-оптических линий связи со скоростью 1 Гбит/с.

Защищенность одновременно выполняющихся грид-заданий на вычислительных кластерах обеспечивается внутренними механизмами защиты и шифрования обмена. Минимальным уровнем обеспечения безопасности при работе с кластерной системой является использование защищенных соединений. Взаимодействие удаленных пользователей с РСКЦ КП по сети осуществляется по защищенному протоколу на основе пользовательских и серверных сертификатов.

Для защиты информации в РСКЦ КП используются также сетевые средства защиты информации, такие как межсетевые экраны и зашифрованные соединения между суперкомпьютером и удаленной сетью типа VPN.

Для обеспечения работы сервисов ГРИД и повышения их надежности применяются облачные решения на многоузловых вычислительных платформах.

**Визуализация данных.** Неотъемлемой и важнейшей частью современного анализа различных процессов в любой отрасли естественных наук является визуализация данных. Существует значительное число средств визуализации научных данных, обладающих широкими функциональными возможностями. К сожалению, объем визуализируемых с их помощью данных естественным образом ограничен ресурсами персонального компьютера клиента системы. Система визуализации РСКЦ КП, реализованная на базе технологии клиент-сервер, включает: суперкомпьютерные вычислительные ресурсы в рамках распределенной грид-инфраструктуры, удаленное рабочее место (клиент системы), локальную (или глобальную) сеть. В качестве технологических решений, обеспечивающих работу системы визуализации, был выбран графический протокол VNC.

При этом на удаленном сервере визуализации должна быть запущена программа-сервер (VNC server), которая играет роль клавиатуры, мыши и монитора и обменивается данными с компьютером пользователя. Доступ к VNC-серверу может быть защищен паролем.

На компьютере пользователя должна быть запущена программа-клиент (VNC client, VNC viewer), которая передает на удаленный сервер визуализации информацию о нажатиях на клавиши и движениях мыши, получает от него изображение и выводит его на экран [3].

Отличительными особенностями данного решения являются:

- возможность запуска серверной компоненты визуализации на любой аппаратной платформе, поддерживающей работу сервера XWindows (NVIDIA, ATI, Intel и т. п.);
- аппаратная поддержка работы приложений, реализованных с использованием технологий OPENGL, CUDA и OPENCL;

- авторизация пользователей с использованием X.509 сертификатов, выданных удостоверяющим центром национальной грид-сети;
- возможность работы клиентской компоненты в качестве отдельного приложения ssnvc или через веб-интерфейс;
- возможность полноценной работы в высоком разрешении со сложными 3D-моделями при использовании обычных 3G-каналов мобильной связи;
- наличие полных исходных кодов продукта с возможностью их модификации.

Используемые средства визуализации позволяют создавать для пользователя полноценный удаленный графический стол, работающий на суперкомпьютерных ресурсах (сервере визуализации) распределенной вычислительной среды. При этом используются единые механизмы информационной безопасности (пользовательские и серверные цифровые сертификаты), реализованные в национальной грид-сети. Применение данной системы визуализации позволяет целиком или частично избегать копирования громоздких результатов суперкомпьютерного моделирования на рабочее место пользователя.

**Практическое использование суперкомпьютерных ресурсов.** Начиная с 2005 г., ОИПИ НАН Беларуси активно проводит работы по использованию вычислительных ресурсов РСКЦ КП. На вычислительных кластерах ведутся работы по моделированию динамических процессов геомеханики, строительной и машиностроительной механики, по разработке новых лекарств, материалов, нанотехнологий, изучению радиационных свойств материалов и другим направлениям.

Необходимо отметить, что при создании новой продукции и учете требований системы качества промышленные предприятия постепенно начинают использовать суперкомпьютерное моделирование и виртуальные испытания проектируемых образцов, вкладывая собственные средства. К таким предприятиям относятся ОАО «Белшина», ОАО «ВОЛАТАВТО», УП «АТОМТЕХ», БелНИИС, научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП», Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению и др.

Однако успешному освоению суперкомпьютерных технологий мешают недостаточная укомплектованность специалистами соответствующих профилей, отсутствие или нехватка информационно-вычислительных технологий, специального ПО, методик их использования, направленных на решение конкретных задач предприятий.

**Заключение.** В настоящее время кроме развития и замены вычислительного оборудования планируется:

- создать выделенную сетевую систему хранения на 200 ТБ для обеспечения архивирования ПО, наборов данных, хранения рабочих конфигураций кластеров;
- создать специализированные системы для визуализации данных, виртуализации процессов.
- обновить внутреннюю локальную сеть центра с 1 до 10/25/40 Гбит/с.

Серверное оборудование суперкомпьютеров, находящихся в эксплуатации более девяти лет, планируется после доукомплектования оперативной памятью и замены жестких дисков использовать для разработки облачных сервисов на основе системы виртуализации. Также планируется создание вычислительного кластера на основе процессоров AMD EPYC четвертого поколения. На РСКЦ КП будут продолжены установка и эксплуатация вычислительного оборудования приобретаемого другими подразделениями института.

### Публикации

1. Белорусские суперкомпьютеры семейства СКИФ / Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж, А. Г. Рымарчук [и др.] ; Обьединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. – Гомель : Вечерний Гомель-Медиа, 2020. – 268 с.
2. Операционный центр национальной грид-сети : [сайт]. – 2015. – URL: <http://noc.grid.basnet.by> (дата обращения: 25.05.2024).
3. X11vnc. VNC server for real X displays. – URL: <http://www.karlrunde.com/x11vnc/> (date of access: 25.05.2015).

УДК 004.415.2

## Отдел технологий цифровой трансформации. Основные исторические вехи

### **Матюшкова Галина Леонидовна**

*научный сотрудник отдела технологий цифровой трансформации*

*E-mail: matgala@tut.by*

### **Несенчук Алла Анатольевна**

*ведущий научный сотрудник отдела технологий цифровой трансформации*

*E-mail: anes@newman.bas-net.by*

### **Самсонов Виктор Евстратьевич**

*заведующий отделом технологий цифровой трансформации*

*E-mail: labnet@newman.bas-net.by*

В октябре 1975 г. совместным постановлением Президиума АН БССР и Министерства машиностроения СССР в структуре Института технической кибернетики АН БССР создается первая отраслевая лаборатория – лаборатория системного обеспечения САПР, которая должна была обеспечить широкое внедрение САПР в отрасли народного хозяйства. Заведующим лабораторией был назначен канд. техн. наук Г. И. Солодкин. В зале машинного проектирования института, созданном при непосредственном участии сотрудников лаборатории, отработывались программы систем автоматизированного проектирования. По мере развития новейших технологий в Республике Беларусь в 1997 г. лаборатория была реорганизована в лабораторию вычислительных сетей № 119. В 2002 г. в лаборатории № 119 была организована тематическая группа по разработке методов и средств автоматизации исследования и синтеза систем управления на основе корневого подхода (руководитель канд. техн. наук, вед. науч. сотр. А. А. Несенчук) в результате объединения лаборатории вычислительных сетей № 119 и лаборатории автоматизации проектирования динамических систем № 117, созданной в 1986 г. на базе реорганизованной лаборатории автоматизированных подсистем нормативных расчетов в машиностроении № 15 (1969–1986 гг., заведующий лабораторией канд. техн. наук Е. В. Владимиров).

В 2016 г. лаборатория № 119 реорганизуется в отдел технологий цифровой трансформации. Заведующим отделом назначается В. Е. Самсонов. Основными задачами отдела являются:

- проектирование и создание автоматизированных информационных систем с использованием технологий цифровой трансформации;
- исследование методов интеграции в автоматизированных информационных системах;
- разработка и исследование методов управления в автоматизированных информационных системах;
- моделирование информационных процессов в автоматизированных информационных системах;
- создание программно-технических комплексов, реализующих информационные технологии сбора, анализа данных и поддержки принятия решений для государственных органов;
- разработка средств обеспечения информационной безопасности в автоматизированных информационных системах;
- разработка методов и средств автоматизации исследования и проектирования (исследовательского) сложных динамических систем на основе общей теории корневых траекторий систем автоматического управления.

В последние годы отдел участвовал в выполнении заданий и проектов более чем 20 научных и научно-технических программ Республики Беларусь. Среди них можно отметить следующие:

ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», 2016–2020 гг.;

ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», 2021–2025 гг., подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика»;

ГП «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 гг.;

ГП «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 гг., подпрограмма 4 «Обеспечение инновационного развития отрасли жилищно-коммунального хозяйства».

Примеры освоения в производстве результатов научных исследований и разработок:

– параметрический ряд терминальных станций САПР на базе микро- и мини-ЭВМ с распределенным программным обеспечением для диалоговой работы с цифровыми геометрическими моделями, ставший прототипом для создания АРМ, широко применяемых в СССР в системах автоматизации проектирования;

– интегрированная автоматизированная система проектирования и изготовления изделий машиностроения (САПР-ГАП), в которой впервые в СССР были реализованы принципы бесшовной интеграции всех подсистем и где объектом проектирования становится весь жизненный цикл того или иного изделия – от конструкторского замысла до испытаний готовой машины или механизма (рис. 1);

– впервые в СССР разработанная и внедренная высокоскоростная локальная вычислительная сеть с аппаратным шифрованием IP-трафика на стандартных (рис. 2) и волоконно-оптических линиях связи для Министерства обороны СССР (рис. 3);

– корпоративная информационная система ОАО «БелАЗ» (КИС CALS BELAZ) (рис. 4 и 5). Впервые на промышленном предприятии в Беларуси была осуществлена реализация полного цикла системы «электронный документ» с электронной цифровой подписью (2010 г.) (рис. 6);

– АИС «Местные Советы депутатов» (внедрена в 2010 г.) (рис. 7);

– НАСТД (Национальная автоматизированная система таможенного декларирования) (2017 г.), с внедрением которой время выпуска товаров в таможенной процедуре экспорта составило от 3 до 5 мин (рис. 8);

– действующий экспериментальный образец автоматизированной системы электронного учета древесины (2018 г.) (рис. 9).

Последние годы отмечены выполнением НИР для использования в системах «умных городов» Республики Беларусь, в том числе:

– концепция «умный город» для Орши и Оршанского района и план ее реализации, проведено обследование объекта исследования, определены цели развития «умного города» и задачи для их реализации в регионе, разработаны дорожные карты для реализации концепции (2020 г.);

– предложения в концепции развития для административно-территориальных единиц с учетом их специфики, текущего уровня развития, требуемых (прогнозных) значений показателей оценки «умного города» (целевых критериев) в исследуемых областях;

– предложения в «дорожные карты» реализации концепций развития «умных городов» для административно-территориальных единиц;

– научно-практические рекомендации по подготовке Стратегии цифровой трансформации на региональном уровне (2020 г.);

– техническое задание на создание автоматизированной информационной системы «Смарт-платформа "Северный Берег"» (2022 г.).

Тематическая группа по разработке методов и средств автоматизации исследования и синтеза систем управления на основе корневого подхода была создана в 2002 г. на базе лаборатории автоматизации проектирования динамических систем № 117, заведующим которой до 2000 г. являлся чл.-корр., д-р техн. наук, проф., член Союза писателей Беларуси Г. В. Римский, создатель научной школы, автор более 300 научных публикаций. Сотрудниками тематической группы выполнено:

– семь проектов по договорам с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, включая совместные проекты с коллективами ученых из организаций Беларуси, России, Великобритании, Турции;

– пять заданий в рамках государственных программ ГПНИ, ГКПНИ, ГПОФИ и ГПФИ, в том числе задание «Робастное интеллектуальное управление в мехатронных технических и биотехнических системах» (ГПНИ 2021–2025 гг.);

– задание «Разработать и внедрить аппаратно-программный комплекс многодвигательного электропривода с векторным микропроцессорным управлением» в рамках Государственной научно-технической программы «Информационные технологии», 2011–2017 гг. Комплекс предназначен для согласованного управления двигателями в системе тягового электропривода с возможностью адаптивного и робастного управления с улучшенными характеристиками многодвигательного и однодвигательного тягового электропривода, в том числе без датчика скорости, оценивания параметров асинхронного тягового двигателя. Освоено серийное производство блока ИПТ-3 – инвертора переменного тока для согласованного управления двумя и более двигателями в системе тягового электропривода (разработка мирового уровня).



Зал машинного проектирования Института технической кибернетики АН БССР



Терминальная станция САПР на выставке достижений БССР



Рис. 1. Сквозная компьютерная технология проектирования и производства



Рис. 2. Сетевой адаптер с аппаратным шифрованием для однородных и неоднородных локальных вычислительных сетей



Рис. 3. Сетевой адаптер с аппаратным шифрованием для высокоскоростных волоконно-оптических вычислительных сетей

- Стандартизация представления информации в электронном виде (электронный документ – внутренний стандарт системы)
- Использование единой информационной магистрали, как средства интеграции для информационного взаимодействия внутри системы
- Осуществление взаимодействия на унифицированной основе
- Использование единой сети передачи данных
- Применение современных информационных технологий

Рис. 4. Основные принципы построения КИС CALS BELAZ

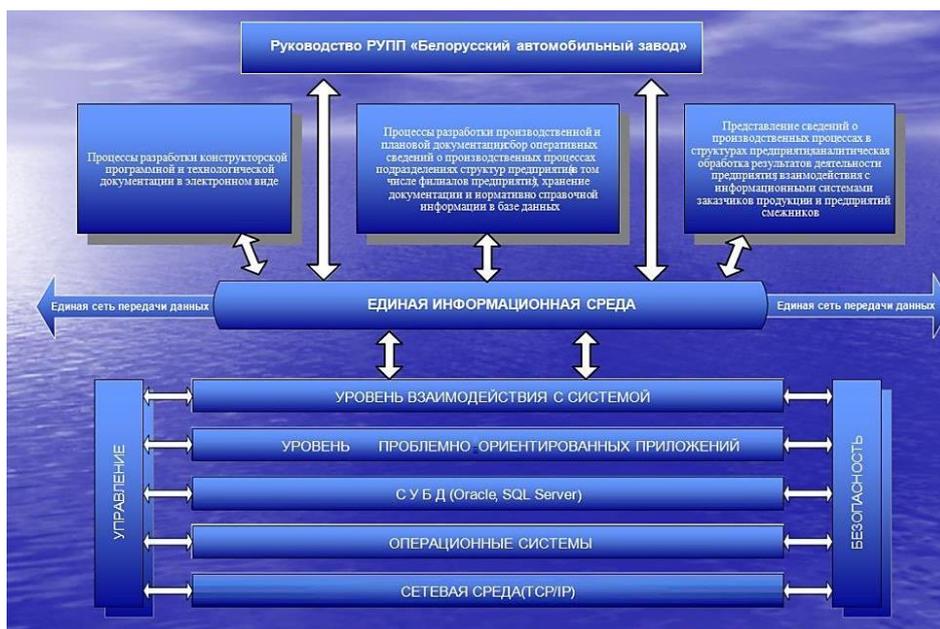


Рис. 5. Архитектура корпоративной информационной системы CALS BELAZ

- **Создание и редактирование электронных документов.**
- **Обеспечение согласования, утверждения, регистрации, помещения в архив.**
- **Создание и редактирование заданий, обеспечение их выполнения.**
- **Контроль за документами и заданиями.**
- **Создание, редактирование и отправка сообщений.**
- **Выполнение функций создания и проверки электронной цифровой подписи (ЭЦП) в соответствии с СТБ 1176.1-99 и СТБ 1176.2-99.**
- **Сертификат соответствия, выданный Оперативно-аналитическим центром при Президенте РБ**

Рис. 6. Система «электронный документ» и ЭЦП

Создана корневая теория робастных динамических систем с интервальной неопределенностью. Разработаны корневые методы для робастного синтеза и анализа систем автоматического управления, в том числе с применением к ряду мехатронных устройств; разработаны комплексы программ по параметрическому синтезу и исследованию интервальных систем управления на основе корневого подхода. Опубликовано более 220 научных работ, среди которых одна монография, два учебных пособия, главы в рецензируемых монографиях, вышедших в ведущих иностранных издательствах на английском языке.

Сотрудники тематической группы приняли участие в качестве докладчиков и председателей секции в работе более 60 регулярных международных научных и научно-технических мероприятий (конференций), в том числе за рубежом.

Деятельность сотрудников отдела была отмечена различными поощрениями. За разработку АИС «Местные Советы депутатов» совместно с Центром информационных технологий государственного учреждения «Главное хозяйственное управление» Управления делами Президента Республики Беларусь, РУП «Вычислительный центр Главного статистического управления Брестской области» и КПУП «Могилевский региональный информационный центр» ОИПИ НАН Беларуси отмечен дипломом XX Международной специализированной выставки и конгресса ТИБО 2013. В 2009 г. получены Благодарности ГТК Республики Беларусь за значительный личный вклад в создание и внедрение системы электронного декларирования таможенных органов Республики Беларусь (А. В. Кругляков, Е. В. Гучек).

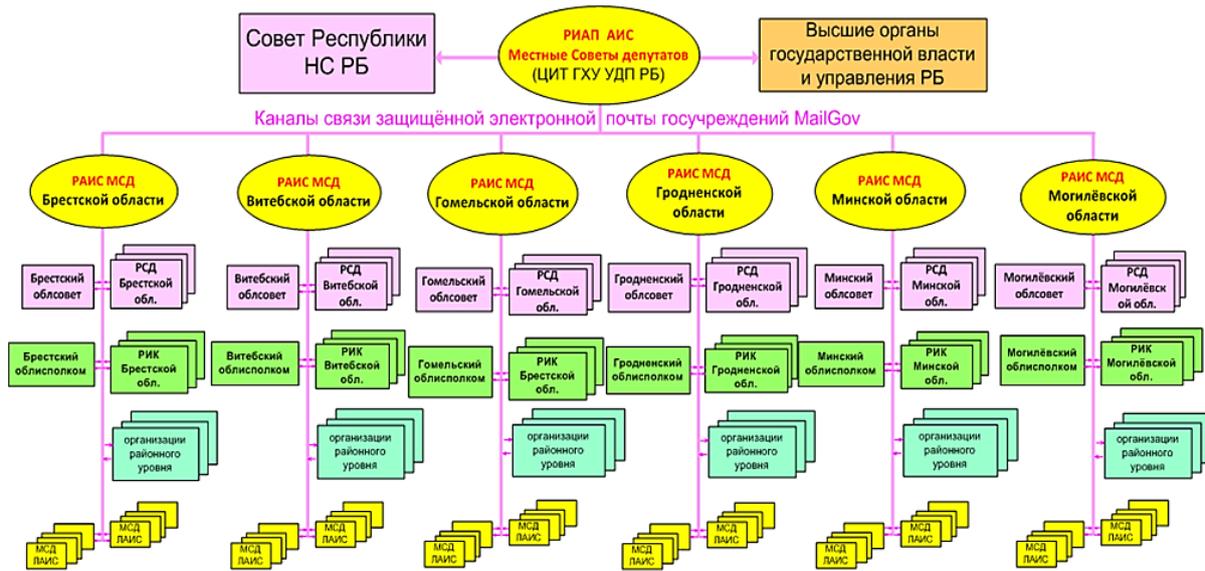


Рис. 7. Схема функционирования АИС «Местные Советы депутатов»:

РИАП АИС «Местные Советы депутатов» – республиканский информационно-аналитический портал АИС МСД;  
 РАИС МСД – региональная автоматизированная информационная система «Местные Советы депутатов»;  
 ЛАИС – локальная автоматизированная информационная система; РСД – районные и городские областного подчинения  
 Советы депутатов; РИК – районные исполнительные комитеты; МСД – местные (сельские, поселковые, городские)  
 Советы депутатов; ЦИТ ГХУ УДП РБ – центр информационных технологий государственного учреждения  
 «Главное хозяйственное управление» Управления делами Президента Республики Беларусь

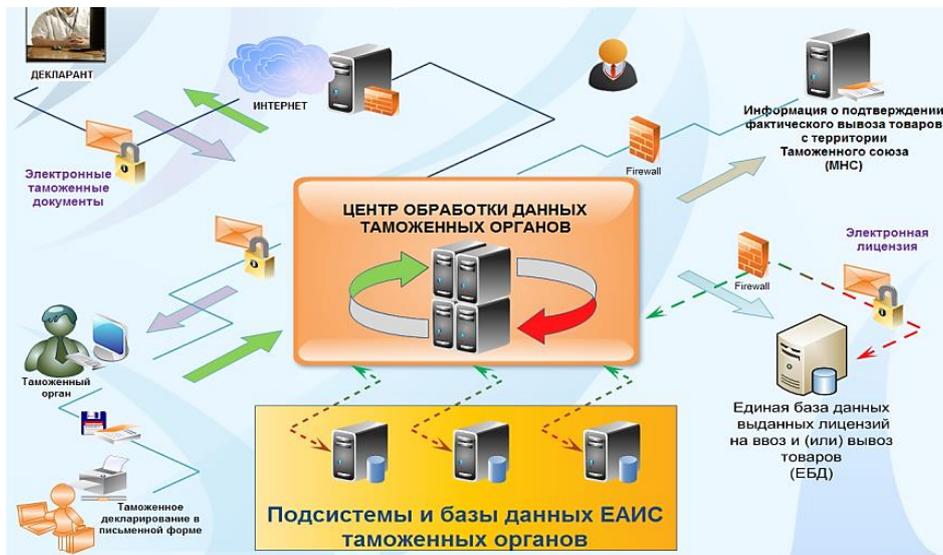


Рис. 8. Структура Национальной автоматизированной системы таможенного декларирования

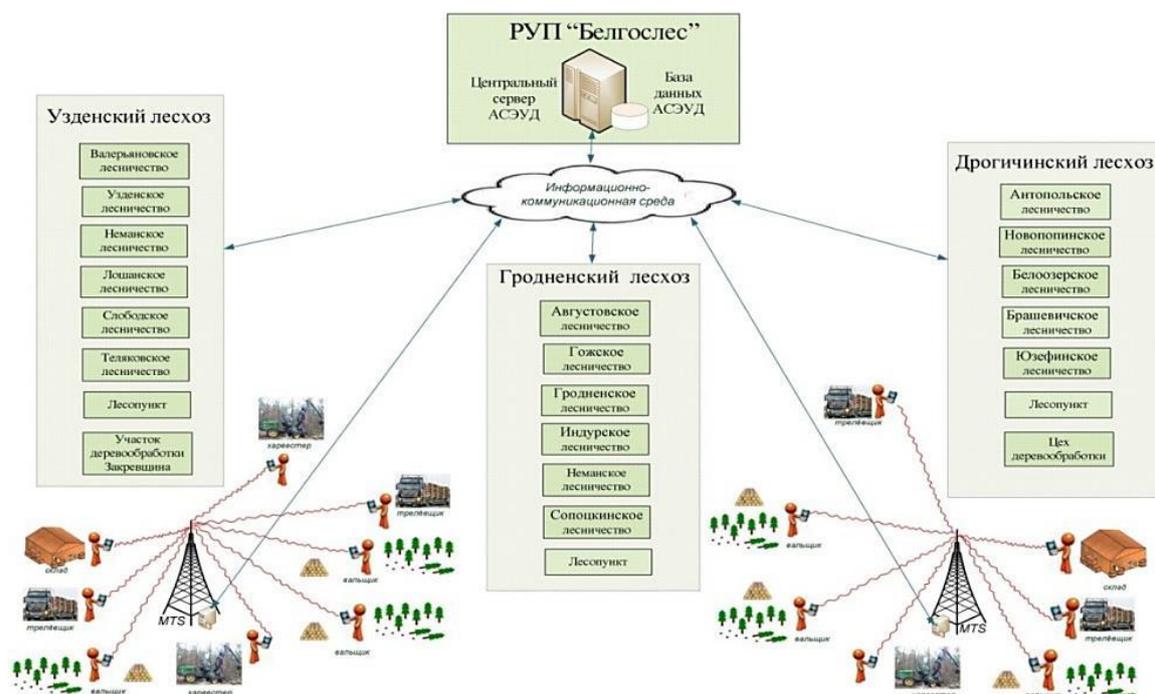


Рис. 9. Структура автоматизированной системы электронного учета древесины

В 2010 г. А. В. Орловский и Г. И. Солодкин награждены Почетной грамотой ГТК Республики Беларусь за достигнутые высокие показатели по внедрению в таможенных органах технологий производства таможенного оформления в случае использования электронного декларирования и проявленный при этом высокий профессионализм, а также достигнутые конкретные результаты. Г. И. Солодкин награжден юбилейной медалью в связи с 80-летием Национальной академии наук Беларуси, а в 2011 г. – Почетной грамотой НАН Беларуси за разработку информационных систем для органов государственного управления и местной власти. В 2015 г. А. А. Несенчук награждена грамотой Министерства образования Республики Беларусь.

В 2021 г. от издательства IntechOpen (Великобритания) А. А. Несенчук получила сертификат за высокий уровень скачивания (Chapter performance) главы в монографии "Polynomials – Theory and Application" (Полиномы – Теория и приложение), 2021.

УДК 621:006; 004.9;621:004; 025.31.4:(084+086); 002.6:004.89

## Лаборатория автоматизации процессов проектирования

**Муха Наталия Петровна**

*научный сотрудник отдела научно-методического обеспечения цифрового развития  
E-mail: mnp27@mail.ru*

**Губич Лилия Васильевна**

*заведующий лабораторией автоматизации процессов проектирования,  
кандидат технических наук, доцент*

Лаборатория автоматизации процессов проектирования вела свою деятельность с 2003 по 2024 г. Она была основана при реорганизации Института технической кибернетики АН Беларуси в ОИПИ НАН Беларуси путем слияния НИО «Кибернетика» и НИРУП «Системы автоматизации». В период начала деятельности лаборатории под руководством Губич Лилии Васильевны, кандидата технических наук, профессора, в ней работали шесть научных сотрудников: Д. Л. Васильев, Н. П. Муха, А. А. Прохорова, Н. И. Петкевич, И. Г. Биох, И. И. Шибут.

**Научные направления деятельности лаборатории.** За годы существования лаборатории ее сотрудники работали по следующим направлениям:

- исследования и разработка технологии сквозного компьютерного проектирования и производства новой продукции на предприятиях Республики Беларусь;
- разработка методов и алгоритмов для создания специализированного программного обеспечения автоматизированного проектирования оснастки (пресс-форм, штампов, приспособлений);
- анализ предметной области и запуск новых изделий в производство совместно с предприятиями в среде CAD/CAM/CAE-систем;
- создание и внедрение интегрированных информационных систем и технологий поддержки жизненного цикла продукции (CALS-ERP-технологий);
- подготовка специалистов для работы с CAD/CAM/CAE-системами;
- создание и внедрение цифровых технологий «умный город»;
- разработка методов, алгоритмов, архитектуры и технологии цифровизации историко-культурной информации.

В ходе научной деятельности был также проведен ряд фундаментальных и прикладных исследований и разработаны:

- концептуальные, математические, информационные и процедурные модели, обеспечивающие возможность организации интеллектуальных управляемых автоматизированных процессов проектирования;
- методы функционального, структурного и информационного описания машиностроительных конструкций, позволяющие осуществлять анализ их предметной области и синтез в среде интеллектуальных прикладных программных комплексов;
- принципы и методы унификации представления знаний и сведений в области конструирования машиностроительных объектов и среды их проектирования;
- основы методологии перехода к сквозным компьютерным технологиям проектирования и производства с учетом специфики отечественных предприятий, создания и освоения на предприятиях машиностроения интегрированных информационных систем и технологий поддержки жизненного цикла продукции (CALS-ERP-технологий);
- методы и научно-практические подходы к цифровой трансформации управления сферами жизнедеятельности и обеспечения устойчивого развития малых городов;
- методы, алгоритмы, архитектура и технологии цифровизации историко-культурной информации.

Практическая деятельность лаборатории была направлена на создание новых эффективных решений в автоматизации и их внедрение в различные сферы жизнедеятельности.

**Основные результаты.** Программно-методический комплекс проектирования пресс-форм для литья изделий из термопластов «Форлит» разрабатывался в 1990-е гг. и был внедрен на ряде белорусских и российских предприятий (МТЗ, МАЗ, Коммунамаш). Он обеспечивал автоматизацию следующих проектных задач: расчет вставок; расчет и размещение знаков и толкателей; расчет выбранной схемы размещением гнезд; определение пакета плит и проверку его размещения на выбранном термопластавтомате; расчет функциональных систем пресс-формы: литниковой, охлаждения, удаления изделия, центрирования, фиксации на основе типизированных конструктивных элементов, состав которых настраивается по стандартам предприятия; размещение в плане элементов удаления, центрирования и фиксации; изображение фрагмента конструкции пресс-формы для выбранного проектного решения на данном шаге проектирования с обеспечением возврата на предыдущие этапы для достижения оптимального результата; генерацию чертежей деталей пресс-формы, сборочного чертежа и спецификации [1].

В течение 2001–2005 гг. лаборатория принимала участие в реализации:

– отраслевой научно-технической программы «Компьютерные технологии проектирования и производства новой продукции», которая выполнялась по заказу Министерства промышленности Республики Беларусь;

– НТП «Информационные технологии», задание 4-05 «Разработать и внедрить компьютерную технологию управления документооборотом при проектировании радиоэлектронных устройств в условиях мелкосерийного производства»;

– ГКПНИ «ИНФОТЕХ», задание 10 «Разработка методических положений электронного документооборота при конструировании, технологической подготовке, управлении производством и сбытом продукции в тракторостроении»;

– ГПНИ «Информатика и космос», задание 1.3.01 «Разработка концепций, методов, моделей и алгоритмов для реализации информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции и электронного управления ресурсами в условиях отечественных предприятий».

Полученные фундаментальные и прикладные результаты в области освоения интегрированных информационных систем и технологий нашли применение при выполнении заданий ГНТП «CALS-технологии» (2005–2010 гг.) и «CALS-ERP-технологии» (2011–2015 гг.).

В 2005–2010 гг. шло выполнение Государственной научно-технической программы «Разработать и внедрить в промышленности технологии информационной поддержки жизненного цикла продукции» (ГНТП «CALS-технологии»), задание «Разработать и внедрить базовые компоненты информационной технологии поддержки жизненного цикла продукции в областях конструирования, технологической подготовки производства, управления, сбыта и эксплуатации тракторной техники» (первая очередь – 2005–2008 гг., вторая очередь – 2009–2010 гг.). В рамках реализации программы были разработаны и внедрены сквозная компьютерная технология проектирования и производства корпусов аудио-, видеотехники с использованием принципов CALS-технологий и сквозная компьютерная технология ускоренного запуска в производство деталей из полимеров в авто- и тракторостроении (рис. 1).

В 2011 г. по поручению Межведомственной комиссии по координации работы республиканских органов государственного управления и иных государственных организаций, подчиненных правительству Республики Беларусь, по вопросам создания и внедрения современных интегрированных информационных систем и технологий лабораторией была разработана методика оценки уровня информатизации и проведен мониторинг освоения современных интегрированных информационных систем и технологий на промышленных предприятиях Республики Беларусь (рис. 2).

По результатам анализа были представлены аналитический доклад «О разработке мер, направленных на повышение эффективности создания и внедрения современных интегрированных информационных систем и технологий в промышленном секторе экономики (на основе опыта выполнения ГНТП «CALS-технологии» в 2006–2010 гг.)» и концепция ГНТП «CALS-ERP-технологии» для предприятий Минпрома, которые были направлены в Совет Министров Республики Беларусь и профильные министерства.

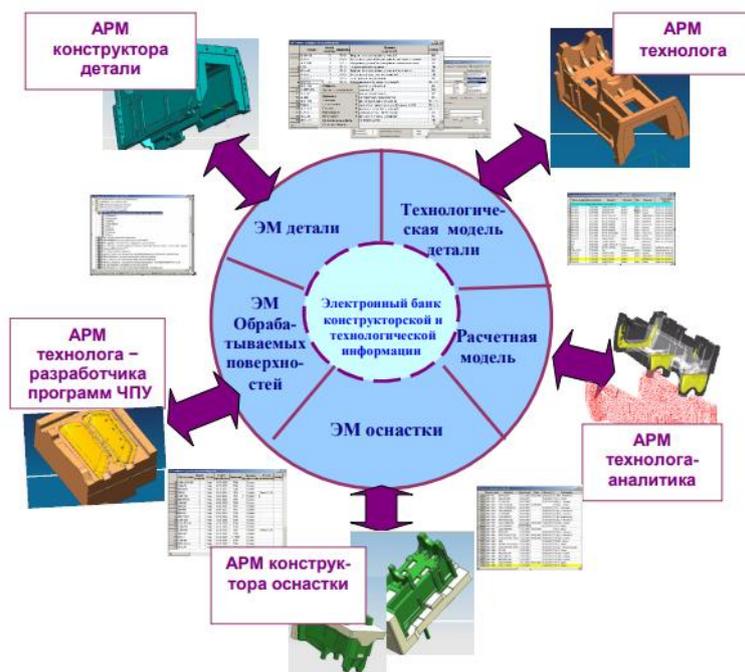


Рис. 1. Сквозная компьютерная технология ускоренного запуска в производство деталей трактора из полимеров

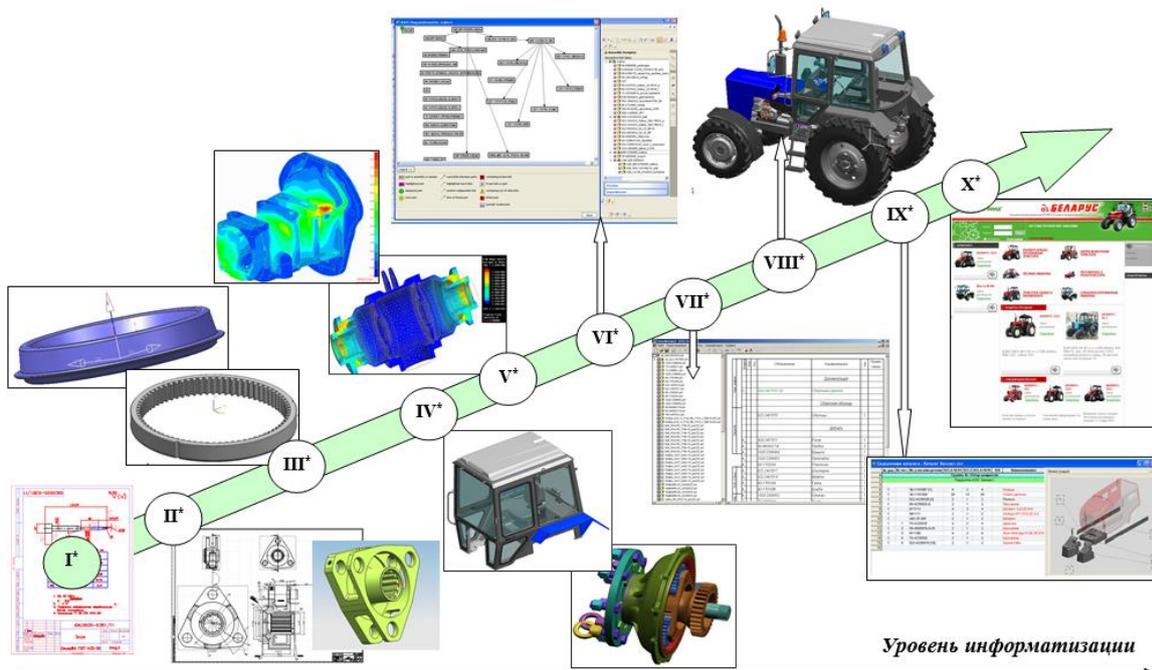


Рис. 2. Линейная шкала оценки уровня информатизации на этапе конструирования

Совет Министров Республики Беларусь утвердил Государственную научно-техническую программу «Электронное управление ресурсами предприятия» (ГНТП «CALS-ERP-технологии», 2011–2015 гг., освоение 2016–2018 гг.), где ОИПИ НАН Беларуси являлся головной организацией-исполнителем. Организационное и научно-методическое сопровождение выполнялось лабораторией автоматизации процессов проектирования, лаборатория также участвовала в выполнении заданий.

Всего было выполнено 16 заданий программы, в том числе в части НИОК(Т)Р – 14 заданий, по которым ответственными исполнителями и потребителями разработанных информационных технологий в виде комплексов методических, информационных и программных средств выступали промышленные предприятия. В целом в реализации ГНТП «CALS-ERP-технологии» приняли участие девять организаций: ОАО «АМКОДОР» (задание 01.01), ООО «Промпривод» (задание 01.02), ОАО «УКХ «ММЗ» (задание 02.01), ОАО «Бобруйский машиностроительный завод» (задание 02.02, задание 8.20), ОАО «КБТЭМ-ОМО» (задание 03.01), ОАО «АГАТ-СИСТЕМ» (задание 03.02), НИУП «ИЦТ ГОРИЗОНТ» (задание 04.02), ОАО «Витязь» (задание 06.02, задание 8.30), ОАО «ИНТЕГРАЛ» (задание 06.03, задание 8.50).

Количество созданных объектов новой техники по видам:

системы, комплексы, АСУ, АБД, САПР – 116;

освоенные в производстве разработки – 10;

созданные (модернизированные) производства – 10.

Разработанные по перечисленным выше заданиям информационные технологии сыграли существенную роль в создании, запуске в производство, изготовлении высокотехнологичной инновационной экспортоориентированной продукции (рис. 3), включая:

– погрузчики «АМКОДОР» с телескопическими стрелами с изменяемым вылетом (двухсекционная, трехсекционная и четырехсекционная стрелы);

– новые типы энергетических машин – паровых и газовых турбин (турбодетандеров) малой мощности для использования потенциала пара (природного газа), дросселируемого в редуционных установках на котельных и газораспределительных пунктах (ООО «Промпривод»);

– новые исполнения высокотехнологичных видов дизельных двигателей уровня токсичности выхлопных газов Евро4, Stage 3B, а также новую номенклатуру продукции по алюминиевому литью на ОАО «УКХ «ММЗ»;

– промышленные насосы на базе усовершенствования технологии изготовления отливок с минимальным браком литья на ОАО «Бобруйский машиностроительный завод»;

– средства радиосвязи и управления специального назначения (ОАО «АГАТ-СИСТЕМ»);

– изделия радиоэлектроники различного назначения НИУП «ИЦТ ГОРИЗОНТ»;

– новые телевизионные приемники LCD размером 19”, 26”, 32”, 37”, товары бытового назначения: DVD-плееры, СВЧ-печи и т. д. (ОАО «Витязь»);

– новые виды высокопроизводительного оборудования для электронной промышленности (ОАО «КБТЭМ-ОМО»);

– изделия электронной техники и микроэлектроники, включая различные полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, фотошаблоны, ЖК-индикаторы (ОАО «ИНТЕГРАЛ»).

Выполнение заданий ГНТП «CALS-ERP-технологии» позволило сформировать отечественные импортозамещающие практики освоения интегрированных информационных систем и технологий. В ходе программы разработаны: типовая схема реализации ИТ-проектов и методические рекомендации выполнения работ на каждом этапе ИТ-проекта; методика оценки уровня информатизации предприятия и система показателей развития ИТ, отражающих специфику и историю развития отечественных ИТ; методика оценки экономической эффективности освоения интегрированных информационных систем и технологий.



По данной тематике был проведен ряд информационно-обучающих семинаров для специалистов промышленности. Результаты работы за 2011–2020 гг. представлены на конференциях и опубликованы в 33 научных работах. В том числе подготовлено и опубликовано пять монографий и методических рекомендаций [2–14], которые используются различными специалистами в промышленности, в обучающем процессе в вузах Беларуси, России и стран СНГ.

Еще одним направлением деятельности лаборатории стал «умный город». Концепция «Кричев – малый умный город. Кричевский район. Развиваемся вместе» была разработана в рамках задания 1.3.03 (ИК 303) «Модели, методы, алгоритмы и экспериментальные образцы наукоемких компонентов информационных систем поддержки процессов управления, планирования, проектирования и инженерного анализа для сложных технических и экономических объектов»

ГПНИ «Информатика, космос и безопасность» на 2016–2018 гг., подпрограмма 1 «Информатика и космические исследования». Данная концепция составила основу «Типовой концепции развития "умных городов" в Республике Беларусь», разработанной Министерством связи и информатизации в 2019 г. [15, 17, 18].

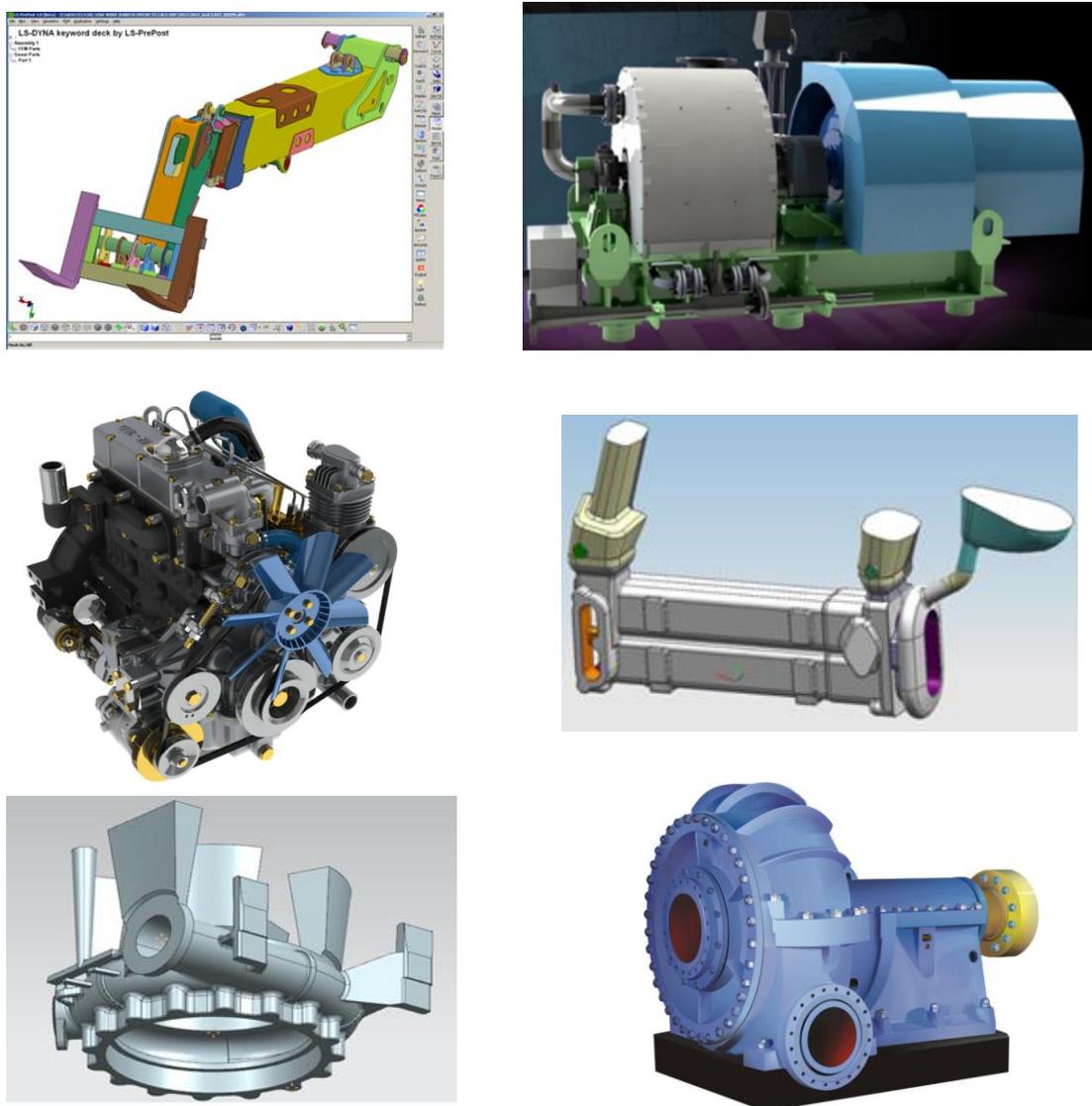


Рис. 3. Образцы инновационной продукции, разработанной в ходе реализации ГНТП «CALS-ERP-технологии»

В 2018–2020 гг. лабораторией был реализован проект «Разработать методические основы и инструментальные средства интеграции результатов историко-культурных научных исследований, инновационных ИТ и практической деятельности музейных, туристических и общественных организаций на примере создания Международного цифрового центра наследия М. К. Огинского», финансируемый за счет средств республиканского централизованного инновационного фонда.

Цифровой центр Михала Клеофаса Огинского, созданный на основе инновационных ИТ обеспечивает доступ и передачу в цифровой форме информации об историко-культурном наследии М. К. Огинского, его вкладе в музыкальное искусство, информации о наиболее важных исторических процессах и социальных явлениях того времени. Цифровой центр состоит из веб-сайта, где представлены историко-культурные данные об эпохе, биографии и наследии этого деятеля (<https://ahinski.ssrlab.by/>), комплекта презентаций для автономного представления

событий эпохи и биографии М. К. Огинского в музеях, библиотеках, учреждениях образования и методических рекомендаций по сопровождению и развитию цифрового центра М. К. Огинского (рис. 4).

Дальнейшее развитие проект получил в рамках задания «Методы, алгоритмы, архитектура и технологии цифровизации историко-культурной информации», Государственная программа научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» (ГПНИ «ЦКТБ») на 2021–2025 г., подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика», мероприятие 1.2. Цифровая платформа «умного города» и региона.

Разработанные макеты для представления биографических сведений М. К. Огинского (рис. 4) используются в качестве научно-вспомогательного материала, несущего дополнительную информацию для отдельных экспонатов. Они содержат QR-коды со ссылками для перехода на сайт цифрового центра М. К. Огинского, где размещена информация об этапах жизни деятеля. Наряду со сведениями из биографии М. К. Огинского на определенном отрезке времени его жизни можно ознакомиться с событиями, происходившими в то же время в геополитике, экономике, науке, культуре и обществе в странах, с которыми он был чем-то связан. Данная технология была внедрена в экспозиционной деятельности ГИКУ «Музей-усадьба М. К. Огинского» в Залесье (Сморгонский р-н, Гродненская обл.).



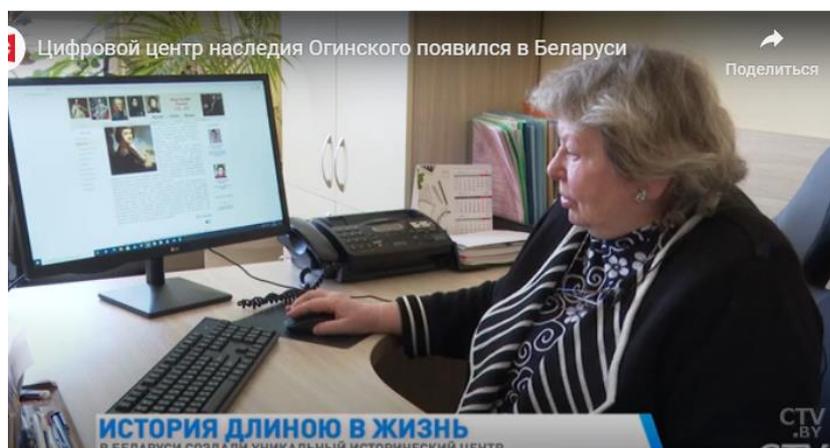
Женский состав лаборатории, 2008 г. Слева направо: Л. В. Губич, Н. П. Муха, И. И. Шибут, А. В. Алдошина, Н. И. Петкевич, В. Г. Сергеева



Состав лаборатории, выполнявший ГНТП «CALS-ERP-технологии». Слева: Р. А. Воейкова, Н. И. Петкевич, Л. В. Губич, В. Г. Сергеева, справа: Н. П. Муха, Д. Свичкарев, А. В. Алдошина, И. И. Шибут



Сотрудники лаборатории за работой. Слева: Р. А. Воейкова, Н. И. Петкевич, А. А. Прохорова, справа: Д. Л. Васильев, В. Г. Сергеева



Автор идеи цифрового центра и научный руководитель проекта Л. В. Губич дает интервью Столичному телевидению

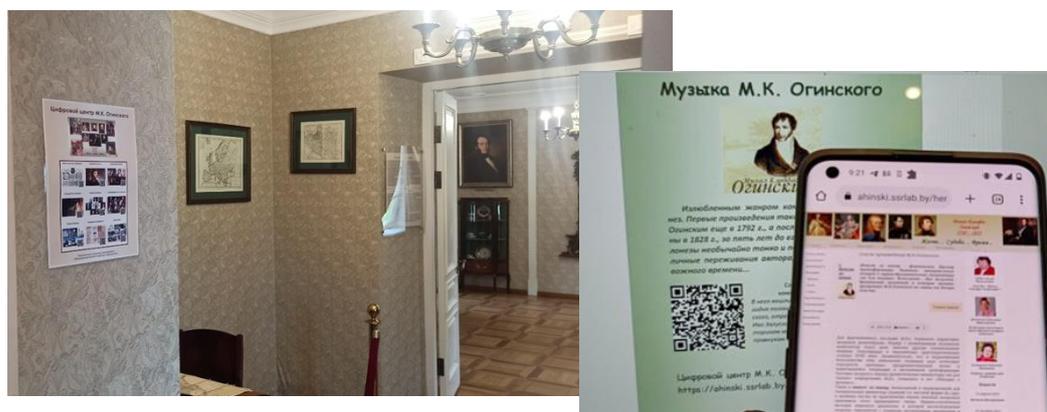


Рис. 4. Размещение макета музейного экспоната с QR-кодами для перехода на сайт цифрового центра М. К. Огинского в ГИКУ «Музей-усадьба М. К. Огинского» в Залесье

Цифровой центр М. К. Огинского как в целом, так и по отдельным разделам может стать источником для увеличения числа музейных предметов и их информационного поля в соответствии с профилем работы музея. Подготовка научно-информационных материалов для фонда

музея на базе подобного центра может существенно расширить номенклатуру музейных предметов, повысить их информативность, облегчить поиск информации по исторической тематике, представленной в центре. Для освоения цифрового центра М. К. Огинского права на использование результатов научной и научно-технической деятельности переданы в 14 организаций, из них 10 музеев различного профиля.

По тематике применения ИТ для решения задач цифровизации историко-культурной информации было опубликовано 17 работ (в том числе монография, шесть статей, 10 тезисов докладов); принято участие в семи международных конференциях, четырех международных и шести республиканских выставках [8, 16]. Проведено пять семинаров с такими учреждениями, как Центральная научная библиотека им. Я. Коласа НАН Беларуси, Президентская библиотека Республики Беларусь, Молодеченский государственный музыкальный колледж им. М. К. Огинского, Национальное агентство по туризму, Литературно-мемориальный музей Якуба Коласа.

Лаборатория автоматизации процессов проектирования внесла большой вклад в развитие науки по различным направлениям фундаментальных и прикладных исследований, решая сложнейшие теоретические и практические задачи в области машиностроения, информатики, робототехники и др. Деятельность лаборатории была направлена на создание и внедрение передовых информационных технологий во многие сферы жизнедеятельности общества.

### Публикации

1. Губич, Л. В. Автоматизация процессов проектирования в машиностроении / Л. В. Губич. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2002. – 308 с.
2. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий машиностроения. Состояние. Проблемы. Решения / Л. В. Губич, Д. Л. Васильев, И. В. Емельянович [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2009. – 300 с.
3. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий машиностроения. Проблемы и решения / Л. В. Губич, И. В. Емельянович, Н. И. Петкевич [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 286 с.
4. Внедрение на промышленных предприятиях информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции : метод. рекомендации / Л. В. Губич, М. Я. Ковалев, И. В. Емельянович [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – 142 с.
5. Внедрение на промышленных предприятиях информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции : методические рекомендации / Л. В. Губич, М. Я. Ковалев, Н. И. Петкевич [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 189 с.
6. Стандартизация процессов информатизации предприятия : метод. рекомендации / Л. В. Губич, Н. П. Муха, А. В. Алдошина [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – 268 с.
7. Интегрированные информационные системы и технологии в промышленности / Л. В. Губич, Н. П. Муха, Г. П. Матюшенко, А. В. Заблоцкий. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2018. – 174 с.
8. Губич, Л. В. Научно-методические подходы и инструментальные средства для создания цифровых центров истории и культуры / Л. В. Губич, Н. П. Муха, Э. В. Протасеня. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 162 с.
9. Информационные технологии на службе Минского тракторного завода / Л. В. Губич, Д. Л. Васильев, И. В. Емельянович [и др.] // Техника, экономика, организация. – 2009. – № 2. – С. 8–13.
10. Стандартизация и информатизация – инструменты модернизации предприятия / Л. В. Губич, М. Ковалев, Н. П. Муха [и др.] // Наука и инновации. – 2014. – № 7. – С. 34–37.
11. Стандартизация и информатизация – инструменты модернизации предприятия / Л. В. Губич, М. Ковалев, Н. П. Муха [и др.] // Наука и инновации. – 2014. – № 8. – С. 39–42.
12. Нормативно-правовые основы для реализации проектов по освоению информационных технологий в промышленности / Л. В. Губич, М. Я. Ковалев, Н. П. Муха, Г. П. Матюшенко // Информатика. – 2016. – № 2(50). – С. 88–103.
13. Губич, Л. В. Цифровая трансформация в промышленности / Л. В. Губич, Н. П. Муха // Цифровая трансформация. Основные понятия и терминология : сб. статей / Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики ; редкол.: А. В. Тузиков (председатель) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 171–178.
14. Муха, Н. П. CALS-ERP технологии и Индустрия 4.0 / Н. П. Муха // Цифровая трансформация. Основные понятия и терминология : сб. статей / Национальная академия наук Беларуси, Объединенный

институт проблем информатики ; редкол.: А. В. Тузиков (председатель) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 102–108.

15. Кругликов, С. В. Цифровой регион / С. В. Кругликов, Г. П. Матюшенко // Цифровая трансформация. Основные понятия и терминология : сб. статей / Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики ; редкол.: А. В. Тузиков (председатель) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 213–223.

16. Муха, Н. П. Возможности цифрового центра М. К. Огинского для развития исторического туризма в Беларуси / Н. П. Муха // Перспективы развития туризма в современных условиях: мировые тенденции и региональные контексты : материалы Первой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28 сент. 2021 г. – Минск : А. Н. Варкасин, 2021. – С. 312–320.

17. Губич, Л. В. Стратегический подход к внедрению цифровых инноваций «smart city» в регионах Беларуси / Л. В. Губич, Г. П. Матюшенко // Inter Regional Innovations. – 2021. – № 1. – С. 28–33.

18. Кругликов, С. Модель управления проектом «Умный город» в Беларуси / С. Кругликов, Г. Матюшенко, Н. Муха // Наука и инновации. – 2022. – № 11. – С. 58–64.

УДК 004.896

## Лаборатория робототехнических систем

Сычѳв Владислав Анатольевич

*заведующий лабораторией робототехнических систем*

*E-mail: robotics@newman.bas-net.by*

Лаборатория робототехнических систем начала свою работу 2 января 2017 г. Основу коллектива новой лаборатории составили ученые, программисты и инженеры – сотрудники сектора «Робототехника», работавшие с 2013 г. в лаборатории моделирования самоорганизующихся систем и получившие профильное образование в области робототехники.

**Образовательные и исследовательские роботы.** С развитием электроники, механики и искусственного интеллекта появилась возможность внедрения робототехники во множество сфер человеческой деятельности. Эта задача и определила цель работы новой лаборатории. Первой разработкой, нашедшей практическое применение, стал робототехнический конструктор RoboCake, запатентованный в Беларуси и России. RoboCake (рис. 1) был создан для обучения студентов, магистрантов и аспирантов различным аспектам робототехники. Из конструктора могут быть построены мобильные роботы в корпусе шестигранной формы, напоминающей форму соты. Была разработана плата управления, которую можно изготовить самостоятельно. Таким образом, RoboCake мог использоваться в составе учебно-методических комплексов по различным дисциплинам, включая и электронику.

Робототехнический конструктор позволяет собрать робот на основе традиционного дифференциального привода, который применяется в большинстве промышленных транспортных роботов. Однако в лаборатории робототехнических систем исследуются и намного более сложные принципы движения, в частности передвижение прыжками, которое позволяет преодолевать значительные в масштабах робота расстояния на неподготовленной поверхности. При этом используется маломощный электромотор, накапливающий энергию в пружине. Экспериментальный прыгающий робот изображен на рис. 2.

Совершенно новый принцип действия был предложен для приведения в движение сферического мобильного робота. Хотя сферические роботы давно привлекали внимание исследователей, некоторые проблемы оставались нерешенными. К примеру, центр масс подобных роботов всегда был смещен относительно центра корпуса, в результате не удавалось реализовать режим свободного качения по инерции. Благодаря применению параллельного манипулятора в сферическом роботе, разработанном лабораторией, этот недостаток удалось преодолеть. Оригинальная конструкция (рис. 3) была запатентована в Беларуси и России, представлена на выставках и стала темой нескольких научных публикаций.

Для работы параллельного манипулятора необходимо слаженное одновременное движение всех звеньев. В результате экспериментальные исследования и аналитическое описание подобных манипуляторов значительно сложнее таковых для обычных манипуляторов. Однако применение технологии «цифровых двойников» позволило заметно упростить процесс разработки. Были созданы компьютерные модели механических и электрических узлов робота, позволяющие легко вносить коррективы и исследовать движение робота в виртуальной среде.

Еще один вариант параллельного манипулятора был реализован на основе конструктора RoboCake (рис. 4). Манипулятор, напоминающий хорошо известную платформу Стюарта, отличается от нее наличием шести степеней свободы вместо трех. Вся разработка этого робота также была выполнена с использованием технологии цифровых двойников. Самым сложным из всех роботов, созданных в лаборатории с помощью данной технологии, является антропоморфный робот Newman на основе открытого проекта inMoov, полностью переработанного и значительно усовершенствованного. Робот был изготовлен с помощью 3D-печати. Усовершенствованная версия, оснащенная волновыми редукторами, мощными высокоточными электроприводами и функциональными ногами, создана в виде компьютерной модели. Для управления ма-

нипуляторами (руками) работа разрабатываются алгоритмы на основе метода дообучения с подкреплением.

**Автоматизация в сельском хозяйстве.** Важнейшим событием для лаборатории стало установление деловых контактов со специалистами Научно-производственного центра НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. Технологии робототехники нашли применение при создании системы технического зрения для автоматической отбраковки, сортировки и упаковки яблок (рис. 5). Дальнейшее развитие система получила в устройстве сортировки некондиционных клубней картофеля.

Еще одной задачей, которую специалисты по механизации поставили перед лабораторией робототехнических систем, стало создание системы управления пропашным культиватором при междурядной обработке сахарной свеклы в автоматическом режиме. Механическое удаление сорняков остается незаменимой технологией, которая может быть значительно усовершенствована с помощью технического зрения. В лаборатории было создано программное обеспечение для управления культиватором таким образом, чтобы эффективно удалять сорняки, не повреждая растения. К сожалению, даже такой мощный инструмент, как искусственные нейронные сети, не мог решить задачу без дополнительной обработки изображений. Тогда были разработаны уникальные алгоритмы, которые преобразуют и обрабатывают исходное изображение от камеры, выделяют центры междурядья, вычисляют необходимые управляющие воздействия для исполнительного механизма. Результаты обработки изображений, получаемых с камеры, с наложенной на них графикой для настройки культиватора показаны на рис. 6.

Совершенствование технологий производства сельхозпродукции подразумевает не только выращивание, но и сбор, и хранение урожая. На последних двух этапах часть урожая теряется. Поэтому для оценки воздействий, которым подвергаются клубни картофеля при уборке, транспортировке и хранении, было создано устройство беспроводного сбора и передачи данных, измеряющее давление на корпус и передающее информацию по беспроводному каналу.

Сотрудничество в области автоматизации сельскохозяйственного производства подтвердило, что технологии робототехники востребованы в точном земледелии. Новой совместной разработкой стала автоматизированная робототехническая платформа, в которой была предпринята попытка перенести подходы, принятые при проектировании логистических роботов, в сельскохозяйственную технику. Вместо автоматизации существующих машин и тракторов было решено проектировать автономное транспортное средство с электроприводом, изначально являющееся мобильным роботом. В настоящее время два мобильных робота, созданных совместно для задач точного земледелия, готовятся к полевым испытаниям.

**Нелинейная динамика и хаос.** В лаборатории моделирования самоорганизующихся систем под руководством д-ра техн. наук, проф. А. М. Крота выполнено множество исследований в области сложных систем. Закономерно, что после создания новой лаборатории робототехнических систем значительное внимание в ее работе уделяется исследованиям нелинейных явлений и детерминированного хаоса, поддерживаются научные контакты между коллективами лабораторий. В частности, в результате исследований генератора хаотических колебаний по схеме Леона Чуа созданы новые способы управления схемой и интерпретации ее состояния (рис. 7). В рамках подхода, называемого *unconventional computing*, на основе схемы Чуа создано устройство обработки сигналов для применения в мобильных роботах и сенсорных сетях.

**Перспективные разработки.** В лаборатории всегда прорабатывается множество идей и концепций, которые могут найти применение в будущем. К примеру, разработаны чертежи, твердотельные и имитационные модели новой версии робота Newman (рис. 8, а). Для воплощения этой разработки «в пластике» необходим 3D-принтер с рабочей областью более одного кубического метра, способный сохранять высокую точность при печати крупногабаритных деталей. Работы над подобным принтером также ведутся в лаборатории (рис. 8, б). Еще одной перспективной разработкой является модульное шасси для транспортных роботов (рис. 8, в), которое могло бы использоваться для организации внутренней логистики в различных организациях – от больниц и гостиниц до производственных предприятий и складов.

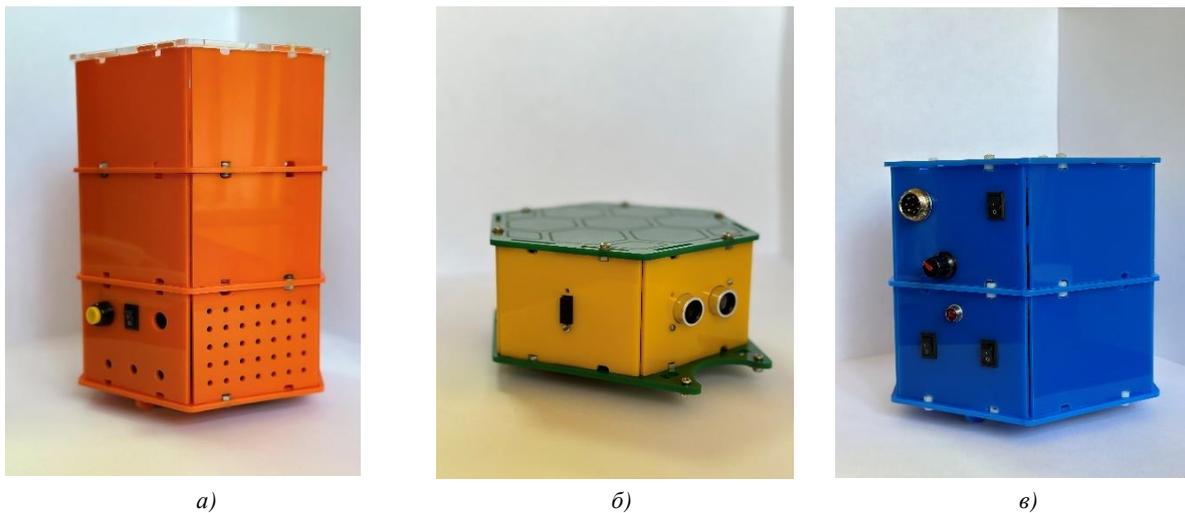


Рис. 1. Робототехнический конструктор RoboCake: *а)* вариант с одноплатным компьютером и камерой, управляемый дистанционно из среды MATLAB; *б)* вариант с микроконтроллерной системой управления; *в)* образовательный вариант с комплексом лабораторных работ



Рис. 2. Пример исследования прыжковой локомоции роботов



Рис. 3. Сферический мобильный робот: *а)* действующий прототип в акриловом корпусе; *б)* модель в среде Simulink

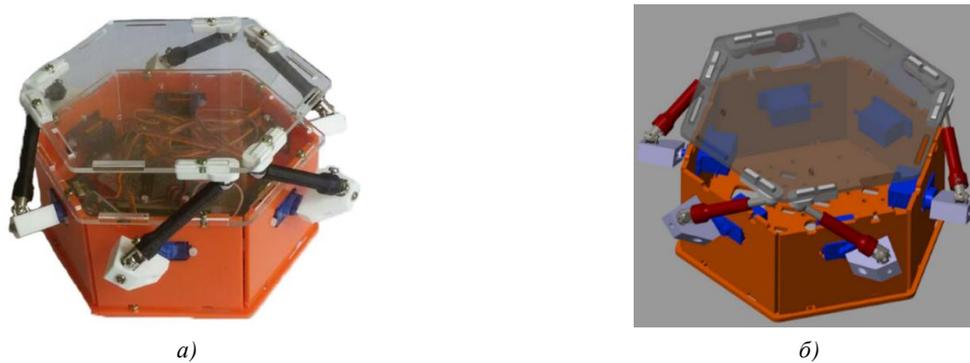


Рис. 4. Параллельный манипулятор: а) действующий прототип; б) модель в среде Simulink

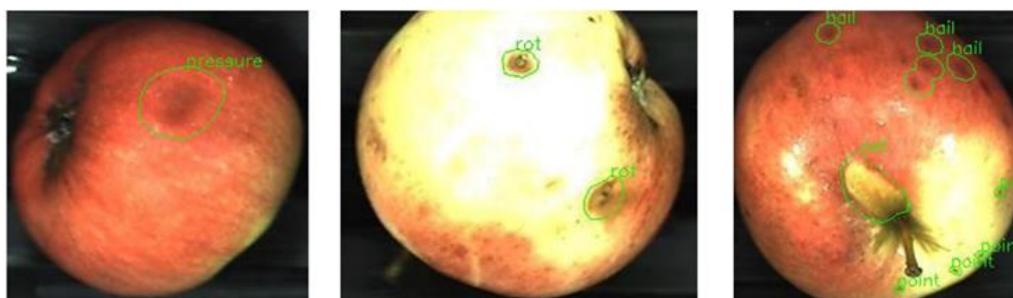


Рис. 5. Процесс выявления дефектов на фотографиях яблок, движущихся по конвейеру

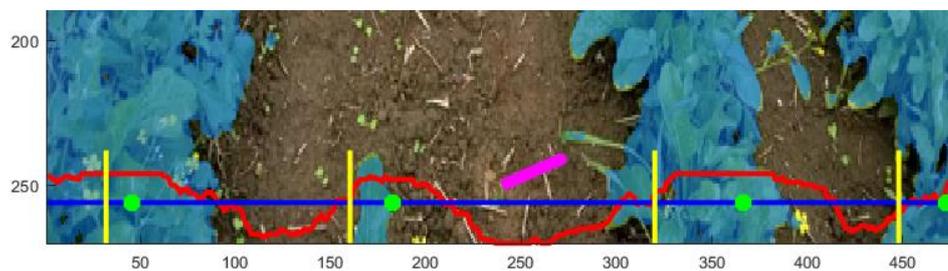


Рис. 6. Процесс работы системы управления культиватором

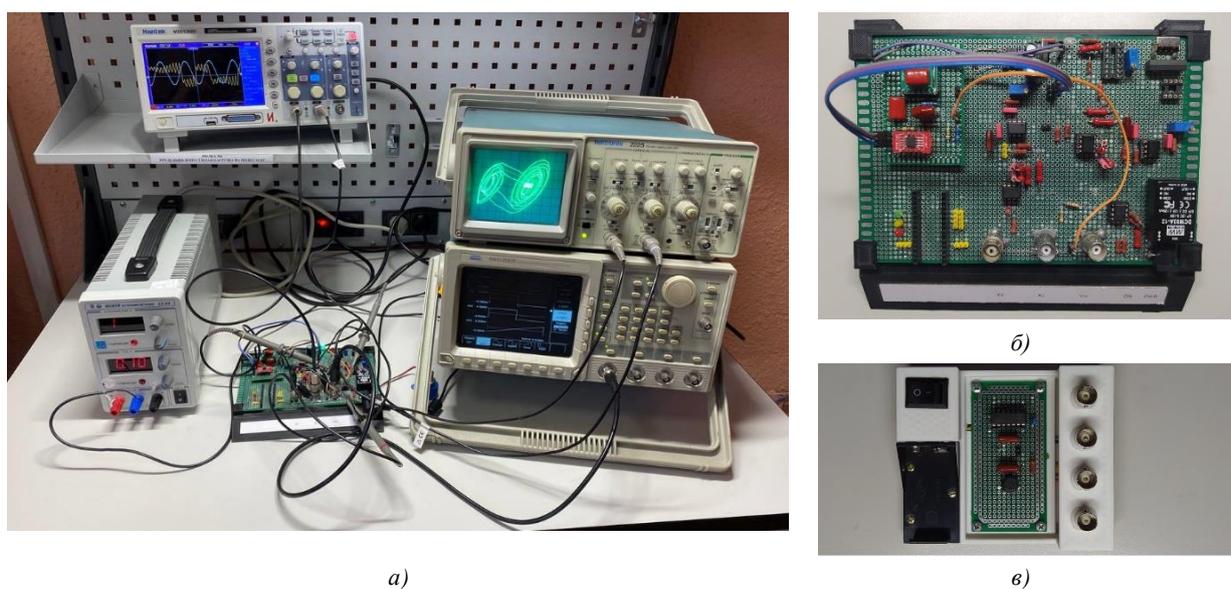


Рис. 7. Исследование нелинейных процессов в электронных схемах: а) экспериментальный стенд; б) электронный генератор хаотических колебаний с устройствами управления и обработки сигналов; в) схема Чуа

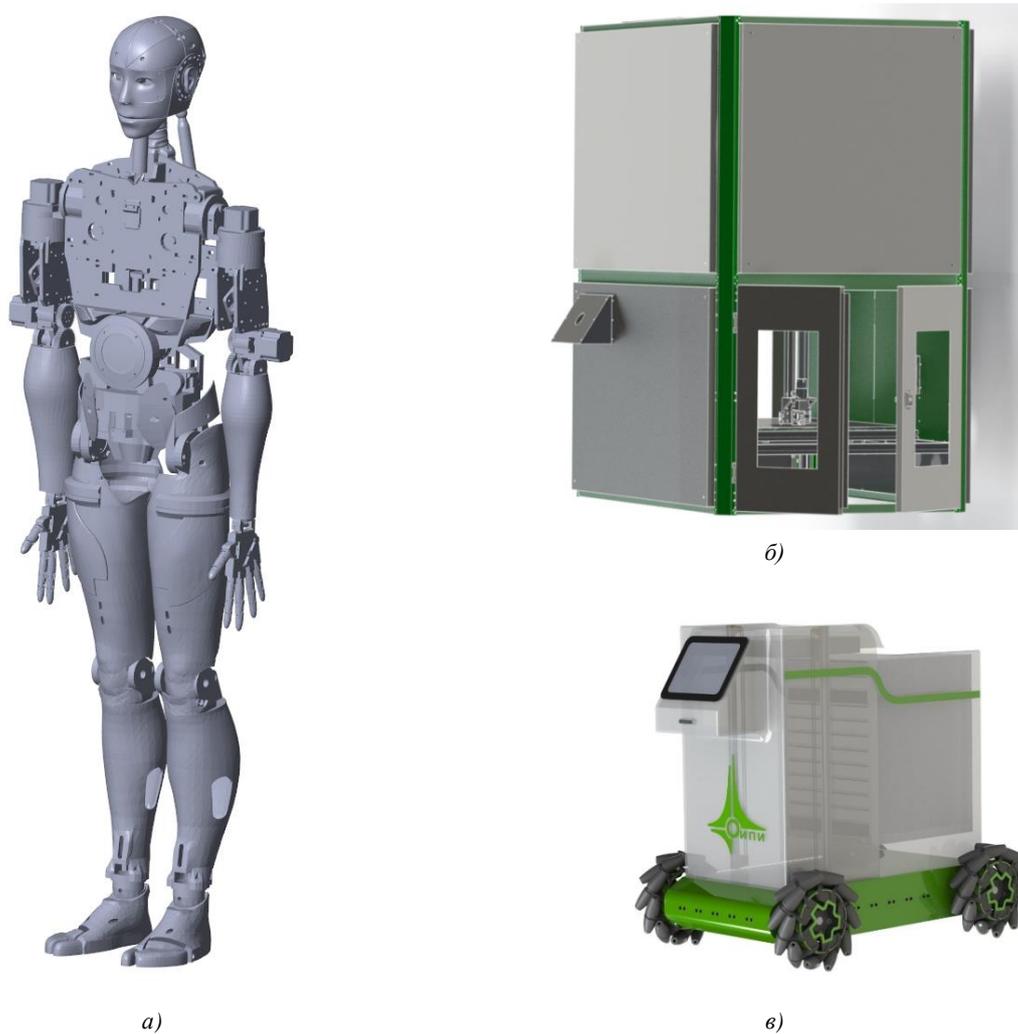


Рис. 8. Перспективные разработки: а) антропоморфный робот Newman (модель в среде Simulink); б) 3D-принтер промышленного класса в сборе; в) модульная транспортная платформа



Мл. науч. сотрудник Т. Ю. Ким читает лекцию на Фестивале науки, 2024 г.



Вед. инженер-конструктор Е. И. Печковский на выставке «Беларусь интеллектуальная» демонстрирует антропоморфный робот Newman



Награды лаборатории робототехнических систем

**Популяризация науки.** Прикладной аспект деятельности лаборатории всегда привлекал повышенное внимание, ее разработки демонстрировались на различных фестивалях и выставках, освещались в прессе. Каждый год лаборатория представляется на нескольких мероприятиях, где можно увидеть новейшие разработки или посетить лекцию о научных достижениях.

Сотрудники лаборатории принимали участие и побеждали во многих конкурсах инновационных проектов под эгидой ГКНТ, Белорусского инновационного фонда, Парка высоких технологий и конкурсах научных результатов ОИПИ НАН Беларуси.

УДК 001.89

## Лаборатория биоинформатики: 25 лет в науке и практике

**Том Игорь Эдуардович**

*заведующий лабораторией биоинформатики,  
кандидат технических наук, доцент*

**Введение.** Лаборатория биоинформатики была создана приказом директора института В. С. Танаевым в 1999 г. В ее состав вошли И. Э. Том, О. В. Красько, Н. А. Новоселова, А. П. Сучкова и А. Н. Петрашко, до этого работавшие в лабораториях эргатических систем, возглавляемой д-ром техн. наук Г. Г. Маньшиным.

С момента своего создания лаборатория специализировалась в областях, связанных с понятием «биоинформатика», которое было сформулировано в 2000 г. в Меморандуме Национальных институтов здоровья США, подготовленном комитетом из ведущих специалистов под председательством профессора Michael Huerta: «биоинформатика – область знаний, занимающаяся исследованием, разработкой или применением вычислительных, программных средств и методов для расширения использования биологических, медицинских, психологических, эпидемиологических, гигиенических данных, включая приобретение, накопление, каталогизацию, хранение, анализ или визуализацию таких данных».

С момента образования и по настоящее время лабораторию возглавляет канд. техн. наук, доцент И. Э. Том. В лаборатории работают канд. техн. наук, доцент О. В. Красько, канд. техн. наук Н. А. Новоселова, Т. С. Кухта, А. Н. Петрашко, а также сотрудники сектора разработки программных систем для здравоохранения: Д. В. Голубцов (зав. сектором), А. В. Браницкий, А. А. Ермоленко, Е. А. Майстрова, А. И. Каркоцкая, В. В. Бродецкий, А. П. Козлов. В разные годы в лаборатории работали А. А. Назаренко, А. Н. Коваленко, Д. А. Бузановский, В. К. Якутик, Е. С. Свирид, Н. Р. Железная, А. Н. Казловский, Е. М. Мурашов, И. М. Нестерович, Р. В. Занько, В. В. Роубо, П. А. Густиневич, А. С. Король, К. И. Костюк. Практически все они продолжают свою трудовую деятельность в ИТ-компаниях ведущими программистами, архитекторами систем, руководителями проектов.

Основным направлением научной деятельности лаборатории в настоящее время является разработка и развитие моделей, методов обнаружения знаний в молекулярно-генетических, эпидемиологических, клинических, лабораторных данных медико-биологического профиля.

Основное направление прикладных работ – создание специального программного обеспечения эпидемиологических и клинических регистров различных заболеваний, информационно-аналитических систем, систем поддержки принятия решений, реализующих разработанные в лаборатории современные модели, методы анализа данных, алгоритмы машинного обучения для их использования в здравоохранении.

С 2004 г. лабораторию также привлекают к работам по космической тематике, а И. Э. Том постановлением Бюро Президиума НАН Беларуси от 30.12.2008 № 688 назначен заместителем руководителя работ по созданию и развитию Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (далее БКСДЗ) по информационным космическим технологиям.

За период 1999–2024 гг. лабораторией выполнено более 70 договоров на НИР, НИОКР, ОКР и договоров на оказание услуг по сопровождению ранее созданных программных продуктов. С 2009 г. специалистами лаборатории самостоятельно или в кооперации были созданы 16 программных продуктов в интересах отечественного здравоохранения, которые внедрены более чем в 80 учреждениях здравоохранения Республики Беларусь. Основной программный продукт лаборатории по космической тематике – интегрированная информационная система «Гибридный банк данных (ГБД) БКСДЗ» – с октября 2018 г. в режиме 24/365 функционирует на программно-технических средствах национального оператора БКСДЗ. В Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь за ОИПИ НАН Беларуси зарегистрировано правообладание шестью программными продуктами, созданными специалистами

лаборатории. Краткое описание наиболее значимых программных продуктов и их авторские коллективы приведены в разделе «Основные вехи научно-технической деятельности лаборатории».

#### **Наиболее значимые научные результаты:**

1. Разработка и валидация математических моделей риска для интеллектуального функционального модуля прогнозирования отдаленных последствий лечения пациентов детского возраста со злокачественными новообразованиями. Автор О. В. Красько, 2022–2023 гг.

2. Методы и модели анализа биомедицинских данных и информационно-аналитические системы прогноза выживаемости и диагностики социально значимых заболеваний. Разработаны: оригинальные модели прогноза выживаемости пациентов при различных злокачественных новообразованиях, а также рецидивах и диссеминациях опухолей на основе предложенного метастатического индекса; модели классификации подтипов инфекционных заболеваний центральной нервной системы на основе метаболических показателей, позволяющих повысить точность диагностики; модели принятия решений по иммунофенотипической диагностике лейкозов и лимфом с учетом коэкспрессии маркеров; методы предварительной обработки и выделения признаков из разнородных биомедицинских данных; метод интеграции разнородных молекулярно-генетических данных для предсказания функций неизвестных генов; подход к кластеризации биомедицинских данных с активным выбором ограничений с целью выявления типов заболевания, связанных с конкретными клиническими показателями; гибридная модель классификации на основе ансамбля классификаторов, которая позволяет объединять несколько источников разнородных данных для повышения точности диагностики сложных заболеваний. Авторы: О. В. Красько, Н. А. Новоселова, 2018–2021 гг.

3. Метод построения ненаправленной генной регуляторной сети и оценка статистической значимости межгенных связей с использованием информационных критериев и технологии бутстрэппинга. Предложенный метод представляет собой ансамблевый подход к построению регуляторной биологической сети, а в его основе лежит процедура бутстрэппинга для генерации отдельных наборов данных генной экспрессии и последующего восстановления нескольких биологических сетей, которые агрегируют для получения конечного результата. Использование ансамблевого подхода для оценки связей сети позволяет учесть шум и выбросы в данных генной экспрессии и повысить точность реконструкции сетей за счет получения более точной оценки взаимной информации между генными профилями путем сокращения ее дисперсии. Авторы: Н. А. Новоселова, И. Э. Том, 2019 г.

4. Метод оценки метастатического потенциала злокачественных опухолей и математические модели прогноза распространенности опухолевого процесса, позволяющие прогнозировать вероятность обнаружения метастазов папиллярного рака щитовидной железы в латеральной группе лимфатических узлов по распространению карциномы в лимфатических узлах центральной группы с учетом метастатического индекса, который рассматривается как фактор риска. Автор О. В. Красько, 2016–2017 гг.

5. Метод интеграции молекулярно-генетических данных для предсказания функций неизвестных белков. Метод основан на слиянии разнородных данных путем построения ансамбля классификаторов, включая оценку информативности каждого члена ансамбля и возможность отбора наиболее оптимального его состава. Предложены унифицированный способ представления информации из различных источников данных и процедура учета иерархической организации базы функциональных категорий генов и генных продуктов (генная онтология) для формирования обучающего множества классификационной модели. Авторы: Н. А. Новоселова, И. Э. Том, 2016 г.

6. Алгоритм нечеткой кластеризации генетических данных с частичным управлением и активным отбором ограничений, в рамках которого получены аналитические выражения для параметров расширенной оптимизационной функции. Разработана процедура активного отбора ограничений, основанная на определении «виртуальной» границы кластеров и выборе ограничений для пар точек, попадающих в эту границу. Сравнительные испытания показали, что алгоритм позволяет повысить качество кластеризации данных при использовании меньшего количества ограничений. Авторы: Н. А. Новоселова, И. Э. Том, 2015 г.

### Основные вехи научной и практической деятельности лаборатории

1999–2002 гг.

Лаборатория завершает проекты в интересах Минского автомобильного завода по автоматизации эргономического проектирования кабин автотранспортных средств. Были созданы и приняты для использования в управлении главного конструктора передовые для своего времени промышленные образцы программных систем «Манекен» (рис. 1) и «Экспертиза».

«Манекен» – система моделирования эргономических параметров транспортных средств на основе пространственного компьютерного манекена. Ее основу составляла разработанная скелетная и каркасная 3D модели параметрического манекена и программные процедуры его анимации. Система была предназначена для решения задач эргономического проектирования и виртуальных испытаний пространственной компоновки рабочего места водителя автомобиля. Она была оснащена интерфейсами для взаимодействия со специализированными САД-системами типа Unigraphics, Euclid, Autocad, а также с системой промышленного дизайна Alias и позволяла еще на стадии дизайнерской проработки в условиях отсутствия физических кабин в виртуальной среде анализировать комфортность будущего рабочего места водителя с точки зрения досягаемости органов управления, обзорности внешней среды и рекомендовать необходимые изменения пространственной компоновки.

«Экспертиза» – система оценки эргономичности кабин автотранспортных средств – обеспечивает ведение базы данных по эргономическим показателям (более 1200 единичных и комплексных) различных современных кабин автотранспортных средств, структуризацию показателей эргономичности для различных типов кабин и эргономическую экспертизу кабин на основе разработанного метода оценки качественных и количественных показателей с использованием лингвистических переменных.

Наибольший вклад в разработку и создание программных продуктов «Манекен» и «Экспертиза» внесли Н. А. Новоселова, И. Э. Том, О. В. Красько, А. Н. Коваленко.

2001–2007 гг.

В 2001 г. состоялось знаменательное для лаборатории событие, которое в значительной мере определило на последующие годы научный и практический векторы ее деятельности: совместно с Республиканским научно-практическим центром детской онкологии, гематологии и иммунологии (РНПЦ ДОГИ) Минздрава был выигран конкурс на получение гранта Международного научно-технического центра для выполнения проекта № В522 «Разработка компьютерной системы анализа прогностических факторов риска для выбора адекватной терапии острых лейкозов у детей» (2001–2005 гг.). Основная цель проекта – создание информационно-аналитической системы анализа динамики значимости прогностических факторов риска для обеспечения адекватного объема индуктивной терапии при лечении злокачественных заболеваний крови у детей для повышения выживаемости и качества жизни пациентов после лечения. Апробация созданной информационно-аналитической системы ProAPF состоялась в детской клинике Медицинского университета Ганновера (Германия), а непосредственное использование – в РНПЦ ДОГИ.

Основным результатом выполнения проекта № В522 в ИТ-области явилось создание ИАС ProAPF – информационно-аналитической системы сбора разнородной лабораторной, клинической и персональной информации о пациентах с лейкозами, каталогизации, хранения, поиска и выдачи данных по запросам, статистического и нейросетевого анализа данных с целью выбора адекватной терапии острых лейкозов у детей. Программный комплекс ProAPF в составе ИАС обеспечивал реализацию набора статистических и нейросетевых методов анализа многомерных медико-биологических данных с функциями понижения их размерности, отбора комбинаций наиболее значимых прогностических факторов (ПФ), верификации отобранных комбинаций ПФ, определения динамики ПФ в процессе терапии, идентификации группы риска пациента по его индивидуальному профилю ПФ, а также прогнозирование результативности терапии.

Наиболее значимый вклад в успешное выполнение проекта № В522 внесли наши коллеги из РНПЦ ДОГИ М. П. Потапнев (соруководитель проекта) и Т. А. Углова, а со стороны ОИПИ НАН Беларуси: И. Э. Том (соруководитель проекта), О. В. Красько, Н. А. Новоселова, Н. М. Скриган, Е. Е. Сотикова, Б. А. Залесский, А. П. Сучкова, А. Н. Петрашко.

25 февраля 2003 г. состоялась защита диссертационной работы О. В. Красько «Моделирование процедур тендерного отбора», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01, научный руководитель И. Э. Том.

В период с 2001 по 2007 гг. лабораторией выполняется ряд проектов в рамках различных государственных программ и грантов. К числу наиболее значимых из них можно отнести следующие:

грант № T02P-135 БРФФИ «Нечеткие и синергетические модели в разработке антропоморфных агентов и эволюционных мультиагентных систем» (2002–2004 гг.). Основные исполнители НИР: И. Э. Том, Н. А. Новоселова;

договор (совместно с лабораторией картографических систем и технологий) «Модернизация и развитие базовых и перспективных технологий для наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования» (2005–2007 гг.). В рамках договора специалистами лаборатории была создана АТС БДЦИМ – автоматизированная технологическая система формирования фондов цифровой информации о местности на основе данных дистанционного зондирования Земли, реализующая функции накопления, каталогизации, хранения, поиска, заказа и предоставления данных в специализированные информационные подсистемы БКСДЗ (рис. 2). Разработка системы готовилась к первому (неудачному) запуску белорусского спутника «БелКА». Основные архитекторы и исполнители проекта: Г. А. Христинич, Е. А. Сергеев, В. В. Роубо;

задания ПР1.1 и ПА2.1 НТП Союзного государства «Триада», задание 4.1.1–1 НТП Союзного государства «СКИФ-ГРИД» и задание 01.01 31 ГНТП «CALS-ERP-технологии». Ответственный исполнитель задания А. А. Назаренко.

4 марта 2008 г. состоялась защита диссертационной работы Н. А. Новоселовой «Алгоритмы построения гибридного нечеткого классификатора для анализа медицинских данных», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01, научный руководитель И. Э. Том.

*2008–2015 гг.*

В этот период продолжают работы по основному направлению деятельности лаборатории в интересах здравоохранения, а также по космической тематике. Всего выполнялось 25 НИР и НИОКР по заданиям ГНТП, гранта БРФФИ, ГПНИ и Национальной программы ускоренного развития услуг в сфере информационно-коммуникационных технологий на 2011–2015 гг. Особо следует отметить следующие работы:

задание 5-02 «Разработать и внедрить информационную технологию диагностики врожденных иммунодефицитных состояний у детей на основе анализа клинических и лабораторных показателей» (2007–2009 гг.) в рамках ГНТП «Информационные технологии». Задание выполнялось совместно и в интересах РНПЦ ДОГИ. Результат выполнения: РМИС ImState-Diagnostics – республиканская многоуровневая информационная система поддержки принятия решения для диагностики первичных иммунодефицитных состояний у детей. Система предназначена для предварительной и углубленной диагностики врожденных иммунодефицитов с целью их типирования и выбора протокола лечения, а также занесения информации в регистр пациентов с иммунодефицитами. В соответствии с приказом Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2009 г. № 1201 РМИС ImState-Diagnostics рекомендована к использованию на всех уровнях оказания медицинской помощи. Получены акты внедрения из 37 учреждений здравоохранения Беларуси. Основные исполнители задания: О. В. Красько, В. В. Роубо (рис. 3, а);

задание 5-09 «Разработать и внедрить в Республике Беларусь информационно-аналитическую систему лечебных мероприятий для больных коагулопатиями на основе регистра больных гемофилией» (2008–2011 гг.) в рамках ГНТП «Информационные технологии». Выполнялось совместно и в интересах РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий. Результат выполнения: ИАС РГ – республиканская информационно-аналитическая система ведения и функционирования регистра пациентов с коагулопатиями, расчета необходимого количества диагностических средств, заместительных препаратов. Основным пользователем системы является РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий, а также врачи-гематологи област-

ного и республиканского уровней оказания медицинской помощи. Основные исполнители задания: О. В. Красько, В. В. Роубо, Э. В. Дашкевич, И. Э. Том (рис. 3, б);

грант Ф10ЛАТ-015 БРФФИ «Разработка комплекса интеллектуальных методов и алгоритмов обработки и анализа медицинских и биологических данных для совершенствования диагностики онкологических заболеваний» (2010–2011 гг.). НИР выполнялась совместно со специалистами Рижского технического университета, Латвия. Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;

задание 4-02 «Разработать и внедрить республиканскую автоматизированную информационно-аналитическую систему посттрансфузионных осложнений на базе сервис-ориентированной архитектуры» (2011–2013 гг.) в рамках ГНТП «Информационные технологии». Выполнялось совместно и в интересах РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий. Результат выполнения: ИАС ПТО – республиканская информационно-аналитическая система посттрансфузионных осложнений. Предназначена для снижения рисков осложнений, оперативного учета осложнений в подразделениях службы переливания крови, повышения качества лечения за счет разработки протоколов заместительной терапии и внедрения в учреждениях здравоохранения Республики Беларусь. Основным пользователем системы является РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий, а также специализированные подразделения службы переливания крови Беларуси. Основные исполнители задания: О. В. Красько, Е. А. Мурашов, А. Н. Казловский (рис. 3, в);

задание 4-03 «Разработать и внедрить систему поддержки принятия решений для дифференциальной иммунофенотипической диагностики лейкозов и лимфом» (2011–2014 гг.) в рамках ГНТП «Информационные технологии». Выполнялось совместно и в интересах РНПЦ ДОГИ. Результат выполнения: СППР Dif-L – система поддержки принятия решения для дифференциальной иммунофенотипической диагностики лейкозов и лимфом. Система обеспечивает точность диагностики основных типов лейкозов 99,2 %, а подтипов лейкозов – до 88,3 %. Основным пользователем СППР является РНПЦ ДОГИ. Кроме того, получены акты внедрения из 25 учреждений здравоохранения Беларуси. Основные исполнители задания: Н. А. Новоселова, И. Э. Том, О. В. Красько (рис. 3, г);

задание 1.1.01 «Модели, методы и алгоритмы обработки, анализа и распознавания биомедицинских данных и изображений и разработка на их базе информационных систем нового поколения» (2011–2013 гг.), включая подзадание лаборатории «Методы предобработки и обнаружения зависимостей в биомедицинских (генетических) данных», в рамках ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Научные основы информационных технологий». Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;

мероприятие 53 «Разработка и внедрение республиканского эпидемиологического регистра пациентов с гематологическими заболеваниями для мониторинга и анализа уровня медицинской помощи населению» (2013–2015 гг.) в рамках Национальной программы ускоренного развития услуг в сфере информационно-коммуникационных технологий на 2011–2015 гг. Результат выполнения: ИАС РЭРГЗ – информационно-аналитическая система «Республиканский эпидемиологический регистр пациентов с гематологическими заболеваниями». Основным пользователем системы является Республиканский центр гематологии и пересадки костного мозга на базе МНПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии. Основные исполнители мероприятия: И. Э. Том, О. В. Красько, В. В. Роубо, Е. М. Мурашов, Н. И. Прокопович, А. Н. Казловский, А. Н. Петрашко (рис. 3, д);

мероприятие 57 «Разработка и внедрение информационно-аналитической системы по планированию и контролю централизованных конкурсных закупок лекарственных средств для организаций здравоохранения Республики Беларусь» (2014–2015 гг.) в рамках Национальной программы ускоренного развития услуг в сфере информационно-коммуникационных технологий на 2011–2015 гг. Результат выполнения: ИАС «Лекарственное обеспечение» – информационно-аналитическая система планирования, контроля централизованных государственных закупок лекарственных средств для организаций здравоохранения Республики Беларусь. Основные ис-

полнители: О. В. Красько, В. В. Роубо, Т. С. Кухта, А. Н. Казловский, К. И. Костюк, А. Н. Петрашко (рис. 3, *e*);

мероприятие 1.2 (совместно с лабораторией информационно-аналитических систем) «Разработать на основе сервис-ориентированной архитектуры и внедрить автоматизированную систему управления гибридным банком данных космической информации от орбитальной группировки российских и белорусских космических аппаратов» (2013–2017 гг.) в рамках НТП Союзного государства «Мониторинг-СГ». Результат выполнения: АСУ ГБД – автоматизированная система управления гибридным банком данных космической информации от орбитальной группировки российских и белорусских космических аппаратов. Основное назначение системы: формирование и ведение единого каталога информации дистанционного зондирования Земли и продуктов ее обработки, обеспечение поиска и предоставление информации внутри производственной сети наземного сегмента БКСДЗ. Мероприятие выполнялось в интересах национального оператора БКСДЗ. Основные исполнители: И. Э. Том, В. А. Лапицкий, В. В. Роубо, Е. А. Мурашов, Т. С. Кухта, А. Н. Казловский, К. И. Костюк, Е. А. Сергеев, В. В. Кириченко, Р. В. Занько, А. Н. Петрашко, Н. И. Прокопович, А. В. Браницкий;

задание 8.1.03 «Методы и алгоритмы анализа и распознавания биомолекулярных данных, медицинских сигналов, изображений и разработка на их базе распределенных медицинских информационно-аналитических систем» (2014–2015 гг.), включая подзадание лаборатории «Метод построения функциональных модулей генетических данных и алгоритм нечеткой кластеризации с частичным обучением», в рамках ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Научные основы информационных технологий». Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;

договор «Разработать программное обеспечение информационно-аналитической системы «HLA-типированные доноры Республики Беларусь для трансплантации гемопоэтических стволовых клеток» (2014–2017 гг., развитие в 2021–2023 гг.) в рамках задания 04.17 ГНТП «Новые технологии диагностики, лечения и профилактики», подпрограмма «Трансплантология и регенеративная медицина». Задание выполнялось в интересах РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий и Республиканского центра гематологии и пересадки костного мозга на базе МНПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии. Результат выполнения: ИАС HLA – информационно-аналитическая система сбора, накопления, обработки и предоставления информации, связанной с учетом и подбором HLA типированных доноров для трансплантации стволовых клеток. Основные исполнители: О. В. Красько, В. В. Роубо, Е. А. Мурашов, А. Н. Казловский, К. И. Костюк, Е. А. Майстрова, А. В. Браницкий, А. И. Каркоцкая (рис. 3, *ж*). 2016–2024 гг.

В этот период выполнялось 40 проектов НИР, НИОКР, ОКР и договоров на сопровождение ранее созданных программных продуктов. Среди наиболее значимых из них:

задание 1.5.02 «Модели, методы, алгоритмы интеллектуальной обработки и анализа молекулярно-генетических, клинических, лабораторных данных, изображений, речевой информации и разработка на их основе прототипов информационных технологий и систем в интересах отечественного здравоохранения» (2016–2018 гг.), включая подзадание лаборатории «Методы и алгоритмы предсказания функций белков на основе интеграции из множественных источников разнородных молекулярно-генетических данных с различной структурной организацией», в рамках ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика». Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;

договор «Создание единой системы учета лиц, потребляющих наркотические средства, психотропные вещества, их аналоги» (2016 г.) в рамках государственной программы «Здоровье народа и демографическая безопасность Беларуси на 2016–2020 годы». Результат выполнения договора: ИС РПНС – информационная система «Регистр лиц, потребляющих наркотические средства». Система обеспечивает сбор, накопление и предоставления информации о лицах, потребляющих наркотические средства, психотропные вещества и их аналоги. Основной потребитель системы – РНПЦ психического здоровья, а также областные, городские, районные и межрайонные наркологические, психиатрические, психоневрологические диспансеры. Основ-

ные исполнители: К. И. Костюк, Е. А. Сергеев, В. В. Кириченко, Е. А. Мурашов, В. В. Рубо, А. Н. Казловский, А. В. Браницкий, Н. И. Прокопович (рис. 3, и);

мероприятие 21 (совместно с лабораторией информационно-аналитических систем) «Создание полномасштабной системы обращения электронных рецептов в Республике Беларусь с использованием электронной цифровой подписи» (2016–2018 гг.) государственной программы развития цифровой экономики и информационного общества на 2016–2020 гг., подпрограмма 3 «Цифровая трансформация». Мероприятие выполнялось совместно с РНПЦ медицинских технологий, информатизации, управления и экономики здравоохранения и НИИ технической защиты информации. Результат выполнения (вклад ОИПИ НАН Беларуси): АИС «Электронный рецепт» – специальное программное обеспечение автоматизированной информационной системы обращения электронных рецептов в Республике Беларусь. Впервые в Беларуси была реализована информационная технология обмена медицинскими данными между медицинскими, фармацевтическими информационными системами и Общегосударственной автоматизированной информационной системой на базе международного стандарта HL7 FHIR. На 1 января 2022 г. к АИС «Электронный рецепт» были подключены 633 учреждения здравоохранения, 1276 коммерческих и 1864 государственные аптеки. Ежегодно выписывается более 10 млн электронных рецептов. Основные исполнители: В. А. Лапицкий, И. Э. Том, Е. А. Сергеев, В. В. Рубо, В. В. Кириченко, Е. А. Мурашов, А. Н. Казловский, А. В. Браницкий, Ю. В. Свирко, К. И. Костюк, Р. В. Занько, А. А. Матусевич, Т. С. Кухта, Н. И. Прокопович, И. М. Нестерович, А. Н. Петрашко (рис. 4);

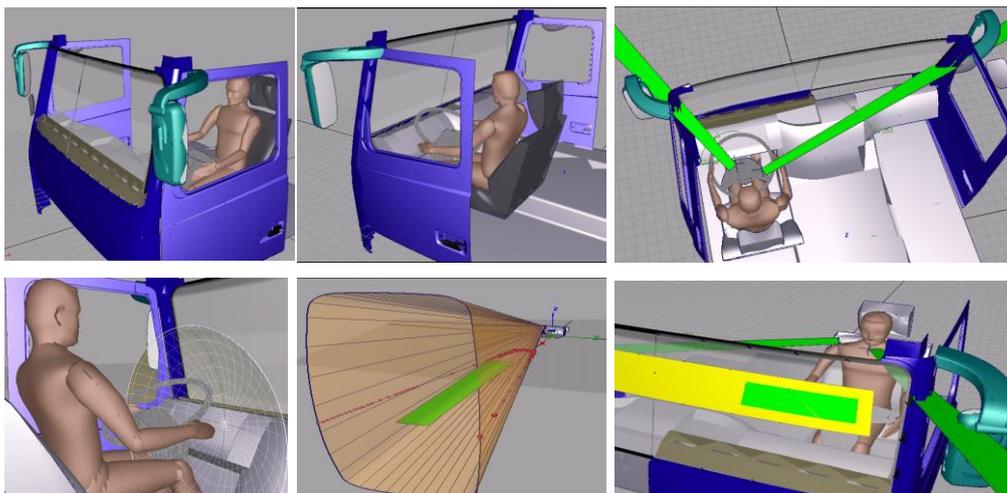


Рис. 1. Результаты моделирования и оценки эргономических параметров досягаемости и обзорности элементов кабины с использованием системы «Манекен»

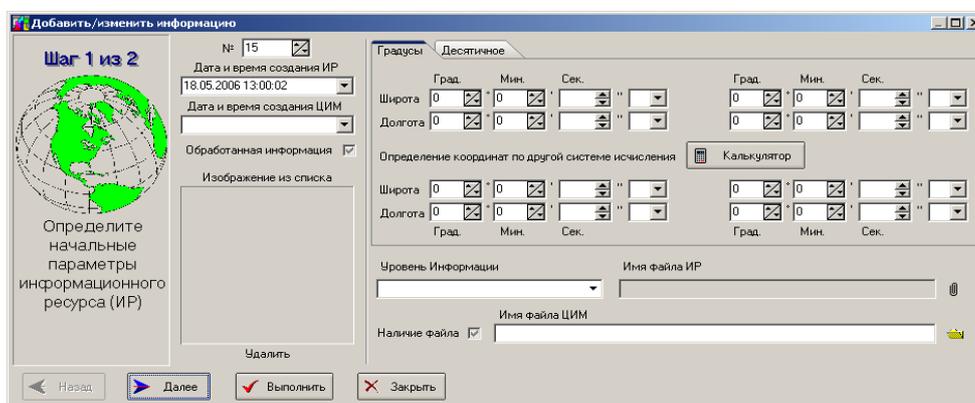
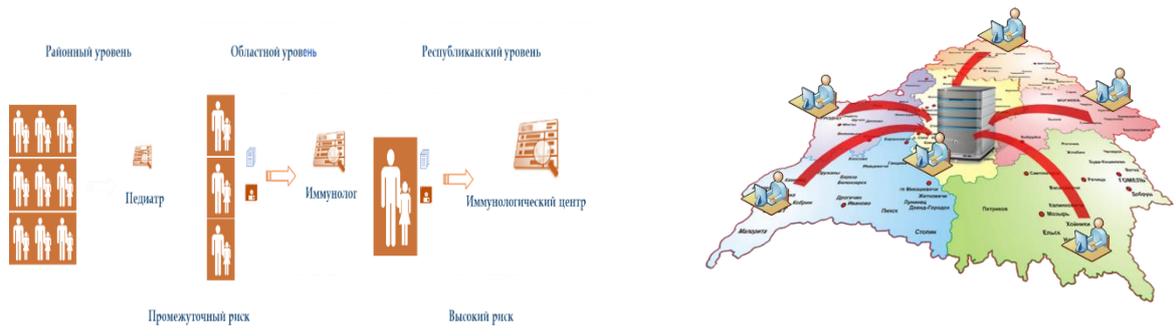
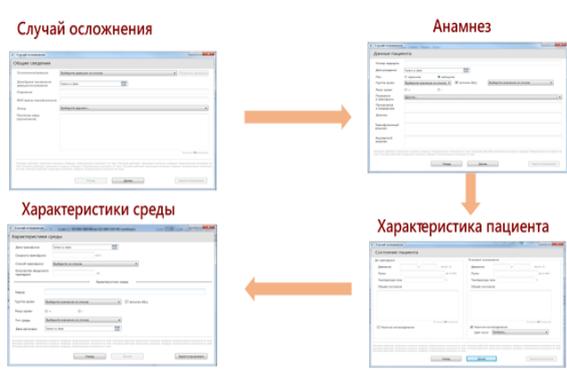


Рис. 2. Экранная форма интерфейса АТС БДЦИМ



а)

б)



Тип лимфомы	Процент (%)
В-клеточная лимфома	71.9 %
Т-клеточная лимфома	70.2 %
Т-клеточная лимфома	38.2 %

в)

г)

д)

е)

Имя	Фамилия	Возраст	Пол	Секс	СРП	СРП	СРП	СРП
Иван	Иванов	45	М	М	12	15	18	21
Петров	Петров	32	М	М	8	10	12	15
Сидоров	Сидоров	58	М	М	25	30	35	40

ж)

з)

Рис. 3. Итерфейсы программных продуктов, созданных в 2009–2017 гг.



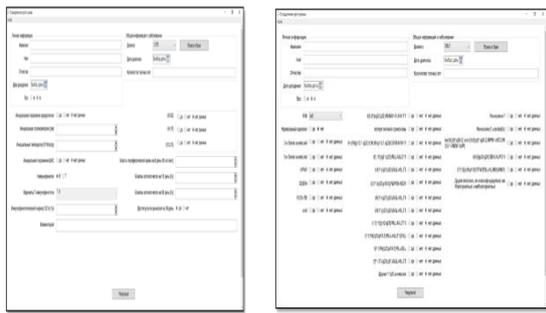
Рис. 4. Структурная схема АИС «Электронный рецепт»

задание 2-01 «Разработать модели прогноза, создать и внедрить интеллектуальную систему прогнозирования рисков ранних и поздних рецидивов детских острых лейкозов для своевременной коррекции терапии» (2016–2018 гг.) ГНТП «Интеллектуальные информационные технологии». Задание выполнялось совместно и в интересах РНПЦ детской онкологии, гематологии и иммунологии. Результат выполнения: ИСПР – интеллектуальная система прогнозирования рисков ранних и поздних рецидивов детских острых лейкозов. Прогнозирование основано на многомерном анализе клинических, генетических, иммунофенотипических данных с использованием моделей пропорциональных рисков Кокса, динамических и конкурирующих рисков. Основные исполнители: О. В. Красько, А. А. Рябцева, Т. С. Кухта (рис. 5, а);

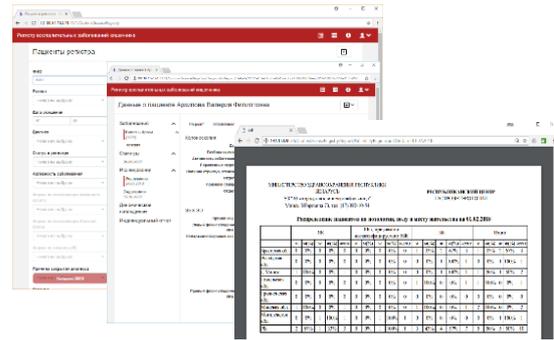
договор «Разработка программного обеспечения клинического регистра пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями» (2017–2018 гг.). Проект выполнялся по заказу УЗ «10-я ГКБ» Минска. Результат выполнения: ИС РГЭЗ – информационная система клинического регистра пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями. Система обеспечивает сбор, накопление и предоставление стандартизованной структурированной информации, связанной с учетом, диагностикой и лечением пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями (язвенный колит, болезнь Крона). Основные исполнители: К. И. Костюк, Е. А. Мурашов, А. В. Браницкий, Р. В. Занько, И. М. Нестерович (рис. 5, б);

договор «Разработка программного обеспечения «Регистр детей, нуждающихся в паллиативной помощи, и планирования услуг паллиативной помощи» (2018 г.). Договор выполнялся по заказу Республиканского клинического центра паллиативной медицинской помощи детям. Результат выполнения: ИС «Регистр паллиативной помощи» – информационная система «Регистр детей, нуждающихся в паллиативной помощи, и планирования услуг паллиативной помощи». Система обеспечивает сбор, накопление и предоставление структурированной информации, связанной с учетом и перемещением детей, оказанием услуг паллиативной помощи. Основные исполнители: О. В. Красько, В. В. Роубо, К. И. Костюк, А. В. Браницкий, Н. И. Прокопович (рис. 5, в);

задание 1.5.06 «Модели, методы, алгоритмы интеллектуальной обработки, анализа и распознавания медико-биологических данных, изображений, речевой информации и разработка на их основе прототипов информационных систем медицинского назначения» (2019–2020 гг.), включая подзадание лаборатории «Разработка методов и алгоритмов построения функциональных регуляторных сетей на основе данных экспрессии генов, позволяющих отбирать наиболее информативные гены, учитывать диагностическую информацию для оценки статистической значимости межгеновых связей и строить иерархию топологий сетей», в рамках ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика». Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;



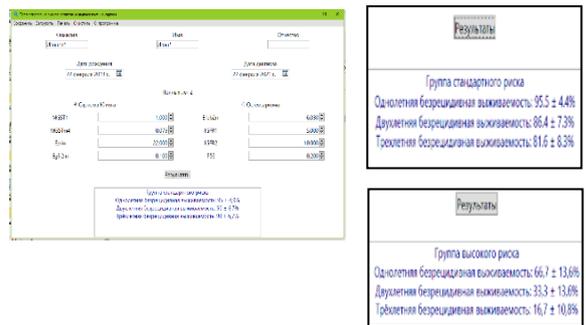
а)



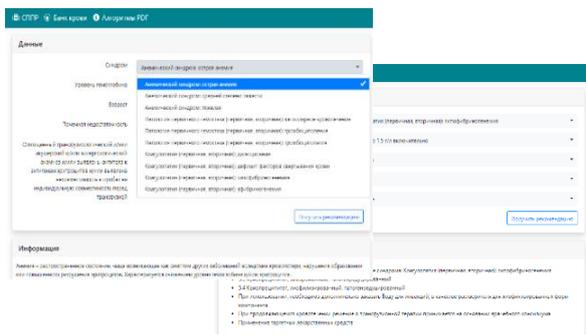
б)



в)



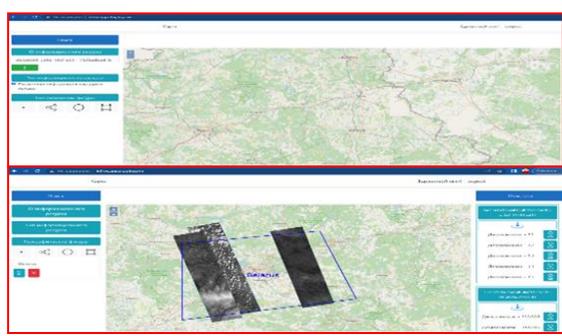
г)



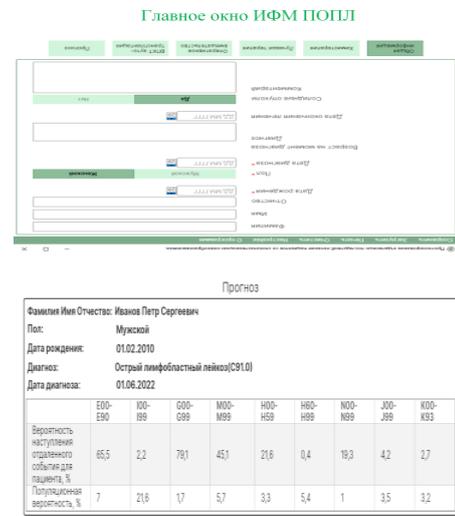
д)



е)



ж)



з)

Рис. 5. Экранные формы интерфейсов программных продуктов, созданных в 2018–2023 гг.

задание 2-03 «Разработать модели прогноза рецидивов костных сарком с учетом экспрессии молекулярных маркеров в опухолевой ткани и внедрить интеллектуальный функциональный модуль прогнозирования рисков развития рецидивов» (2019–2020 гг.) в рамках ГНТП «Интеллектуальные информационные технологии». Задание выполнялось совместно и в интересах РНПЦ ДОГИ. Результат выполнения: ИФМ ПРКС – интеллектуальный функциональный модуль прогнозирования рисков развития рецидивов костных сарком у детей и молодых взрослых с учетом экспрессии молекулярных маркеров в опухолевой ткани. Основные исполнители: О. В. Красько, А. П. Козлов, Н. И. Прокопович (рис. 5, з);

договор «Разработка и создание программного комплекса „Гибридный банк данных цифровой информации о местности“ в составе резервного банка данных дистанционного зондирования Земли Генерального штаба Вооруженных Сил Республики Беларусь» (2017–2020 гг.) в рамках мероприятия 1 раздела 1 подпрограммы 7 государственной программы «Научно-технологические и технические» на 2016–2020 гг. Результат выполнения: ПК ГБД ЦИМ – программный комплекс «Гибридный банк данных цифровой информации о местности». Основным назначением ПК ГБД ЦИМ является обеспечение оперативного получения из БКСДЗ первичной информации маршрутов съемки высокого и сверхвысокого разрешения, ее накопления и хранения, формирование банка данных ДЗЗ, получаемых космическими, авиационными и наземными средствами ДЗЗ. Основные исполнители: В. В. Рубо, Е. А. Мурашов, Р. В. Занько, А. Н. Казловский, А. В. Браницкий, К. И. Костюк, Н. И. Прокопович, А. Н. Петрашко;

грант № Ф19УКРГ-00 БРФФИ «Разработка методов, алгоритмов и интеллектуальной аналитической системы для обработки и анализа разнородных клинических и биомедицинских данных с целью совершенствования диагностики сложных заболеваний» (2019–2020 гг.). НИР выполнялась совместно с Институтом кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, В. Ю. Скобцов;

задание 2-04 «Разработать и внедрить систему поддержки принятия решений (СППР) для определения тактики в клинической трансфузиологии на базе стандарта FHIR обмена медицинскими данными» (2016–2020 гг.) в рамках ГНТП «Интеллектуальные информационные технологии». Выполнялось совместно и в интересах РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий. Результат выполнения: СППР ТКТ – система поддержки принятия решений для определения тактики в клинической трансфузиологии. СППР предназначена для оказания помощи врачам при экстренных ситуациях и отсутствии врача-трансфузиолога в определении тактики персонализированной трансфузиологической помощи с учетом трансфузионных синдромов и таксономических критериев, в том числе в принятии решения о выборе совместимой трансфузионной среды пары «донор – реципиент» по антигенам систем АВО, Резус и Келл. Основные исполнители проекта: О. В. Красько, К. И. Костюк, А. В. Браницкий, Н. И. Прокопович (рис. 5, д);

проект (инициативный) «Разработка и создание программного обеспечения интегрированной информационной системы „Гибридный банк данных Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли“» (2018 г.) в интересах УП «Геоинформационные системы» для включения в состав наземного сегмента БКСДЗ. Результат выполнения: ГБД БКСДЗ – интегрированная информационная система «Гибридный банк данных БКСДЗ», включающая систему управления гибридным банком данных ДЗЗ, комплекс управления архивами данных ДЗЗ, комплекс обеспечения единого входа в систему и администрирования, комплекс для подготовки и выдачи данных ДЗЗ, комплекс для обеспечения маршрутизации данных ДЗЗ. С конца 2018 г. система на постоянной основе функционирует в УП «Геоинформационные системы». Основные исполнители: В. В. Рубо, Е. А. Мурашов, Р. В. Занько, А. Н. Казловский, А. В. Браницкий, Н. И. Прокопович, А. Н. Петрашко (рис. 5, е);

договор (совместно с лабораторией картографических систем и технологий) «Разработка технологии и экспериментального образца программно-информационного комплекса взаимодействия и гармонизации разнородных архивов цифровых изображений местности, включающего базу данных цифровой информации о местности (цифровые карты, фотодокументы и другие производные продукты на основе данных ДЗЗ), базу метаданных космических снимков, приложения выдачи пространственной информации по запросам потребителей» (2020–2023 гг.)

в рамках мероприятия 3 НТП Союзного государства «Интеграция-СГ». Результат выполнения: ПИК ВГА – экспериментальный образец программно-информационного комплекса взаимодействия и гармонизации внутриведомственных архивов цифровой информации о местности и архивов данных космической съемки. Основные исполнители договора от лаборатории: И. Э. Том, А. В. Браницкий, К. И. Костюк, В. В. Бродецкий, А. И. Каркоцкая, А. Н. Петрашко, Т. С. Кухта (рис. 5, ж);

задание 1.1.3 «Модели, методы, алгоритмы и программные средства интеллектуальной обработки, анализа и распознавания медико-биологических данных, изображений, речевой и текстовой информации и разработка на их основе информационных технологий и систем медицинского и социального назначения» (2021–2025 гг.), включая подзадание лаборатории «Разработка интегрированных подходов для идентификации и приоритизации генов, выделения функциональных подсетей, связанных с фенотипами сложных заболеваний на основе биологических сетей белок-белковых и функциональных взаимодействий» ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» на 2021–2025 гг., подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика». Основные исполнители НИР: Н. А. Новоселова, И. Э. Том;

задание 01.21 «Разработать и внедрить метод подбора пар донор-реципиент с учетом редких антигенов системы HLA» (2021–2023 гг.) ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», подпрограмма «Клеточная терапия и высокотехнологичные методы замещения поврежденных органов и тканей». Задание выполнялось совместно и в интересах МНПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии. Результат выполнения: программное обеспечение субрегистрa реципиентов, интегрированное в информационно-аналитическую систему HLA для использования в составе «Центрального реестра доноров ГСК» Республиканского центра гематологии и пересадки костного мозга на базе МНПЦ хирургии, трансплантологии и гематологии. Назначение разработанного программного обеспечения: автоматизация метода подбора пар донор-реципиент с учетом редких антигенов системы HLA, реализующего новый алгоритм поиска донора, метода определения генетического профиля клеток доноров и реципиентов и расширение реестра доноров гемопоэтических стволовых клеток с привлечением новых контингентов лиц. Основные исполнители: О. В. Красько, К. И. Костюк, А. В. Браницкий, Е. А. Майстрова, Н. И. Прокопович, А. Н. Петрашко;

грант БРФФИ № Ф21АРМ-010 «Разработка методов выделения комплексных биомаркеров и классификации фенотипов онкологических заболеваний с использованием биологических сетей и данных высокопроизводительных технологий» (2021–2023 гг.). НИР выполнялась совместно с Институтом молекулярной биологии НАН Армении. Основные исполнители: Н. А. Новоселова, И. Э. Том, Т. С. Кухта;

задание 1 «Разработать и внедрить программное обеспечение прогноза отдаленных последствий лечения пациентов детского возраста со злокачественными новообразованиями на основе построения математических моделей риска» (2021–2023 гг.) ГНТП «Цифровые технологии и роботизированные комплексы», подпрограмма «Цифровые технологии в индустрии, социальной сфере и государственном управлении». Задание выполнялось совместно и в интересах РНПЦ детской онкологии, гематологии и иммунологии. Результат выполнения: ИФМ ПОПЛ – интеллектуальный функциональный модуль прогнозирования отдаленных последствий лечения пациентов детского возраста со злокачественными новообразованиями. Валидированные математические модели риска и соответствующее программное обеспечение должны обеспечивать своевременное предупреждение развития нежелательных явлений за счет оптимизации противоопухолевого лечения, повышение качества жизни пациентов за счет применения доработанной нормативной документации по диспансеризации населения. Основные исполнители: О. В. Красько, Е. А. Майстрова, А. И. Каркоцкая (рис. 5, и).

С января 2024 г. коллектив лаборатории в большой и дружной команде программистов, бизнес-аналитиков, QA- и PM-специалистов работает над созданием специального программного обеспечения медицинских подсистем в составе централизованной информационной системы здравоохранения Республики Беларусь, которая должна, наконец, воплотить мечту о едином

информационном пространстве здравоохранения, когда данные будут «ходить» за пациентом, а не наоборот, и электронное здравоохранение в полной мере станет реальностью для врачей и пациентов.

**Заключение.** Рациональное сочетание научной деятельности по разработке новых или развитию известных методов анализа разнородных медико-биологических данных и работ по выполнению наукоемких прикладных проектов по созданию программного обеспечения информационных систем для здравоохранения и других отраслей, непрерывный процесс обучения и профессионального совершенствования сотрудников, взаимное уважение ветеранов лаборатории и молодежи – это базовые принципы, которые обеспечивают развитие лаборатории и, что очень важно, удовлетворение сотрудников результатами своей работы.

**Награды и победы в конкурсах.** С циклом работ «Методы, модели анализа биомедицинских данных и информационно-аналитические системы прогноза выживаемости и диагностики социально значимых заболеваний» Н. А. Новоселова и О. В. Красько стали победителями конкурса 2021 г. на соискание премии Национальной академии наук Беларуси в области информационных технологий.

И. Э. Том в 2015 г. награжден Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь «За шматгадовую плённую навуковую дзейнасць, значны асабісты ўклад у развіццё актуальных напрамкаў біяінфарматыкі, распрацоўку і ўкараненне ў медыцынскую практыку сучасных інфармацыйных тэхналогій для дыягностыкі і лячэння захворванняў».

О. В. Красько в 2014 г. получила результат «Математические модели выявления морфологических особенностей папиллярного рака щитовидной железы (ПРЩЖ), определяющих инвазивный и метастатический потенциал опухоли у детей и подростков в Республике Беларусь, разработанные на основании ретроспективного клинико-морфологического анализа ПРЩЖ у детей и подростков, возникновение которого ассоциировано с „йодным ударом“, полученным пациентами в первые месяцы после аварии на Чернобыльской АЭС», который вошел в топ-10 лучших научных результатов НАН Беларуси за 2014 г.

В 2010 г. О. В. Красько и В. В. Роубо с проектом «Республиканская многоуровневая информационная система и технология диагностики врожденных иммунодефицитных состояний у детей» стали лауреатами премии НАН Беларуси в номинации «Лучший инновационный проект» в области естественных наук.

Специалисты лаборатории регулярно становились победителями конкурсов ОИПИ НАН Беларуси в номинациях «Лучший научный результат» (2014–2017, 2019, 2020, 2022), «Лучший научный результат прикладного характера» (2023), «Лучший результат практического использования (внедрения) научных результатов и (или) научно-технических разработок» (2018, 2021).

### Публикации

С 2010 г. специалистами лаборатории опубликовано: 4 монографии (2011–2022 гг.); 6 глав в монографиях; 198 научных статей в периодических рецензируемых журналах; 33 доклада на научных конференциях; 42 тезиса докладов на научных конференциях.

К числу наиболее значимых публикаций можно отнести следующие:

1. Ревтович, М. Ю. Местнораспространенный рак желудка: современные направления радикального лечения и прогнозирование отдаленных результатов : монография / М. Ю. Ревтович, О. В. Красько. – Минск : БелМАПО, 2022. – 217 с.

2. Романова, А. П. Модели динамики смертности населения Беларуси на рубеже XX-XXI вв. / А. П. Романова, О. В. Красько. – Минск : БелМАПО, 2020. – 660 с.

3. Красько, О. В. Статистический анализ данных в медицинских исследованиях : в 2 ч. / О. В. Красько. – Минск : Международный государственный экологический университет имени А. Д. Сахарова, 2013. – Ч. 1. – 126 с.

4. Том, И. Э. Методы интеллектуального анализа многомерных данных для решения задач классификации / И. Э. Том, Н. А. Новоселова, О. В. Красько. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – 236 с.

5. Novoselova, N. Prediction of cancer driver genes using a deep convolutional network / N. Novoselova, I. Tom // Information Technology and Management Science. – 2023. – Vol. 26. – P. 10–16. – DOI: 10.7250/itms-2023-0002.

6. Красько, О. В. Оценка размера эффекта воздействия в квазиэкспериментальных исследованиях / О. В. Красько // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 27–39.
7. Novoselova, N. Hybrid classification model for biomedical data analysis / N. Novoselova, I. Tom // Information Technology and Management Science. – 2022. – Vol. 25. – P. 16–23. – DOI: 10.7250/itms-2022-0003.
8. Second primary malignancies in patients with papillary thyroid carcinoma after effect of post-chernobyl irradiation: A risk analysis of more than two decades of observations / M. Fridman, O. Krasko, L. Levin [et al.] // Cancer Epidemiology. – 2021. – Vol. 70. – P. 101860. – DOI: 10.1016/j.canep.2020.101860. (IF= 2.179)
9. Discovery of *Leptospira* spp. seroreactive peptides using ORFeome phage display / S. R. Ramli, G. M. S. G. Moreira, J. Zantow [et al.] // PLoS Neglected Tropical Diseases. – 2019. – Vol. 13, no. 1. – P. 1–18. – DOI: 10.1371/journal.pntd.0007131. (IF=4.487)
10. Identification of cerebrospinal fluid metabolites as biomarkers for enterovirus meningitis / D. Ratuszny, K.-W. Sühs, N. Novoselova [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2019. – Vol. 20, no. 2. – P. 1–13. – DOI: 10.3390/ijms20020337. (IF=4.183)
11. Factors affecting the approaches and complications of surgery in childhood papillary thyroid carcinomas / M. Fridman, O. Krasko, D. I. Branovan [et al.] // European Journal of Surgical Oncology. – 2019. – Vol. 45, iss. 11. – P. 2078–2085. – DOI: 10.1016/j.ejso.2019.07.032. (IF=3.379)
12. Лапицкий, В. А. Электронное здравоохранение Беларуси: состояние и перспективы / В. А. Лапицкий, И. Э. Том // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 63–71.

## ОТ РЕДАКЦИИ

В журнале «Информатика» публикуются оригинальные и обзорные статьи, описывающие результаты фундаментальных и прикладных исследований специалистов академического и вузовского профиля в области информатики и информационных технологий.

Основной целью журнала является публикация наиболее значимых новых результатов в указанной области. Приветствуются статьи, описывающие заключительные результаты научных проектов и диссертационных исследований, открывающие новые направления исследований, которые находятся на стыке информатики и других наук.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов в области информатики и информационных технологий.

### Основные разделы журнала:

- биоинформатика;
- математическое моделирование;
- защита информации и надежность систем;
- информационные технологии;
- логическое проектирование;
- обработка сигналов, изображений, речи, текста и распознавание образов;
- автоматизация проектирования;
- интеллектуальные системы.

**Префикс DOI:** 10.37661

### Условия распространения материалов:

контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Индексирование:

Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь журнал «Информатика» был включен в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований.

В декабре 2017 г. включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). С помощью инструментов и сервисов, доступных на платформе eLIBRARY (раздел «Личный кабинет»), можно самостоятельно корректировать список своих публикаций и цитирований в РИНЦ.

В июле 2017 г. включен в базу журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals (DOAJ).

С помощью поисковых систем Google Scholar, WorldCat, Соционет можно получить свободный доступ к полному тексту научных публикаций журнала.

### Адрес редакции:

ул. Сурганова, 6, к. 305, г. Минск, 220012, Беларусь  
Тел. +375 (017) 351 26 22

### Editorial address:

Surganova str., 6, of. 305, Minsk, 220012, Belarus  
Phone +375 (017) 351 26 22

**E-mail:** rio@newman.bas-net.by

<https://inf.grid.by/jour>

## THE EDITOR'S NOTE

The journal "Informatics" is a scientific publication in computer sciences and information technologies which reviews the results in basic and applied research of scientists from the universities and scientific centers.

The journal focuses on the most significant and modern papers of research projects results and PhD/DSc thesis in computer sciences.

The journal is edited for the specialists in IT and computer sciences research and application.

### The main sections of the journal:

- bioinformatics;
- mathematical modeling;
- information protection and system reliability;
- information technology;
- logical design;
- signal, image, speech, text processing and pattern recognition;
- computer-aided design;
- artificial intelligence methods.

**DOI Prefix:** 10.37661

### Distribution:

content is distributed under Creative Commons Attribution 4.0 License

### Indexation:

the journal "Informatics" is in the list of scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus for scientists to publish the results of PhD/DSc research.

In December 2017 the journal was included in the database of the Russian Science Citation Index (RISC) and provides free access to reviewed electronic scientific paper, improving scientific information traffic and also raising quotation of works of the authors (please use <https://elibrary.ru> or section for authors [https://elibrary.ru\\_author\\_tools](https://elibrary.ru_author_tools)).

In July 2017 included in the database of open access journals Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Using the Google Scholar, WorldCat, Соционет search engine, you can get free access to full text of scientific publications of magazine.

# ИНДЕКСЫ

**00827**

для индивидуальных  
подписчиков

**008272**

для предприятий  
и организаций

ISSN 1816-0301 (Print)



9 771816 030000