

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 2-2 2026 (ФЕВРАЛЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
М.А. Комарова

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016
В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 142-8681
E-mail: redaktor@nauteh.ru
<http://www.nauteh-journal.ru>

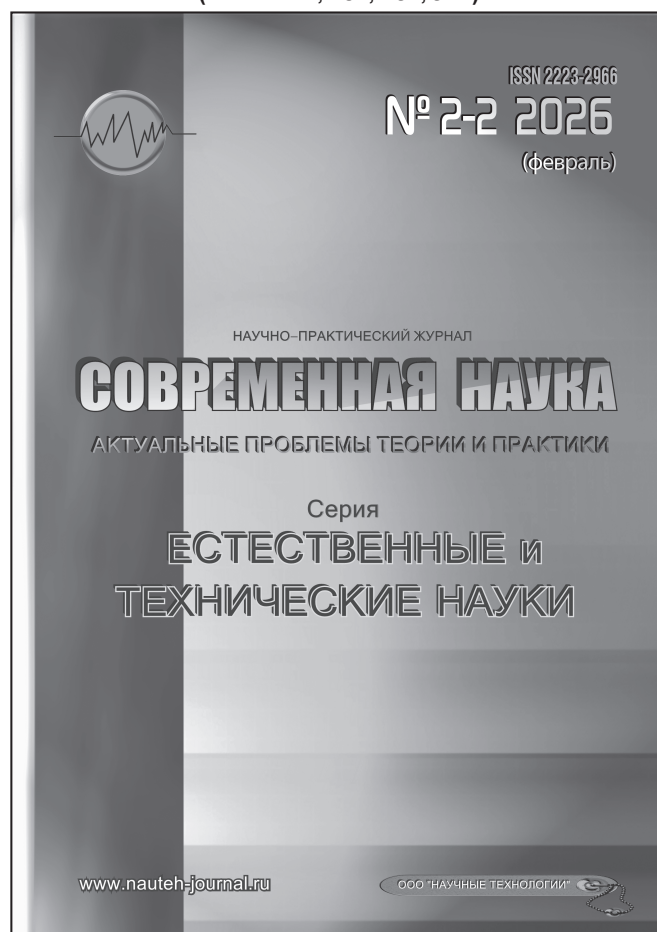
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ, ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ,
КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Авторы статей несут полную ответственность
за точность приведенных сведений, данных и дат.

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука:
Актуальные проблемы теории и практики» обязательна.

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 26.02.2026 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

Атаев Алевдин Рашитханович — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Безруких Марьям Моисеевна — д.б.н., профессор, Институт возрастной физиологии РАО

Бекетов Сергей Валериевич — д.б.н., ФГБНУ НИИ Пушного звероводства и кролиководства имени В.А. Афанасьева

Белых Владимир Иванович — Д.м.н., доцент, Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Грачев Николай Николаевич — доктор высшей степени в области технических наук (DoctorHabilitatus), профессор, Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ (технический университет)

Гусева Анна Ивановна — д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Зубкова Валентина Михайловна — д.б.н., профессор, Российский государственный социальный университет

Каллаев Нажмудин Омаркадиевич — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Квасов Андрей Иванович — д.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикабаева

Корнеев Андрей Матиславович — д.т.н., профессор, Липецкий государственный технический университет

Корягина Наталья Александровна — д.м.н., доцент, Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кравец Бронислава Борисовна — д.м.н., профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кулик Сергей Дмитриевич — д.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Матвеев Всеволод Борисович — д.м.н., профессор, ФГБУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина, член-корреспондент РАН

Миндлин Юрий Борисович — к.э.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Надежкин Сергей Михайлович — д.б.н., профессор, Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии

Овезов Алексей Мурадович — д.м.н., доцент, ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Олейникова Светлана Александровна — д.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет

Рахимов Ильгизар Ильясович — д.б.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ромашкова Оксана Николаевна — д.т.н., профессор, Московский городской педагогический университет

Симаков Юрий Георгиевич — д.б.н., профессор, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Симоненков Алексей Павлович — д.м.н., профессор, независимый эксперт

Трапезов Олег Васильевич — д.б.н., в.н.с., ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»

Федорова Оксана Ивановна — д.б.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Харитонов Михаил Анатольевич — д.м.н., профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

Царегородцев Анатолий Валерьевич — д.т.н., профессор, Московский государственный лингвистический университет redaktor3@nauteh.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Рожнова В.О. — Исследование особенностей культивирования *Brachionus plicatilis*
Rozhnova V. — Investigation of the peculiarities of *Brachionus plicatilis* cultivation6

Федорова О.И., Орлова Е.А., Ларина Е.Е. — Динамика роста сурков степных (*Marmota bobak* Mull., 1776) в постнатальном онтогенезе при промышленном разведении
Fedorova O., Orlova E., Larina E. — Growth dynamics of steppe marshmells (*Marmota bobak* Mull., 1776) in postnatal ontogenesis in industrial breeding12

Халиман И.А., Сидоряк Н.Г. — Эколого-зоогеографическая характеристика малакофауны северо-западной части Азовского моря и Утлюкского лимана
Khaliman I., Sidoryak N. — Ecological and zoogeographical characteristics of the malacofauna of the northwestern part of the sea of Azov and Utlyuk estuary14

Шахринова Н.В., Яппарова Э.Н., Рябова Т.Г. — Мониторинг качества воды родников города Бирск Республики Башкортостан
Shakhrinova N., Yapparova E., Ryabova T. — Physical and chemical analysis of water springs of the city of Birsik, Republic of Bashkortostan19

Швец Ю.Ю. — Эколого-физиологическая оценка микроэлементного статуса населения мегаполиса в условиях техногенной нагрузки
Shvets Yu. — Ecological and physiological assessment of the microelement status of the megapolis population under conditions of technogenic load25

Информатика, вычислительная техника и управление

Андреев А.А. — Гибридная модель хранения и обработки темпоральных данных для систем цифровых двойников промышленных объектов

Andreev A. — Hybrid model for storing and processing temporal data in digital twin systems of industrial objects30

Асалиев И.А., Мысаков Н.А., Ромашкова О.Н., Добрынина Т.Н. — Моделирование процесса утверждения административных документов в образовательной организации
Asaliev I., Mysakov N., Romashkova O., Dobrynina T. — Modeling of administrative document approval process in an educational organization36

Афанасьев А.Г. — Сравнительный анализ и оценки методов квантизации нейронных сетей компактных архитектур MobileNet для развертывания на мобильных вычислительных устройствах для визуального мониторинга засыпания водителей в различных условиях освещения
Afanasyev A. — Comparative analysis and evaluation of neural network quantization methods of compact MobileNet architectures for deployment on mobile computing devices for visual monitoring of drivers' sleep in various lighting conditions43

Баданов А.А. — Анализ проблем и подходов к обработке информации при миграции больших данных
Badanov A. — Analysis of problems and approaches to information processing during big data migration49

Борисова О.А. — Разработка методов системного анализа и управления данными при интеграции параметрических и прямых методов моделирования в CAD-системах
Borisova O. — Development of methods for system analysis and data management in the integration of parametric and direct modeling methods in CAD systems58

Везубова Н.А., Яковлева О.А., Сакович Н.Е. — Применение искусственного интеллекта в системах кибербезопасности
Vezubova N., Yakovleva O., Sakovich N. — The use of artificial intelligence in cybersecurity systems62

Добрынина Т.Н., Асалиев И.А., Ромашкова О.Н., Мысаков Н.А. — Практико-ориентированные информационные технологии управления в образовательных организациях: подходы, классификации, требования <i>Dobrynina T., Asaliev I., Romashkova O., Mysakov N.</i> — Practice-oriented information technology management in educational organizations: approaches, classifications, and requirements66	Тришин А.К. — Управление ресурсами в гибких производственных системах на основе цифровой платформы управления бизнес-процессами <i>Trishin A.</i> — Resource management in flexible production systems based on a digital business process management platform 125
Егоров В.Ю., Лазунин К.А. — Разработка мер информационной безопасности для виртуальных машин <i>Egorov V., Lazunin K.</i> — Development of information security measures for virtual machines73	Тырышкин С.Ю., Шарлаев Е.В. — Методы комбинаторной оптимизации и системного анализа для повышения качества управления производственными процессами <i>Tyryshkin S., Sharlaev E.</i> — Methods of combinatorial optimization and system analysis for improving quality of production process management 129
Карякин А.Т., Соцков В.А. — Повышение эффективности сортировки картофеля <i>Karyakin A., Sotskov V.</i> — Improving potato sorting efficiency.77	Филатов А.С. — Моделирование интеллектуальной информационной системы управления персональными данными в организациях <i>Filatov A.</i> — Modeling of an intelligent information system for personal data management in organizations 133
Качанов Ф.К. — Строгое множество решений ИСЛАУ <i>Kachanov F.</i> — A strict solution set to ISLAE.81	Шипулин Г.Ф. — Подход к детектированию следов эксплуатации уязвимостей веб-приложений класса Injections на примере уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов <i>Shipulin G.</i> — An approach to detecting traces of exploiting vulnerabilities in web applications of the Injections class using the example of vulnerabilities in stored cross-site scripting and remote file inclusion 139
Полонииков И.В. — BPMN нотация для моделирования бизнес-процессов в EdTech компаниях <i>Polonikov I.</i> — BPMN notation for modelling business processes in EdTech companies88	Шипулин Г.Ф., Калущкий И.В., Шорников А.В. — Анализ возможностей применения ИИ-агентов для повышения уровня киберустойчивости информационной инфраструктуры организации <i>Shipulin G., Kalutsky I., Shornikov A.</i> — Analysis of the possibilities of using AI agents to increase the level of cyber resilience of an organization's information infrastructure. 143
Сосенушкин С.Е., Баданов А.А. — Адаптивный гибридный метод миграции больших данных с автоматическим выбором стратегии извлечения и обработки информации <i>Sosenushkin S., Badanov A.</i> — Adaptive hybrid method for migrating large data with automatic selection of information extraction and processing strategies93	
Таран В.В. — Эксперимент Данненберга-Льюиса: клеточные автоматы и алгоритмическо-комбинаторная структура аудиоданных (научный анализ, аудиoprogramмирование, воспроизведение эксперимента и факторы его уточнения) <i>Taran V.</i> — Dannenberg-Lewis experiment: cellular automata and algorithmic-combinatorial structure of audio data (scientific analysis, audio programming, experiment reproduction, and factors of its refinement) 101	
	Клиническая медицина
	Азизова Д.А., Куандыкова Д.М., Хаирутдинова А.Р., Муратова Л.Д. — Применение ботулотоксина в комплексном лечении периимплантита <i>Azizova D., Kuandykova D., Khairutdinova A., Muratova L.</i> — The use of botulinum toxin in the comprehensive treatment of peri-implantitis 148

- Аксенова С.В., Кумакшева Т.Н., Хозина Е.А., Васильева О.А., Стрельченко Ю.М.** — Оценка эффективности анти-VEGF терапии ранибизумабом у пациентов с диабетической ретинопатией
Aksenova S., Kumaksheva T., Khozina E., Vasilyeva O., Strelchenko Yu. — Evaluation of the efficacy of anti-VEGF therapy with Ranibizumab in patients with diabetic retinopathy 154
- Долаков И.Г., Гезгиева Р.К., Дакиева Л.М., Торшхоева А.М., Патиева Б.Б.** — Острая тромботическая окклюзия артерии тыла стопы (клиническое наблюдение)
Dolakov I., Gezgieva R., Dakieva L., Torshkhoeva A., Patieva B. — Acute thrombotic occlusion of the dorsal foot artery (clinical observation) 158
- Жлудко Г.Г.** — Комплексное восстановление тазового дна: роль гинекологического HIFU «Fibroskom» в коррекции стрессового недержания мочи, синдрома релаксации влагалища и сопутствующих сексуальных дисфункций
Zhludko G. — Comprehensive pelvic floor restoration: the role of Fibroskom gynecological HIFU in the treatment of stress urinary incontinence, vaginal relaxation syndrome, and associated sexual dysfunctions 164
- Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю., Богдасарова Р.А.** — Клинико-патогенетическое обоснование индивидуализированной прегравидарной подготовки женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачным опытом ЭКО
Ichmelyan A., Bogdasarov A., Davidyant L., Bogdasarova R. — Clinical and pathogenetic rationale for individualized preconception care in women of advanced reproductive age with idiopathic infertility and previous IVF failures 170
- Комаров Р.Н., Ткачѳв М.И., Исаев Р.М., Каракотова А.М., Варламов Г.А., Гайлаев И.Д., Чойбсонов Н.-С.Ц.-Д., Маисян Т.А.** — Сравнительный анализ среднесрочных результатов имплантации аортальных гомографтов и операции Биобенталл: опыт одного центра
Komarov R., Tkachev M., Isaev R., Karakotova A., Varlamov G., Gailaev I., Choibsonov N.-S., Maisian T. — Comparative analysis of mid-term results of aortic homograft implantation and the Bio-Bentall procedure: a single-center experience 176
- Осадчая Е.И., Целкович Л.С., Балтер Р.Б., Иванова Т.В., Котельников В.В., Ильченко О.А.** — Прогноз эффективности комплексной терапии женщин со вторичной стресс-ассоциированной функциональной ановуляцией
Osadchaya E., Tselkovich L., Balter R., Ivanova T., Kotelnikov V., Ilchenko O. — Prediction of efficacy of complex therapy in women with secondary stress-associated functional anovulation 182
- Сергеев О.С., Ксенофонтов А.О., Захаров О.В.** — Использование технологий искусственного интеллекта в герниологии
Sergeev O., Ksenofontov A., Zakharov O. — Use of artificial intelligence technology in herniology ... 191
- Тарасова И.Д., Калинин С.Ю., Ворслов Л.О., Кононова В.И., Григорьев Н.Н.** — Гиперпролактинемия как причина бесплодного брака: современные представления
Tarasova I., Kalinchenko S., Vorslov L., Kononova V., Grigoriev N. — Hyperprolactinemia as a cause of infertile marriage: modern concepts 198
- Хмара А.Д., Полиданов М.А., Осинцев Е.Ю., Конопацкова О.М., Горбунова Е.С., Акоюян А.В.** — Клинический случай дивертикула пищевода
Khmara A., Polidanov M., Osintsev E., Konopatskova O., Gorbunova E., Akopyan A. — Clinical case of esophageal diverticula 206
- Наши авторы 211

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ BRACHIONUS PLICATILIS

Рожнова Виктория Олеговна

Ассистент, Керченский государственный морской
технологический университет
yaviktoria.troyan@yandex.ru

INVESTIGATION OF THE PECULIARITIES OF BRACHIONUS PLICATILIS CULTIVATION

V. Rozhnova

Summary. The article examines the patterns of reproductive dynamics and thermal stability of populations of marine rotifers *Brachionus plicatilis* when using various feed substrates under conditions of uncontrolled temperature fluctuations (20–23°C). A three-variant laboratory experiment compared a mono-diet of baking yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), a combination of *Diacronema lutheri* (11×10^6 cells/ml) with yeast and vitamin B₁₂ (0.02 ml/l), as well as an experimental mixture of *Diacronema lutheri* + Methionine + vitamin B₁₂. Cultivation was carried out in glass bioreactors (2000 ml, salinity 12–13 ‰, initial density 20 individuals/ml) with aeration and monitoring of temperature and population size. The significant superiority of enriched nutrient mixtures has been established. The results obtained substantiate the expediency of switching from a traditional yeast mono-diet to standardized combined substrates for the production of high-quality live feed in aquaculture. The developed approaches increase the reproductive capacity of rotifers, minimize the risks of developmental pathologies of larval marine fish (pigmentation deficiency, reduced immunogenicity) and ensure the survival of fry, creating the basis for sustainable technologies of mass cultivation.

Keywords: *Brachionus plicatilis*, *Diacronema lutheri*, reproductive dynamics, thermal stability, DC-PUFA omega-3, methionine, aquaculture, live feed.

Введение

Выращивание мальков рыб, особенно этап их кормления, является одним из наиболее сложных и критически важных в аквакультуре. Успех этого процесса определяет эффективность всего производства. Традиционно для кормления используют живые подвижные организмы, обеспечивающие оптимальный баланс нутриентов и стимуляцию пищеварительных процессов. Однако применение сухих кормов сопряжено с существенными трудностями: низкая ферментативная активность и недоразвитость желудочно-кишечного тракта мальков препятствуют их усвоению, что приводит к дефициту нутриентов, замедлению роста мальков и нарушению развития.

Поэтому одной из ключевых задач, стоящих перед специалистами в области аквакультуры, является по-

Аннотация. В статье исследованы закономерности репродуктивной динамики и термостойкости популяций морских коловраток *Brachionus plicatilis* при использовании различных кормовых субстратов в условиях неконтролируемых температурных колебаний (20–23°C). В трехвариантном лабораторном эксперименте сравнивались монодиета хлебопекарных дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*), комбинация диакронемы лютера (*Diacronema lutheri*, 11×10^6 кл./мл) с дрожжами и витамином B₁₂ (0,02 мл/л), а также экспериментальная смесь *диакронемы лютера* (*Diacronema lutheri*) + метионин + витамин B₁₂. Культивирование проводилось в стеклянных биореакторах (2000 мл, соленость 12–13 ‰, исходная плотность 20 особей/мл) с аэрацией и мониторингом температуры и численности популяций. Установлено значительное превосходство обогащенных питательных смесей. Полученные результаты обосновывают целесообразность перехода от традиционной дрожжевой монодиеты к стандартизированным комбинированным субстратам для производства высококачественного живого корма в аквакультуре. Разработанные подходы повышают репродуктивную емкость ротиферов, минимизируют риски патологий развития личиночных морских рыб (дефицит пигментации, сниженная иммуногенность) и обеспечивают выживаемость мальков, создавая основу для устойчивых технологий массового культивирования.

Ключевые слова: *Brachionus plicatilis*, *Diacronema lutheri*, репродуктивная динамика, термостойкость, ДЦ-ПУЖК омега-3, метионин, аквакультура, живой корм.

вышение доступности живых кормов для мальков рыб. Данная проблема предполагает разработку инновационных кормовых смесей, обладающих повышенной усвояемостью и минимизирующих антропогенное воздействие на аквакультурную среду. Необходимо подчеркнуть, что до появления эффективных искусственных заменителей, обеспечивающих полноценное замещение биологически активных компонентов живых кормов, фитопланктон и зоопланктон сохраняют статус приоритетных источников питания на ранних стадиях постэмбрионального развития. Таким образом, проблема кормления мальков выходит за рамки чисто технологических решений и представляет собой комплексную научную задачу, решение которой требует глубокого понимания физиологических и биохимических процессов, протекающих в организме рыб на стадии личиночного развития.

Исследования в области кормления мальков продолжают и ориентированы на разработку инновационных технологий, повышающих эффективность культивирования и минимизирующих экологическое воздействие. При этом морские коловратки *Brachionus plicatilis* [1, 8] (далее — *B. plicatilis*) продолжают оставаться не только одним из наиболее распространенных объектов живого корма в аквакультуре, выполняя ключевую функцию в трофических цепях морских экосистем и производственных системах, но и выступают основным объектом научного исследования в области культивирования в целях кормления мальков.

Несмотря на теоретическую возможность культивирования популяций *B. plicatilis* с повышенной нутриентной ценностью, на практике получаемые культуры часто демонстрируют сниженные биологические показатели. Это обусловлено комплексом факторов, включая недостаточный уровень гигиенических стандартов и деградацию физиологического состояния культуры, что проявляется в уменьшении скорости локомоции и репродуктивной активности. К основным ограничениям массового производства *B. plicatilis* относятся непредсказуемость накопления биомассы, трудности регуляции и сбора высокоплотных популяций, а также сложности получения аксиальных культур без контаминации патогенными микроорганизмами и загрязнителями.

Указанные факторы существенно снижают продуктивность и биобезопасность производства. Зоотехнические аспекты культивирования остаются недостаточно изученными, особенно в части селекции: отбор клонов осуществляется без применения генетических методов, что приводит к неоптимальному использованию генетического потенциала и ограничивает улучшение репродуктивных и нутриентных характеристик, что, как следствие, сказывается на эффективности аквакультурных систем в целом.

Учитывая вышесказанное, видится необходимым выработка комплексного подхода к решению обозначенных проблем, включающего экономическую эффективность разведения *B. plicatilis*, а также внедрение современных методов селекции и биотехнологий мониторинга, что позволит повысить репродуктивную емкость, нутриентный профиль и стабильность производства *B. plicatilis*.

Экономическая целесообразность интенсивного культивирования *B. plicatilis* определяется доступностью экономически выгодных кормовых субстратов, что обусловило преобладание хлебопекарных дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*) в составе питательных сред. Эти дрожжи обеспечивают высокие темпы репродукции популяций при минимальных затратах на подготовку и стерилизацию культурной среды.

В системах крупномасштабного культивирования дрожжи применяются преимущественно в нестерильных условиях, где питание *B. plicatilis* обеспечивается нативными бактериальными и дрожжевыми популяциями, развивающимися в ходе субстратной ферментации [1]. Данный режим позволяет достигать высоких плотностей культуры (300–500 особей/мл) при минимальных технологических затратах, определяя его приоритетность для коммерческих аквакультурных производств.

Однако фундаментальным ограничением дрожжевого рациона является дефицит длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (далее — ДЦ-ПУЖК) семейства омега-3, в частности эйкозапентаеновой (далее — ЭПК, 20:5n-3) и докозагексаеновой (далее — ДГК, 22:6n-3) кислот, необходимых для нормального роста, морфогенеза и выживаемости личиночных стадий многих морских рыб [2, 6, 8, 10]. Накопление ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 в липидах *B. plicatilis* определяет их нутриентную ценность как корма для мальков: дефицит вызывает патологии пигментации («красная болезнь»), снижение стрессоустойчивости и повышенную летальность при переходе к экзогенному питанию.

При наличии достаточного количества высококачественных микроводорослей (изохрисис галбана (далее — *Isochrysis galbana*), наннохлорепсис глазчатый (далее — *Nannochloropsis oculata*), родомонас солоноватый (далее — *Rhodomonas salina*)) они служат оптимальным источником ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 для *B. plicatilis* [5, 7, 9]. Высокие концентрации ЭПК, 20:5n-3 в *Nannochloropsis oculata* и ДГК, 22:6n-3 в *Isochrysis galbana* и *Rhodomonas salina*, в сочетании с относительной простотой их культивирования, определяют их ценность как кормовых субстратов в аквакультуре [3, 4].

Инкубация *B. plicatilis* в культурах микроводорослей (плотность 5—25 × 10⁶ кл./мл) обеспечивает быстрое накопление ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 в течение 4–6 часов, с формированием специфического липидного профиля, определяемого видом субстрата. При использовании *Isochrysis galbana* соотношение ЭПК, 20:5n-3/ДГК, 22:6n-3 превышает 2, что оптимально для личиночного кормления многих морских рыб. В отличие от него, тетрасельмис (*Tetraselmis*) характеризуется преобладанием ЭПК, 20:5n-3 над ДГК, 22:6n-3 (соотношение <0,5), обусловленным высоким содержанием ЭПК, 20:5n-3 в его хлоропластных липидах и низкой долей ДГК, 22:6n-3, что делает его предпочтительным для обогащения *B. plicatilis* на ранних стадиях личиночного цикла рыб с повышенными требованиями к ЭПК, 20:5n-3.

Тем не менее, высококачественные микроводоросли в большинстве случаев недоступны в необходимых объемах из-за высокой стоимости производства и обогащения [7]. Поэтому *B. plicatilis* перед кормлением личи-

ночных рыб обогащают липидными эмульсиями с последующей выдержкой в чистой воде или «зеленой воде».

«Зеленая вода» представляет собой суспензию микроводорослей ($0,2 \times 10^6$ кл./мл *Tetraselmis*, *Nannochloropsis* или *Isochrysis spp.*), поддерживающую оптимальный уровень ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 в липидах коловраток [9, 10]. Стабильные водорослевые продукты в форме концентрированных паст и замороженной биомассы (*Tetraselmis*, *Nannochloropsis*, *Isochrysis galbana*), как отмечают в специализированной литературе, представляют собой инновационные кормовые субстраты, сохраняющие жизнеспособность и нутриентный профиль в течение длительного времени [9]. Согласно научным исследованиям, их ключевые преимущества включают возможность транспортировки и хранения паст при + 4°C до 2 недель без потери качества, исключение необходимости локального культивирования микроводорослей, гарантированный высокий уровень ДЦ-ПУЖК омега-3 при отсутствии контаминации, стандартизированный химический состав липидов (ЭПК, 20:5n-3/ ДГК, 22:6n-3) и достижение высоких плотностей культуры *B. plicatilis* (до 500 особей/мл) при использовании концентрированных субстратов [9]. Эти свойства определяют стабильные продукты как экономически и технологически предпочтительную альтернативу живым культурам микроводорослей.

Методология исследования

Для изучения влияния различных кормовых субстратов на репродуктивную динамику и накопление ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 в *B. plicatilis* применялись следующие методы: культивирование в трехвариантном эксперименте (контроль на хлебопекарных дрожжах, комбинация генетически близкородственные микроводоросли *Isochrysis galbana* и водоросли диакронема Лютери ((далее — *Diacronema lutheri*) с дрожжами и витамином В₁₂, (экспериментальная смесь *Diacronema lutheri* + метионин + витамин В₁₂) в стеклянных биореакторах (2000 мл, соленость 12–13 ‰, аэрация); мониторинг плотности популяции (исходно 20 особей/мл) и температуры окружающей среды; статистическая обработка данных в Microsoft Excel 2007. Совокупность указанных методов позволила количественно оценить эффективность кормовых добавок, выявить оптимальные условия культивирования и установить зависимость репродуктивных показателей от нутриентного состава субстрата.

Результаты и обсуждение

Для подтверждения гипотезы о превосходстве комбинированных кормовых субстратов на основе *Diacronema lutheri* над монодиетой хлебопекарных дрожжей в культивировании *B. plicatilis* в лабораторных условиях был

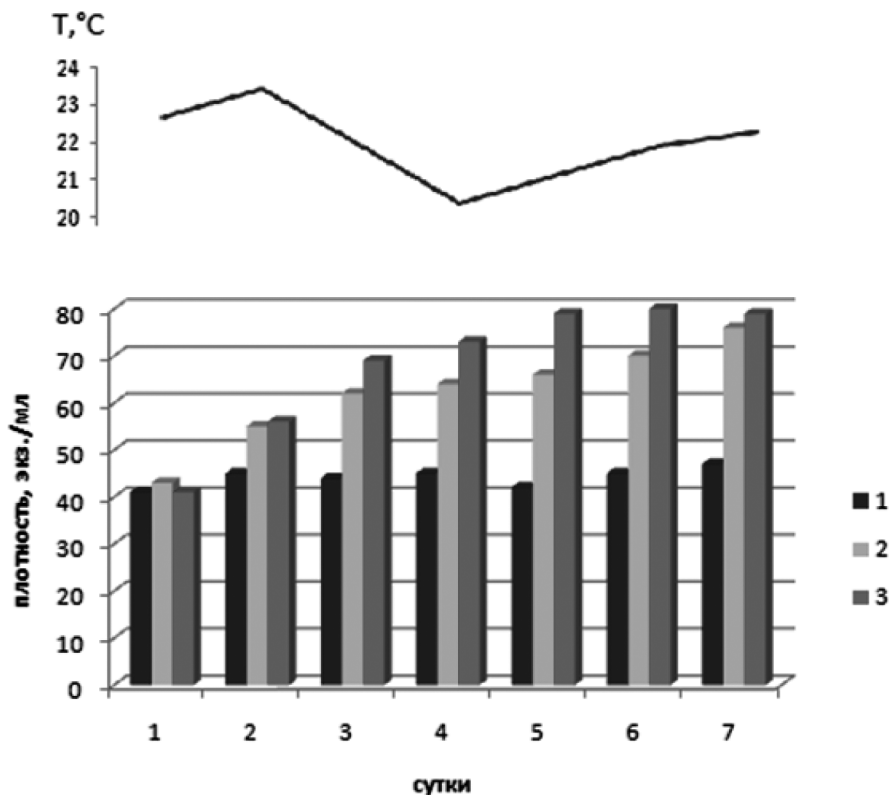


Рис. 1. Изменение плотности культур коловратки в зависимости от состава питательных смесей:
 1 — *Saccharomyces cerevisiae*, 2 — водоросль *Diacronema lutheri* + дрожжи+ витамин В₁₂,
 3 — водоросль *Diacronema lutheri* + метионин + витамин В₁₂)

проведен эксперимент. Температура в культурах варьировалась в пределах 20–23°C (рис. 1), с лаг-фазой длительностью 24 часа при 23°C и последующим переходом к экспоненциальной фазе роста. Снижение температуры на 4-й день вызвало уменьшение плотности популяции во всех вариантах, однако в экспериментальной группе 3 (*Diacronema lutheri* + метионин + витамин B₁₂) прирост численности оставался максимально выраженным, подтверждая эффективность предложенной кормовой добавки (рис. 2).

Полученные данные экспериментально обосновывают целесообразность применения метионина и витамина B₁₂ для оптимизации репродуктивной динамики *B. plicatilis* в контролируемых лабораторных условиях.

Поскольку температурные колебания существенно влияли на динамику роста популяций *B. plicatilis* во всех экспериментальных группах (рис.2), это обусловило необходимость проведения сравнительного анализа репродуктивных показателей в зависимости от состава кормового субстрата.

В контрольной группе, получавшей монодиету хлебопекарных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, зафиксирована высокая чувствительность к температурному стрессу: на 4-й день культивирования снижение температуры с 23°C до 20°C привело к отрицательному приросту численности популяции (снижение на 25–30 % от максимального значения) с последующим частичным восстановлением при естественном повышении температуры. Данная динамика свидетельствует о выраженной температурной зависимости репродуктивных процессов при дефиците ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 в рационе.

Варианты 2 (*Diacronema lutheri* + дрожжи + витамин B₁₂) и 3 (*Diacronema lutheri* + метионин + витамин B₁₂) характеризовались существенно большей термоустойчивостью: снижение плотности популяции составило менее 10%, а экспоненциальная фаза роста возобновилась быстрее (рис.2). В экспериментальной группе 3 прирост численности оставался максимально выраженным даже при неблагоприятных температурных условиях.

Полученные экспериментальные данные подтверждают повышенную чувствительность *B. plicatilis*, культиви-

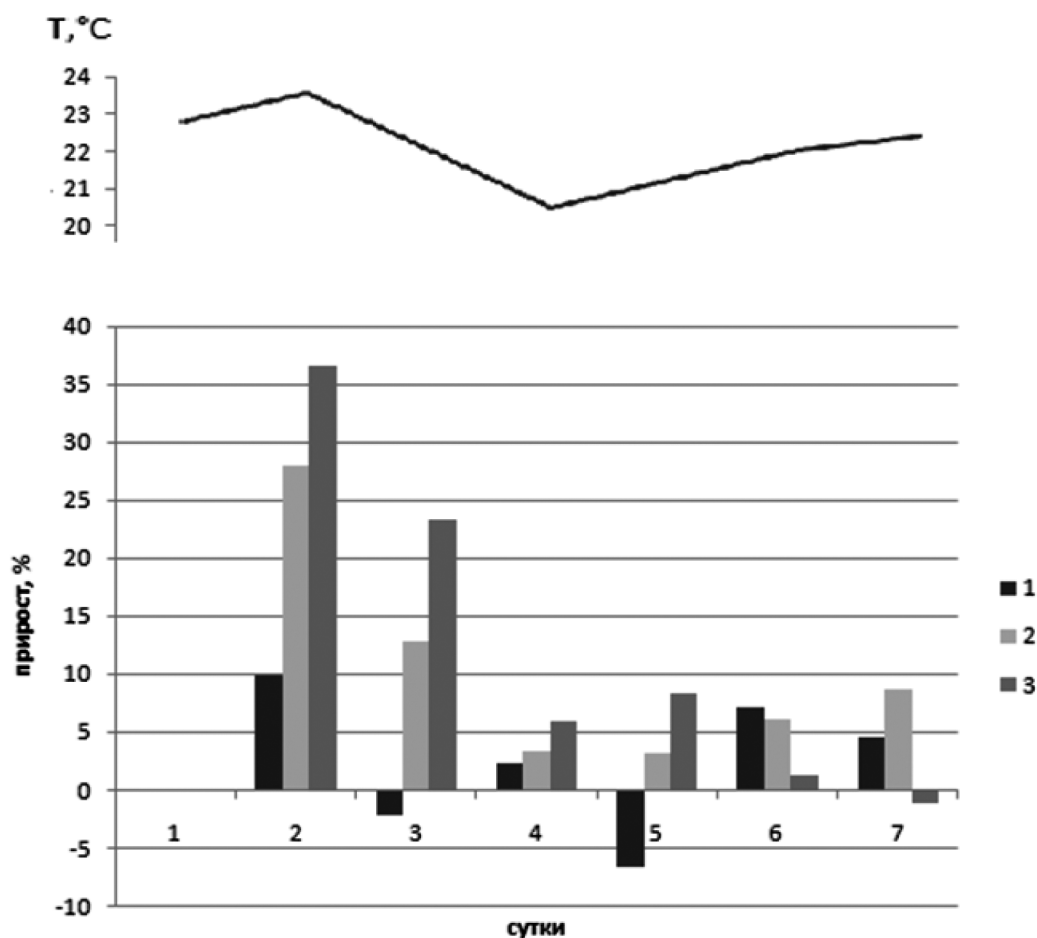


Рис. 2. Приросты плотности культуры коловратки в зависимости от состава питательных смесей:
 1 — дрожжи, 2 — водоросль *Diacronema lutheri* + дрожжи + витамин B₁₂,
 3 — водоросль *Diacronema lutheri* + метионин + витамин B₁₂

вируемой на дрожжевой монодиете, к температурным колебаниям окружающей среды, с пропорциональным снижением темпов роста и репродуктивной активности. В противоположность этому, использование кормовых смесей, обогащенных микроводорослями как источником ДЦ-ПУЖК семейства омега-3, обеспечивало повышенную физиологическую устойчивость, стабильность численности популяции и сокращение лаг-фазы восстановления при стрессовых воздействиях.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о значительно более высокой репродуктивной динамике популяций *B. plicatilis* при использовании питательных смесей на основе *Diacronema lutheri* с добавлением метионина и витамина B₁₂ по сравнению с монодиетой хлебопекарных дрожжей. В контрольной группе на дрожжах наблюдалась отрицательная динамика численности при температурном стрессе (снижение на 25–30 %), тогда как в экспериментальной группе 3 прирост плотности популяции оставался стабильным даже при неблагоприятных условиях (снижение <10 %), что подтверждает гипотезу о превосходстве обогащенных кормовых субстратов.

Данный результат представляет фундаментальное значение для оптимизации технологий массового производства живого корма в аквакультуре, поскольку *B. plicatilis* служит ключевым звеном в питании личиночных стадий морских рыб, требующих источников ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 (ЭПК, 20:5n-3/ ДГК, 22:6n-3) для нормального морфогенеза, пигментации и иммуногенеза.

Применение питательных смесей позволяет не только повысить репродуктивную емкость *B. plicatilis* (до 500 особей/мл), но и обеспечить их обогащение незаменимыми липидами, минимизируя риски патологий («красная болезнь») у потребителей.

В условиях неконтролируемой температуры окружающей среды (20–23°C), характерных для полевых аквакультурных производств, рекомендуется переход от дрожжевой монодиеты к комбинированным субстратам с высоким содержанием микроводорослей и аминокислотных добавок. Полученные выводы создают основу для разработки стандартизированных протоколов культивирования и требуют дальнейших исследований по селекции высокопродуктивных клонов *B. plicatilis*, оптимизации доз метионина и оценке долгосрочных эффектов на выживаемость личиночных рыб.

Полученные выводы имеют фундаментальное значение для аквакультурной науки и практики, поскольку разработка стандартизированных протоколов культивирования *B. plicatilis* решит ключевую проблему обеспечения стабильных поставок высококачественного живого корма, обогащенного оптимальным соотношением

длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (ДЦ-ПУЖК) семейства омега-3 (ЭПК, 20:5n-3/ДГК, 22:6n-3 >1–2), что минимизирует критические патологии развития личиночных рыб, включая дефицит пигментации («красная болезнь»), сниженную иммуногенность, нарушения морфогенеза нервной системы и повышенную восприимчивость к патогенам, повышая в итоге выживаемость мальков на 20–40 % и коэффициент конверсии корма на 15–25 %, что особенно критично для коммерческой аквакультуры морских видов (*Sparus aurata*, *Dicentrarchus labrax*, *Puntazzo puntazzo*).

Селекция высокопродуктивных клонов устраним существующее отсутствие генетически обоснованных методов отбора (RAPD-маркеры, AFLP-анализ, митохондриальная ДНК), ограничивающее репродуктивную емкость популяций максимумом 300–500 особей/мл и высокой вариабельностью клональных линий, и позволит увеличить продуктивность в 1,5–2 раза за счет отбора по критериям репродуктивного индекса (кист/самка/сутки >25), скорости локомоции и термостабильности, эквивалентно экономии миллионов рублей на гектар аквакультурных площадей и снижению зависимости от импортных стартовых культур.

Оптимизация доз метионина как лимитирующей серосодержащей аминокислоты (предположительно 0,5–2 мг/л) обеспечит переход от эмпирических практик к технологиям с высокой воспроизводимостью результатов между лабораториями, включая дозозависимые эффекты на синтез метаболитов (S-аденозилметионин) и репродуктивную сигнализацию. Долгосрочная оценка трансферных эффектов ДЦ-ПУЖК через цепочку «корм — ротифер — личиночная рыба» на выживаемость при отлучении от живого корма (*weaning*), скорости роста мальков (*juvenile growth rate*) и коэффициента конверсии корма (*FCR, feed conversion ratio*) при температурах 18–25°C закроет фундаментальный пробел в знаниях о липидном метаболизме личиночных стадий, создав полные данные для конкретных видов и замкнутую систему «генетика × корм × среда — продуктивность корма — рост рыбы», повышающую коэффициент конверсии корма на 30–50 %, снижающую себестоимость на 20–35 % и делающую производство полностью независимым от природных популяций планктона, сезонных колебаний и логистических рисков поставок микроводорослей.

Заключение

Подводя итог, необходимо отметить, что нестабильность результатов при разведении личиночных стадий морских рыб в значительной степени обусловлена вариабельностью физиологического состояния и нутриентной ценности партий живого корма *B. plicatilis*. Данная изменчивость представляет собой имманентное свой-

ство динамики ротицерных популяций и не поддается полному устранению в условиях массового производства.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют принципиальную возможность минимизации указанных рисков за счет перехода от традиционных периодических культур на хлебопекарных дрожжах к стандартизированным питательным смесям на основе *Diacronema lutheri* с добавлением метионина и витамина B₁₂, обеспечивающим повышенную термоустойчивость, репродуктивную емкость (до 500 особей/мл) и оптимальное соотношение ДЦ-ПУЖК семейства омега-3 (ЭПК, 20:5n-3/ ДГК, 22:6n-3 > 1-2).

Разработанные подходы создают основу для внедрения устойчивых технологий культивирования, ориенти-

рованных на строгий контроль параметров среды (соленость 12–13 ‰, аэрация, температура 20–23°C), качества водной среды и микробиоты, а также использование высококачественных кормовых добавок. Перспективы дальнейших исследований включают генетическую селекцию продуктивных клонов *B. plicatilis*, оптимизацию доз лимитирующих аминокислот и долгосрочную оценку трансферных эффектов на выживаемость личиночных рыб при отлучении от живого корма, скорость роста мальков и коэффициент конверсии корма.

Реализация данных технологий позволит обеспечить стабильное производство обогащенного живого корма, повысить выживаемость личиночных рыб, снизить себестоимость аквакультурного производства на и минимизировать экологическое воздействие, формируя основу современной аквакультуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронович Т.М., Спекторова Л.В. 1973. Некоторые данные по питанию личинок камбалы калкана *Scophthalmus vaeoticus* в лабораторных условиях // Труды ВНИРО. Т. 94. С. 34–43.
2. Бакаева Е.Н. Эффективность роста коловраток в условиях аквакультуры. Автореф. дис... канд.биол.наук. Минск: Институт зоологии АН Беларуси, 1992. 20 с.
3. Бурлаченко И.С. Зарубежный опыт развития прибрежной, морской и океанической марикультуры и ее приоритетные задачи в Российской Федерации // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2008. № 1. С. 52–56.
4. Винберг Г.Г. Интенсивность обмена и пищевые потребности рыб. — Минск: Изд-во БГУ, 1956. 247 с.
5. Воронова Н.С. Исследование состава льняного жмыха как нового ингредиента в производстве молочных продуктов / Н.С. Воронова, Л.С. Бередица // Современные тенденции технических наук: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2015 г.). Казань: Бук, 2015. С. 93–96.
6. Галковская Г.А., Головчиц В.А. Митянина И.Ф. Кн. «Эколого-биологические основы массового культивирования коловраток». Минск, 1988. 140 с.
7. Новоселова Н.В. К методике культивирования живых кормов для объектов морской аквакультуры // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-черноморского региона Материалы IX Международной научно-практической конференции. 2017 Издательство: Керченский филиал («ЮгНИРО») федерального государственного бюджетного научного учреждения «Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства» (Керчь). С.144–162.
8. Спекторова Л.В. Инструкция по массовому разведению морских одноклеточных водорослей и коловраток / Л.В. Спекторова, С.Л. Паньков, Е.С. Проскурина, С.В. Шершов, А.М. Семик. М.: ОНТИ ВНИРО, 1986. 64 с.
9. Hou Y., Wu G. (2017) Nutritionally nonessential amino acids: a misnomer in nutritional sciences. *Advances in Nutrition*, 8(1): 137–139.
10. Watanabe T. Nutritional values of live organisms used in Japan for mass propagation of fish: a review / T. Watanabe, T. Kitajima, S. Fugita // *Aquacultura*. — v. 34 — № 1-2. — 1983. — P.115–143.

ДИНАМИКА РОСТА СУРКОВ СТЕПНЫХ (MARMOTA BOBAK MULL., 1776) В ПОСТНАТАЛЬНОМ ОНТОГЕНЕЗЕ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОМ РАЗВЕДЕНИИ

GROWTH DYNAMICS OF STEPPE MARSHMELLS (MARMOTA BOBAK MULL., 1776) IN POSTNATAL ONTOGENESIS IN INDUSTRIAL BREEDING

O. Fedorova
E. Orlova
E. Larina

Summary. The article describes the growth patterns of marmots (*M. b. bobak*, Muller, 1776) bred at the Russian Sable experimental farm in Pushkinsky District, Moscow Region. The study focused on the growth of marmots during the periods from birth to the first hibernation and from awakening to the second hibernation. At birth, the mass of the marmots is 30 g. During the hibernation period (230 days), the body length of the marmots increased slightly (1.5 cm), and the body mass decreased by more than 20 %. No sexual dimorphism in body length and mass was observed in marmots.

Keywords: steppe marmots, experimental farm, live weight, body length, height.

Федорова Оксана Ивановна

доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»
ox_fed@mail.ru

Орлова Елена Александровна

кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»

Ларина Елена Евгеньевна

доктор биологических наук, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»

Аннотация. В статье изложены закономерности роста сурков (*M. b. bobak*, Muller, 1776), разводимых на экспериментальной ферме АО «Русский соболь», Пушкинского района, Московской области. Проведены исследования по изучению роста сурков в периоды от рождения до первой спячки и от пробуждения до второй спячки. В результате проведенных исследований установлено, что при рождении средняя масса сурчат составляет 30 г. За период спячки (230 дней) длина тела сурков увеличилась незначительно (1,5 см), а масса тела уменьшилась более чем на 20 %. По длине и массе тела полового диморфизма у сурков не обнаружено.

Ключевые слова: сурки степные, экспериментальная ферма, живая масса, длина тела, рост.

Введение

Байбак европейский (*Marmota bobak*, Muller, 1776) — самый крупный представитель рода сурков. Перспективность введения этих сурков в зоокультуру обусловлена быстрым привыканием к человеку, растительным типом питания и продукцией в виде шкурок, диетического мяса и целебного жира [1,2]. Продолжительная зимняя спячка — основная биологическая особенность сурков — у байбаков европейских она длится с сентября по март. В это время температура тела зверьков снижается до температуры окружающего воздуха в гнезде и составляет +3...+10° С (в норме температура тела сурков +36°С). У них замедляется дыхание (один вдох в 2–3 минуты) и сердцебиение (3–6 ударов в минуту), кровь не свертывается (сезонная гемофилия). Организм зверьков становится невосприимчив к заражению болезнетворными микроорганизмами [3]. Разведение сурков на экспериментальной ферме Племенного завода «Пушкинский» (в данное время АО «Русский соболь»), позво-

лило провести уникальные научные исследования по изучению биологических особенностях этого вида [4,5].

Материалы и методы

Для изучения закономерностей линейного роста всех родившихся щенков (15 самок и 15 самцов) сурков степных с первых дней жизни и до спячки взвешивали и измеряли каждые 10 дней. Длину тела измеряли от кончика носа до корня хвоста, с точностью до 0,5 см. Взвешивание осуществляли на торговых циферблатных весах (ВЦ-10), с точностью до 10 г. После первой спячки все вышеописанные исследования проводились с сурками для изучения их роста на втором году жизни.

Результаты исследования

При рождении средняя длина тела самок сурков составила 9,3 см, средняя масса тела — 30,8 г (таблица). К отсадке (в 45 дней) средняя длина тела увеличилась

на 20 см, а живая масса, соответственно, на 852,5 г. У самцов сурков при рождении длина тела составила 9,7 см, масса тела 29,1 г. В 45 дней при отсадке средняя длина тела у самцов достигла 29,5 см, а средняя живая масса 782,5 г. У сурчат при рождении и при их отсадке не обнаружено достоверной разницы по длине и массе тела между самками и самцами. В сентябре перед первой спячкой длина тела у самок сурков составила 47,3 см, у самцов — 47,8 см. Средняя масса тела самок в этот период достигла 4580 г, самцов — 4642 г. Половой диморфизм по длине тела и живой массе у сурков перед первой спячкой не обнаружен. За период спячки (230 дней) длина тела сурков увеличилась незначительно (1,5 см), а масса тела уменьшилась на более чем 20 %.

Таблица 1.

Динамика роста сурков степных (*Marmota Bobak* Mull., 1776) в постнатальном онтогенезе при промышленном разведении, ($\bar{X} \pm S_x$)

Возраст в сутках	Длина тела, см		Живая масса, г	
	самки (n=15)	самцы (n=15)	самки (n=15)	самцы (n=15)
1	9,3±0,3	9,7±0,2	30,8±1,0	29,1±1,0
10	13,1±0,9	12,6±0,7	65,0±2,0	65,4±5,4
20	20,1±0,2	19,0±0,5	261,4±15	248,7±17
30	22,9±0,8	24,7±0,8	383,6±30	432,0±28
40	29,0±0,8	28,2±0,6	644,0±34	670,0±33
45	29,3±1,0	29,5±0,6	883,3±56	782,5±57
50	34,7±1,8	33,9±0,8	1423±22	1294±10
60	36,7±1,5	35,2±2,0	1772±22	1442±21
70	40,8±0,6	38,4±0,5	2627±18	2187±11
80	43,2±0,6	41,5±0,6	3363±21	2810±13

Возраст в сутках	Длина тела, см		Живая масса, г	
	самки (n=15)	самцы (n=15)	самки (n=15)	самцы (n=15)
100	44,3±0,5	44,4±0,7	3932±23	3695±20
110	46,8±0,4	46,1±0,7	4363±25	4148±16
130	46,8±0,8	46,9±0,7	4523±27	4616±28
145	47,3±0,8	47,8±0,5	4580±23	4642±29
375	48,3±0,5	49,3±0,5	3465±105	3610±97
395	49,7±0,5	51,6±0,4	4100±77	4290±94
410	50,8±0,5	52,4±0,4	4770±140	4962±130
435	52,3±0,6	53,9±0,5	5105±155	5218±156
470	52,6±0,5	54,6±0,4	5910±121	6284±163
515	53,4±0,7	55,2±0,5	6200±132	6450±148

На втором году жизни рост у сурков продолжился. С пробуждения от первой спячки до залегания во вторую, средняя длина тела у самок увеличилась от 48,3 до 53,4 см (на 5,1 см), а живая масса от 3465 до 6200 г (на 2735 г). У самцов длина тела увеличилась на 5,9 см (от 49,3 до 53,9 см), а масса на 2840 г (с 3610 до 6450 г). На втором году жизни в возрасте 515 дней по длине тела самцы превосходят самок на 1,8 см ($P > 0,95$). По живой массе достоверной разницы между самками и самцами в этом возрасте не обнаружено.

Заключение. Живая масса тела отдельных особей сурков степных на первом году жизни приближается к массе сурков двухлетнего возраста и превосходит среднюю живую массу их сверстников в природе [6,7]. Это свидетельствует о целенаправленной селекции на укрупнение сурков в условиях промышленного разведения на фоне полноценного кормления и высокой изменчивости сурков по живой массе и длине тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология разведения степного сурка (*Marmota Bobak*) в условиях клеточного содержания / Е.А. Тинаева, Г.А. Федосеева, Н.А. Балакирев [и др.]. — Москва: Научно-исследовательский институт пушного звероводства и кролиководства им. В.А. Афанасьева, 2009. — 46 с. — EDN UCSBACT.
2. Федорова, О.И. Первые этапы промышленной доместикации степного сурка (*Marmota bobak Muller, 1776*) / О.И. Федорова // Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2011. — Т. 15, № 4. — С. 697–704. — EDN 00ZBQJ.
3. Машкин В.И. Европейский байбак: экология, сохранение и использование // Пособие для специалистов по природопользованию. Киров. — 1997. — 156 с.
4. Федорова, О.И. Закономерности роста и развития сурков в постнатальном онтогенезе / О.И. Федорова // Разведение и селекция пушных зверей и кроликов в России: Материалы научно-производственной конференции, Родники, 08 декабря 2005 года. — Родники: Научно-исследовательский институт пушного звероводства и кролиководства им. В.А. Афанасьева, 2005. — С. 46–50. — EDN VTMCYL.
5. Орлова, Е.А. Особенности разведения растительноядных пушных зверей: Курс лекций / Е.А. Орлова, О.И. Федорова. — Москва: ООО «Академия Принт», 2025. — 128 с. — ISBN 978-5-605-33689-1. — EDN ZFSPZO.
6. Федорова, О.И. Влияние доместикации на хозяйственно полезные и морфофизиологические признаки норки американской (*Mustela vison Schreber, 1777*), хорька (*Mustela putorius L., 1758*) и сурка степного (*Marmota bobak Mull., 1776*) при промышленной технологии разведения : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Федорова Оксана Ивановна, 2014. — 241 с. — EDN PDQEEI.
7. Федорова, О.И. Закономерности линейного роста степных сурков (*Marmota bobak Mull., 1776*) в постнатальном онтогенезе / О.И. Федорова, Е.А. Орлова, И.В. Белоусова // Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы : Материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 90-летию организации кафедры зоологии, экологии и охраны природы имени А.Г. Банникова, Москва, 06 декабря 2021 года / Ответственные редакторы и составители: Остапенко В.А., Коновалов А.М.. Том Выпуск 4. — Москва: ЗооВетКнига, 2022. — С. 134–139. — EDN PUVDWO.

ЭКОЛОГО-ЗООГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛАКОФАУНЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ И УТЛЮКСКОГО ЛИМАНА

ECOLOGICAL AND ZOOGEOGRAPHICAL CHARACTERISTICS OF THE MALACOFUNA OF THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF AZOV AND UTLYUK ESTUARY

**I. Khaliman
N. Sidoryak**

Summary. The article presents and discusses the results of the analysis of the fauna status and distribution features of mollusks in the studied part of the Sea of Azov. The zoogeographic characteristics and real ecological spectra of common mollusk species inhabiting the Sea of Azov are determined.

Confirmation is obtained that some of the most eurybiontic mollusk species (*Gibbula albida*, *Anadara inaequalis*, etc.) have significantly expanded their ranges in the region over the past 15 years.

Keywords: Sea of Azov, mollusks, fauna, ecology.

Халиман Игорь Алексеевич

кандидат биологических наук, доцент,
Мелитопольский государственный университет
iakhali@mail.ru

Сидорьяк Наталья Георгиевна

кандидат биологических наук, доцент,
Мелитопольский государственный университет
sydoryakn@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены и обсуждаются результаты анализа состояния фауны и особенности распределения моллюсков в изучаемой части Азовского моря. Определены зоогеографические характеристики и реальные экологические спектры массовых видов моллюсков, обитающих в Азовском море.

Получены подтверждения тому, что некоторые наиболее эврибионтные виды моллюсков (*Gibbula albida*, *Anadara inaequalis* и др.) заметно расширили свои ареалы в регионе за последние 15 лет.

Ключевые слова: Азовское море, моллюски, фауна, экология.

Введение

В природных экосистемах Азовского моря и прилегающих лиманов моллюски занимают заметное положение. Они являются характерными видами всех без исключения донных биоценозов региона, где, наряду с червями и ракообразными, представляют одну из самых многочисленных групп животных. Роль моллюсков в бентосных сообществах Азовского моря давно определена как доминирующая, а сам водоем именуется «...моллюсочным морем» [5].

Большое значение моллюски имеют в качестве объектов питания рыб (для большинства промысловых видов рыб они являются основой кормовой базы), птиц, некоторых водных млекопитающих, а также, как промежуточные и резервуарные хозяева некоторых гельминтов, паразитирующих во взрослом состоянии во многих хозяйственно важных животных и человеку.

Гидрологические характеристики и связанные с ними качественный и количественный состав зообентоса Азовского моря, прилегающих лиманов и рек региона постоянно привлекают внимание гидробиологов, а удаленность от научных гидробиологических центров,

сложные и динамичные условия гидрологии рек Северного Приазовья, относительная бедность видового состава обуславливают сравнительную краткость истории изучения малакофауны региона [2, 3, 4, 7].

В изучении экологии отдельных видов, качественной и количественной структуры и биологической продуктивности основных биоценозов Азовского моря и лиманов имеются определенные достижения [8, 9, 12, 13]. Однако и здесь многие вопросы разработаны еще слабо или остаются спорными и нуждаются в дополнительном изучении.

Известно, что предыдущие исследования моллюсков региона в целом проводились в соответствии с конхологической системой Милашевича и Тиле, разработанной в начале XX столетия. С точки зрения современных анатомических подходов к системе, большинство видов оказались сборными. Под одним видовым названием нередко объединялись несколько видов, иногда принадлежащих к разным родам [1, 6].

В исследуемом регионе моллюски являются главными потребителями водной микрофлоры и органического де-

трита, сносимого в море, впадающими в него реками и материковым стоком. Таким образом, Двустворчатые в качестве фильтраторов и Гастроподы играют важную роль в круговороте веществ и трансформации энергии, поддерживают равновесие экосистемы Азовского моря [10].

В связи с широким экологическим разнообразием, эта группа макрозообентоса представляет большой интерес для изучения ряда процессов экоморфологии и имеет важное гидробиологическое значение.

Целью работы является установление фауно-экологических и хоровологических особенностей брюхоногих и двустворчатых моллюсков в северо-западной части Азовского моря и прилегающем Утлюкском лимане.

Материалы и методы

Основным материалом послужили собственные качественные и количественные сборы моллюсков в пределах побережья Азовского моря между пос. Кирилловка и средней частью косы Бирючий Остров и в Утлюкском лимане. Точки отбора проб приведены на рис. 1.

Моллюски собирались в период 2023–2025 гг. в Утлюкском лимане и прибрежной части Азовского моря.

Сбор материала проводился общепринятыми гидробиологическими методами (Жадин, 1952). Всего отработано около 120 качественных проб.



Рис. 1. Карта региона с точками отбора проб

Результаты и обсуждение

Количественное распределение моллюсков в исследованной части Азовского моря крайне неравномерно. Полученные нами результаты по численности подтверждают данные предшествующих исследователей о важнейшей роли моллюсков в создании биомассы бентоса — до 80 % [16].

Особенности гидрологического режима Азовского моря и прилегающих лиманов обуславливаются, в основном, сравнительно небольшим притоком пресной воды и мелководностью бассейна. Согласно нашим наблюдениям за соленостью в северо-западной части побережья Азовского моря, проведенными в 2000–2015 гг., 2019–2025 гг., соленость моря плавно повышается [3]. Максимальная соленость отмечается в районе между полуостровом Бирючий и той частью Арабатской стрелки, куда поступают соленые воды Сиваша.

Наибольшая численность в сообществах моллюсков наблюдается в Утлюкском лимане и зоне псевдолиторали открытой части Азовского моря, где моллюски являются первичными уловителями смываемых с берегов органогенных остатков. Наименьшими показателями численности характеризуются сообщества моллюсков в районах песчаных кос побережья открытого моря с неустойчивым гидродинамическим режимом. Такой характер распределения сходен с распределением всей биомассы бентоса в Азовском море.

Утлюкский лиман — это морской лиман открытого типа, северная часть которого опресняется стоком двух малых рек — Малого и Большого Утлюка. В большей части лимана сохраняется нормальная морская соленость (по нашим данным за три года (2022–2025) — от 12,1 до 15 ‰). Благодаря хорошему водообмену с морем, в лимане господствует морской режим и хорошая аэрация придонных вод.

По нашим данным тип *Mollusca* в Утлюкском лимане представлен 73 видами. Из них 50 видов принадлежат классу *Gastropoda*, 23 вида — классу *Bivalvia*. Помимо средиземноморских эвригаллиных видов, в составе обитающих здесь моллюсков, нами были давно обнаружены (и встречаются сейчас) 2–3 вида, принадлежащих понто-каспийскому зоогеографическому комплексу. Это виды рода *Theodoxus*, а также *Dreissena polymorpha*. Распространению данных видов в северо-западной части Азовского моря свойствен ограниченный характер — они встречаются здесь только в Миусском лимане и в верхнем и среднем участках Утлюкского лимана, которые в наибольшей мере опреснены речными водами [2].

Полученные данные по составу фауны моллюсков в северо-западной части Азовского моря и Утлюкском лимане, позволяют выделить три типа сообществ:

1. Сообщества с резким преобладанием моллюсков-фильтраторов, отцеживающих органическую взвесь из придонных слоев воды.
2. Сообщества с преобладанием фитофильных и плотоядных видов брюхоногих моллюсков.
3. Сообщества смешанного типа, с численным преобладанием детритоядных моллюсков.

Распределение этих сообществ в регионе зависит от количества детрита на дне и в придонных слоях воды, степени развития водной растительности и наличия органики, пригодной для плотоядных моллюсков. Кроме наличия объектов питания, распределение тех или иных моллюсков определяется соленостью (в наибольшей степени) и типом грунтов (в меньшей).

В целом, сообщества моллюсков открытой части Азовского моря, по нашим данным, следует отнести к первому типу, поскольку здесь преобладают численно и по биомассе (до 85 %) *Mytilaster lineatus*, *Abra ovata*, *Loripes lucinalis*, *Mya arenaria* и виды рода *Cerastoderma*. Фитофильные (*Rissoidea*), детритоядные (*Hydrobiidae*) и всеядные (*Nassariidae*) формы здесь локально образуют поселения с высокой плотностью (в районе пос. Кирилловка — до 4000 экз./м²), однако, их доля в совокупной биомассе, меньше доли крупных двустворчатых моллюсков.

В отличие от прибрежной части открытого моря, в Утлюкском лимане значительно большее развитие получает водная растительность, и среди моллюсков численно преобладают фитофильные виды рода *Rissoa* и всеядные, предпочитающие падаль, виды рода *Tritia*. Кроме того, здесь локально встречаются массовые поселения видов рода *Theodoxus* (до 600 экз./м²).

Учитывая значительную долю двустворчатых моллюсков (по численности — до 10 %), по преобладанию фитофильных и плотоядных гастропод комплексы Утлюкского лимана следует отнести ко второму типу [14, 15, 18].

Все 66 видов моллюсков открытой части Азовского моря представлены средиземноморскими эвригаллиными видами, а виды понто-каспийского комплекса здесь отсутствуют. По численности доминируют брюхоногие моллюски родов *Rissoa*, *Bittium*, *Hydrobia*, локально поселения высокой плотности формируют *Thalassobia* (до 10000 экз./м²), среди двустворчатых моллюсков преобладают *Mytilidae* и *Cardiidae*.

Преобладающей по численности группой моллюсков в исследованном регионе (70 видов) являются морские виды средиземноморского происхождения — иммигранты недавнего (в геол. смысле) времени — они принадлежат к Средиземноморско-Лузитанской субтропической области [6].

В составе комплекса средиземноморских вселенцев в исследованном бассейне нет ни одного вида, который можно считать эндемиком данной акватории. Все эндемичные формы, выделенные Милашевичем К.О., являются внутривидовыми морфами средиземноморских видов или просто тождественны им [8].

В исследованном регионе обитают 3 вида, принадлежащих к понто-каспийскому фаунистическому комплексу (*Dreissena polymorpha*, *Theodoxus fluviatilis* и *Th. astrachanicus*). Они населяют устьевые участки крупных рек и лиманы, которые составляют Таганрогскую лиманную провинцию Понто-Каспийской солоноватоводной области [11, 12, 16].

С учетом литературных данных по Таганрогскому заливу, в пределах понто-каспийского комплекса моллюсков Азовского моря, помимо иммигрантов плейстоценового времени из Каспийского моря, имеются виды, вероятно, прямо связанные с древней фауной Меотического или Понтического бассейнов. Они представляют здесь самостоятельную зоогеографическую группу миоцен-плиоценовых автохтонных, реликтовых гастропод Черного и Азовского морей [10, 16].

В региональной фауне имеются 3 вида, вселившиеся из дальних морских бассейнов: *Rapana thomasi* из Желтого моря, *Mya arenaria* из Белого моря и *Anadara inaequalis* из Индо-Пацифики. Эти виды, после Черного моря, успешно обживают Азовское. Очевидно, что колонизация этими видами-вселенцами бассейна Азовского моря, представляет конечную стадию освоения Азово-Черноморского бассейна в целом. Это связано с тем, что дальнейшему распространению моллюсков морского происхождения служат опресненные воды Таганрогского залива, непригодные для обитания даже самых эврибионтных видов. Кроме того, ряд новых вселенцев в Черное море проникших сюда из далеких морей (Белого, Желтого и др.), легко преодолевают Керченский пролив и обживают пригодные для них открытые участки Азовского моря и его крупные лиманы в северо-западной части.

Очевидно, этот процесс еще далек от завершения. По нашим представлениям процесс «медитерраниза-

ции» Черного моря оборачивается последующей «понтацией» Азовского [7, 8].

В зоогеографическом смысле виды-вселенцы чужеродны по отношению к «аборигенным» видам исследуемого бассейна. Это справедливо как в отношении пресноводных видов – форм морского (средиземноморского) происхождения и видов понто-каспийского реликтового комплекса [3, 11]. Таким образом, вселенцы придают всей азово-морской фауне дополнительную зоогеографическую пестроту.

Выводы

Полученные результаты по количественному распределению моллюсков в исследованной части Азовского моря подтверждают данные предшествующих исследователей о важной роли моллюсков (до 80 %) в создании биомассы бентосных сообществ.

Водные экосистемы северо-западной части акватории Азовского моря являются объектами пополнения видами-вселенцами из других зоогеографических областей. На сегодня очевидно, что процесс «понтации» Азовского моря продолжается и наиболее эврибионтные виды моллюсков (*Gibbula albida*, *Anadara inaequalis* и др.) расширяют свои ареалы в регионе.

На основе полученных фаунистических данных показано, что зоогеографический состав малакофауны северо-западной части Азовского моря и его лиманов неоднороден. Она составлена тремя неравновеликими группами: средиземноморскими эвригалными мигрантами (70 видов), понто-каспийскими солоноватоводными моллюсками — 3 вида и 3-х видов-вселенцев из дальних морских бассейнов.

Качественный состав и количественная структура сообществ моллюсков северо-западного побережья Азовского моря показывают, что чем больше условия жизни в конкретном биотопе отклоняются от оптимальных для большинства организмов, тем беднее видами становится биоценоз и тем выше численность оставшихся видов (подтверждают правило Тинеманна (Thienemann, 1918).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анистратенко В.В. Определитель гребнежаберных моллюсков (Gastropoda Pectinibranchia) фауны Украины. Часть 1. Морские и солоноватоводные / В.В. Анистратенко // Вестн. зоологии. 1998. Отд. выпуск (Supplement) N. 8. С. 3–65.
2. Анистратенко О.Ю. Новые данные о фауне брюхоногих моллюсков Молочного лимана и прилегающей части Азовского моря / О.Ю. Анистратенко., Д.П. Литвиненко., В.В. Анистратенко // Экология моря. 2000. Вып. 50. С. 45–48.
3. Анистратенко В.В., Халиман И.А., Анистратенко О.Ю. Моллюски Утлюкского лимана (Азовское море): обзор видового состава с замечаниями по распространению и экологии // Зоологический журнал. 2017. Т. 96. Вып. 2. С. 144–152.
4. Булышева Н.И. Чужеродные виды зообентоса в экосистемах Нижнего Дона и Азовского моря на рубеже XX–XXI вв / Н.И. Булышева В.Л. Семин, И.В. Шохин [и др.] // Труды Южного научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 8. С. 256–273.

5. Воробьев В.П. Бентос Азовского моря // Тр. Аз.-Черн. НИИ морск, рыбн. хоз ва и океанографии. 1949. Вып. 13. С. 1–193.
6. Голиков А.Н. Класс брюхоногие моллюски -Дятлов В.Н. Зообентос псевдолиторали и верхней сублиторали украинских побережий Азовского моря: Дисс. ... канд. биол. наук: 105 / Одесса, 1968. 222 с.
7. Милашевич К.О. Моллюски Черного и Азовского морей / К.О. Милашевич // Фауна России и сопредельных стран. Моллюски русских морей. М., 1916. Т. 1. 312 с.
8. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Каспийская фауна в Азово-Черноморском бассейне/ Ф.Д. Мордухай-Болтовской М. Л.: Изд-во АН СССР. 1960. 286 с.
9. Набоженко М.В. Двустворчатые моллюски (Molluska, Bivalvia) Таганрогского залива. Материалы XXII конф. Мол. ученых Мурман. мор. биол. ин-та (г. Мурманск, апр. 2004). Мурманск. Изд-во Мурман. мор. биол. ин-та КНЦ РАН, 2004. С 69–74.
10. Савикин А.И. Новые данные о распространении *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 в Таганрогском заливе Азовского моря // Наука России, 2020, Т. 16, №4, С. 84–87.
11. Солдатов А.А., Ревков Н.К., Петросян В.Г. Моллюски. *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) // Сами опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Под ред. В.Г. Дзедуадзе, В.Г. Петросяна, Л.А. Ляпина. М.:Издательство Научный журнал КМК, 2018. С. 260–266.
12. Халиман И.А. Новые находки редких и малоизвестных брюхоногих моллюсков в Азовском море / И.А. Халиман // Вестн. зоологии. 2001. Т. 35. N. 3. С. 78.

© Халиман Игорь Алексеевич (iakhalii@mail.ru); Сидоряк Наталья Георгиевна (sydoryakn@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОДЫ РОДНИКОВ ГОРОДА БИРСК РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

PHYSICAL AND CHEMICAL ANALYSIS OF WATER SPRINGS OF THE CITY OF BIRSK, REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

**N. Shakhriнова
E. Yapparova
T. Ryabova**

Summary. The purpose of this study is to monitor the quality of water from springs in the city of Birsik in the Republic of Bashkortostan. The project is aimed at assessing and monitoring the ecological condition of springs and preventing groundwater pollution. They are susceptible to contamination through soil layers, precipitation, and vehicle emissions. The project will help identify the causes of pollution and propose measures to prevent dangerous consequences for the population. A spring or spring refers to a small stream of water flowing directly from the bowels of the earth. Springs, as outlets of groundwater and underground water to the surface, are unique natural reservoirs. They are of great importance in feeding other surface water bodies, maintaining water balance and maintaining the stability of the surrounding biocenoses. They are fed by deeper aquifers, where pollutants from the surface practically do not penetrate. The city of Birsik is known in the Republic of Bashkortostan for its springs, which are additional sources of drinking water. At the moment, in terms of the number of springs in the city, it can be placed in first place among the cities of the republic. But there is a problem of anthropogenic impact on water sources.

Keywords: Birsik, spring, monitoring, Trushanka, Ilyinsky holy spring, Monastic key, Three Brothers.

Шахринова Надежда Викторовна

к.б.н., доцент, Бирский филиал
Уфимский университет науки и технологий
shahrinova1963@mail.ru

Яппарова Эльвира Нигматуллаевна

к.б.н., доцент, Бирский филиал
Уфимский университет науки и технологий
alvera03@mail.ru

Рябова Татьяна Геннадьевна

к.б.н., доцент, Бирский филиал
Уфимский университет науки и технологий
tgr22@rambler.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования является проведение мониторинга качества воды из родников города Бирск Республики Башкортостан. Проект направлен на оценку и контроль экологического состояния родников, и предотвращение загрязнения подземных вод. Они подвержены загрязнению через грунтовые слои, атмосферные осадки, выбросы автотранспорта. Проект поможет выявить причины загрязнения и предложить меры по предотвращению опасных последствий для населения. Родником, или ключом обозначается небольшой водный поток, бьющий непосредственно из земных недр. Родники, как выходы грунтовых и подземных вод на поверхность, являются уникальными естественными водоёмами. Они имеют большое значение в питании других поверхностных водоёмов, поддержании водного баланса и сохранении стабильности окружающих их биоценозов. Их питание осуществляется за счёт более глубоких водоносных слоёв, куда загрязняющие вещества с поверхности практически не проникают. Город Бирск известен в Республике Башкортостан своими родниками, которые являются дополнительными источниками питьевой воды. На данный момент по количеству родников на территории города, его можно поставить на первое место среди городов республики. Но, существует проблема антропогенного воздействия на водные источники.

Ключевые слова: Бирск, родник, мониторинг, Трушанка, Ильинский святой источник, Монашій ключ, Три Брата.

Введение

Родником, или ключом обозначается небольшой водный поток, бьющий непосредственно из земных недр. Родники, как выходы грунтовых и подземных вод на поверхность, являются уникальными естественными водоёмами. Они имеют большое значение в питании и других поверхностных водоёмов, поддержании водного баланса и сохранении стабильности окружающих их биоценозов. Некоторые российские реки и водоёмы порождаются именно такими подземными источниками. Их питание осуществляется за счёт более глубоких водоносных слоёв (свыше 10–20 м), куда загрязняющие

вещества с поверхности практически не проникают. По гидрохимическим особенностям воды родников можно судить о состоянии подземных вод в данном регионе. Родниковая вода берется в том самом месте, откуда она поступает из-под земли [1,2].

Некоторые родники представляют собой уникальные природные объекты, имеющие значительную научную ценность как памятники природы. Они являются центральным компонентом окружающих их ландшафтов, повышают их эстетические свойства. Родники являются стратегическими объектами природы. При возникновении чрезвычайной ситуации они могут выступать как единственные источники питьевой воды для населения.

С родниками связаны многие легенды и обычаи местного населения. Воду некоторых родников местное население считает святой, целебной, используемой при лечении различных заболеваний. На некоторых родниках сооружены часовни, которые представляют собой историческую и культурную ценность.

Город Бирск расположен в Республике Башкортостан в 100 километрах от её столицы города Уфы и является административным центром Бирского района. Он является важной транспортной артерией между Уфой и промышленными центрами, такими как город Нефтекамск. Также через него проходят важные автомобильные магистрали: Уфа-Пермь и Уфа-Челябинск.

Бирск находится на правом берегу главной реки Башкортостана реки Белой, в 10 километрах от впадения реки Бирь, в честь которой он был назван.

Бирский район находится на территории Предуралья, прилегающей к Южному Уралу, в низовье реки Белой. Площадь 1 717 км². Район расположен в пределах Прибельской увалисто-волнистой равнины, в зоне Северной лесостепи, в самом теплом, незначительно засушливом агроклиматическом регионе Башкирии. Правобережье реки Белой в границах Бирского района — составная часть Бирской лесостепи, которая характеризуется значительной (25–27 %) облесенностью территории и распространением серых лесных почв. По вершинам водоразделов, по балкам и карстовым воронкам растут дуб, липа, клён, орешник, вяз. На левобережье остепенность гораздо выше, а почвенный покров состоит из выщелоченных черноземов. Долина реки Белой отличается от примыкающих к ней лесостепей комплексом своеобразных условий. Правый берег долины высокий, обрывистый с глубокими оврагами, левый — полого-низменный. Пойма занята обширными лугами, зарослями кустарников, а на более возвышенных частях — лесами. Много озёр- стариц и болот [3].

Бирск, вследствие своего месторасположения, является удобным для развития речного судоходства. Благодаря тому, что он расположен на высоком берегу реки Белой, на его территории образовалась извилина, где была построена речная пристань, вторая по размеру после Уфимского речного порта. Эта удобная магистраль Бельской водной магистрали. Благодаря этому Бирск стал удобным речным транспортным узлом, через который доставлялись нефтепродукты, стройматериалы и другие источники, необходимые для функционирования и развития промышленно развитого Башкортостана. Также благодаря удобной пристани был налажено регулярное сообщение между Бирском и Уфой, по которому ходило большое количество пассажирских теплоходов, на которых туристы могли в полной мере насладиться красотами центрального Башкортостана.

При мониторинге природных источников оцениваются гидрохимические показатели качества родниковой воды. Самыми известными родниками, которые были исследованы авторами, являются: Соляный ключ, Трушанка, Монашій ключ, родник — Три Брата, Ильинский святой источник. Данные родники активно используются местными жителями в качестве питьевых источников [3,4].

Минеральный источник Соляный ключ или как называют его местные жители Солянка, находится на небольшом расстоянии от реки Белой. Данный источник является особенным, поскольку вода в нем соленая и прозрачная, а на берегу небольшого водоема, который образовался при его выходе, произрастают уникальные виды растений, занесенные в Красную книгу Республики Башкортостан.

Трушанка располагается в центре города Бирск. Существует легенда о том, что в далеком прошлом на месте родника существовало Кунгурское море.

Монашій ключ находится в небольшом отдалении от жилых построек и располагается на краю обширного лесного массива, называемого местными жителями «Орешник».

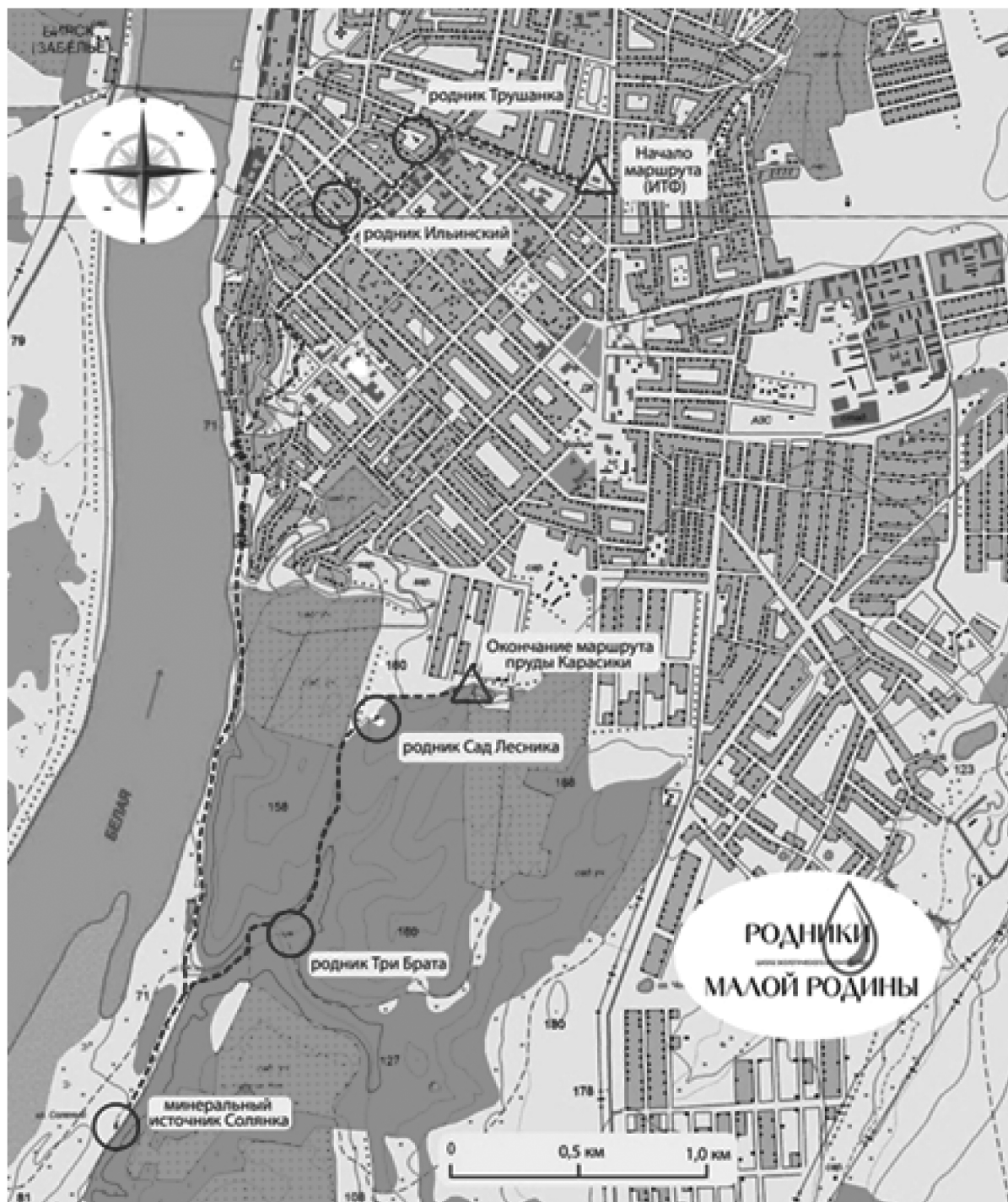
Три Брата — уникальный комплекс из трех родников, который находится на склоне леса, который в прошлом веке снабжал водой весь город.

Ильинский святой источник находится также в центре города, на небольшом удалении от родника Трушанка и является очень важной христианской святыней, на территории которого когда-то стояла часовня пророка Ильи, в честь которой родник и получил своё название. Ежегодно он освящается на праздник Ильин день. Исследуемые родники находятся в черте г. Бирск (см. рисунок 1).

Целью исследования является оценка и анализ состояния водных источников, гидрохимическими методами, а также сравнение результатов, полученных за период исследования с 2022 по 2024 годы включительно.

Материал и методы исследования

В работе использованы разные методы исследования. Одним из методов, является метод ионной хроматографии. Основным оборудованием послужил ионный хроматограф «Stayer» с термостатом колонок TS10, кондуктометрическим детектором и программно-аппаратным комплексом «МултиХром». Согласно методике, в пробах воды определяли содержание различных ионов. Метод анализа водных источников использовали для характеристики экологического состояния родников [4]. В статье проанализированы научные сведения из открытых публикаций, а также используется материал, исследованный и дополненный во время проведе-



Источник: Составлено автором

Рис. 1. Карта-схема расположения родников города Бирск (масштаб 1:50000)

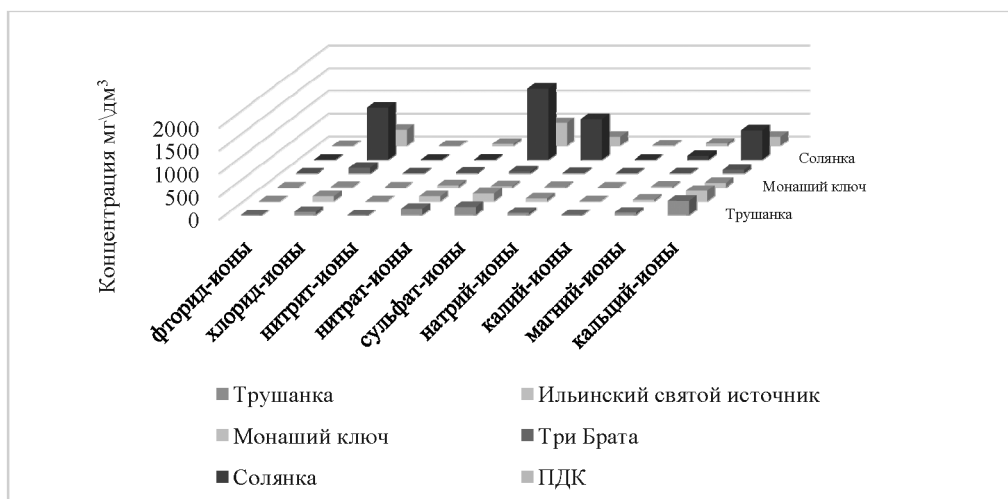
ния учебных практик при Бирском филиале Уфимского университета науки и технологии, и результаты, полученные в ходе реализации проекта Экологический марафон «Время Перемен».

Результаты исследования и их обсуждение

Пробоотбор воды был произведен 14 мая 2024 года на вышеуказанных родниках города Бирск в соответ-

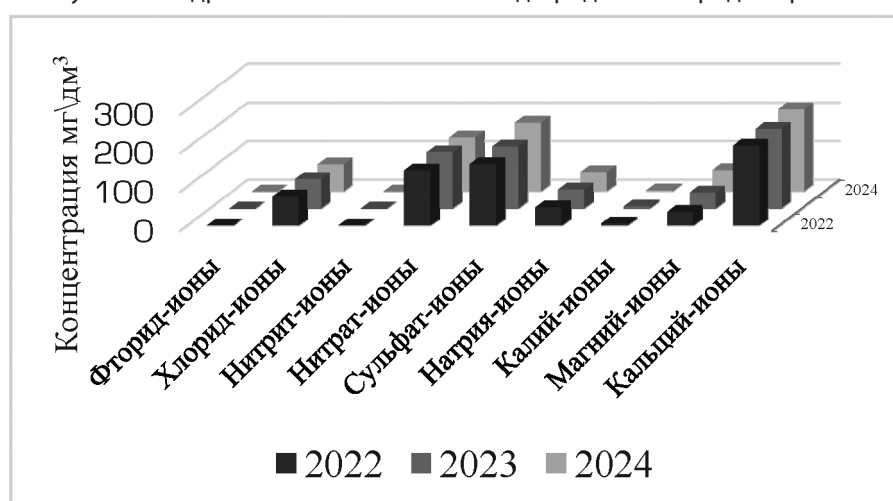
ствии с требованиями ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб» [6,7].

Отбор и анализ проб воды проводились в соответствии с действующей нормативной документацией при участии специалистов аккредитованной лаборатории экологического мониторинга физико-химических загрязнений окружающей среды при Бирском филиале УУНиТ.



Источник: Составлено автором

Рис. 2. Результаты гидрохимического анализа воды родников города Бирск за 2024 год



Источник: Составлено автором

Рис. 3. Изменение состава родника Трушанка

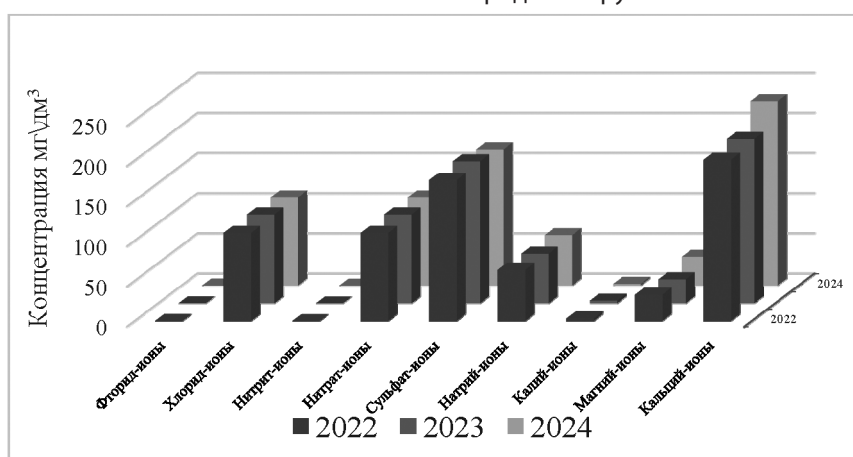


Рис. 4. Изменение состава родника Ильинский святой источник

Гидрохимический анализ воды исследуемых родников проводился на определение концентраций 9 ионов: фторид-ионов, хлорид-ионов, нитрит-ионов, нитрат-ионов, сульфат-ионов, натрий-ионов, калий-ионов, магний-ионов и кальций-ионов (см. рисунок 2).

Гидрохимический анализ качества воды родников показал, что по фторид-ионам, нитрит-ионам и калий-ионам превышений предельно допустимых концентраций нет ни на одном из родников. Предельно допустимые концентрации были превышены по хлорид-ионам на роднике Соляный ключ, по нитрат-ионам на роднике Трушанка, Монаший ключ и Ильинском святом источнике. По сульфат-ионам и натрий-ионам превышения предельно допустимых концентраций наблюдаются на роднике Соляный ключ, по магний-ионам и кальций-ионам на родниках Трушанка и Соляный ключ.

Таким образом, родник Соляный ключ является самым засоленным родником, о чем говорит его название. Вода принадлежит к хлоридно-сульфатно-натриево-кальциевому типу с минерализацией 5,85 г/л. В ключе выявлены свободная углекислота, сероводород, окись

кремния, и другие вещества характерные для родников с повышенным содержанием солей. В прибрежной зоне родника нами были выявлены белые налеты, которые оказались отложениями хлорида натрия (поваренной соли).

Родники Трушанка и Ильинский святой источник располагаются в непосредственной близости от жилой застройки, поэтому находятся под сильным антропогенным воздействием, о чем свидетельствует превышение ПДК по нитрат-ионам, магний-ионам и кальций-ионам.

Монаший ключ и Три Брата располагаются вдалеке от домов и дорог, поэтому вода мягкая и ПДК не превышено ни по одному показателю.

Результаты гидрохимического анализа воды 5 родников г. Бирска за 2024 год сравнили с результатами, полученными за период с 2022 по 2023 год включительно (см. рис. 3, 4, 5, 6, 7).

Таким образом, на исследуемых родниках Трушанка и Ильинский святой источник состав воды практически

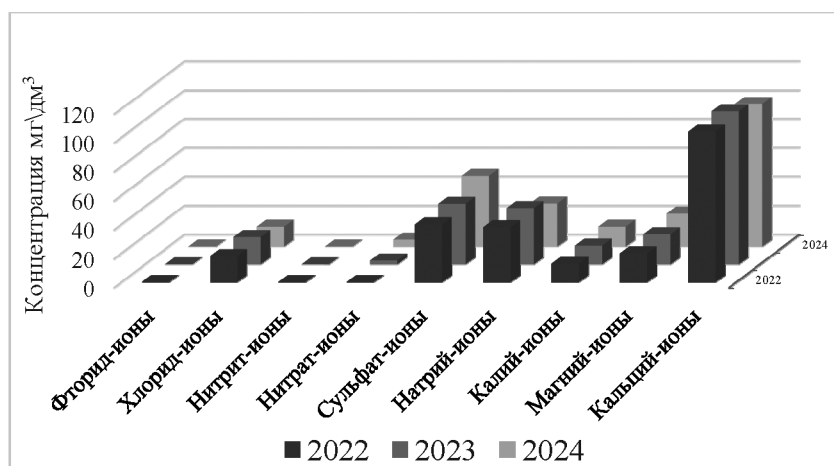


Рис. 5. Изменение состава родника Монаший ключ

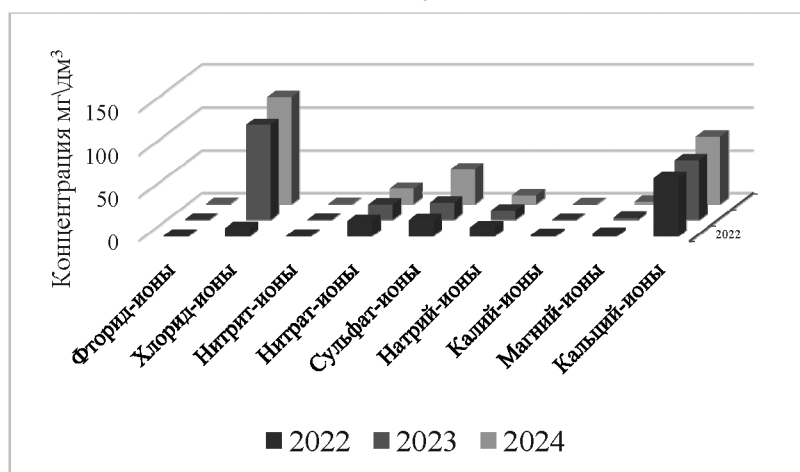


Рис. 6. Изменение состава родника Три Брата

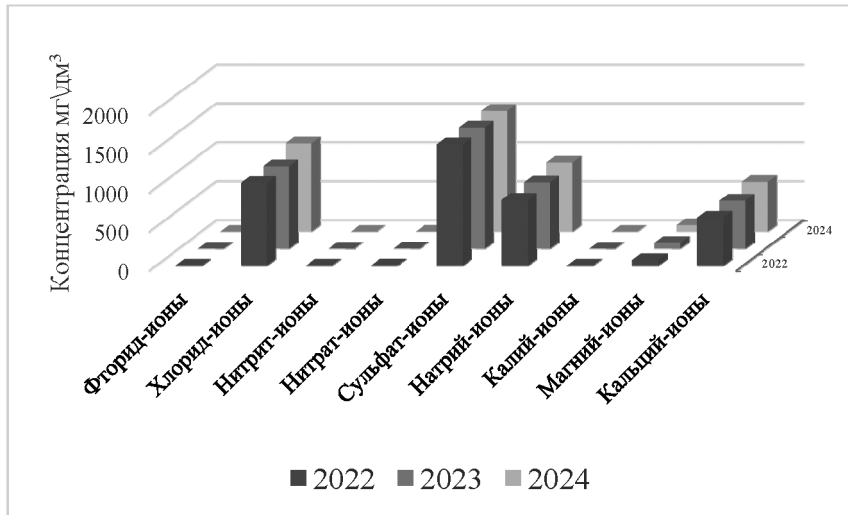


Рис. 7. Изменение состава родника Соляный ключ

не изменился, на роднике Солянка наблюдается повышение хлорид-ионов, натрий-ионов и кальций-ионов, на роднике Монаший ключ повышение концентраций нитрат-ионов, калий-ионов и магний-ионов, на роднике — Три Брата хлорид-ионов, сульфат-ионов и кальций-ионов.

Заключение

Родником, или ключом обозначается небольшой водный поток, бьющий непосредственно из земных недр. Город Бирск уникален количеством родников, находящихся на его территории, которые формируют уникальный местный ландшафт, где произрастает большое разнообразие видов растений, что является перспективной площадкой для развития туризма в городе.

Родник Соляный ключ имеет высокую концентрацию ионов кальция и натрия, а также хлорид-ионов, благо-

даря этому вода родника имеет уникальные целебные свойства. Минеральный источник Соляный ключ является достопримечательностью города Бирска и Бирского района, так как он является памятником природы и занесен в реестр особо охраняемых природных территорий Республики Башкортостан.

Однако на эти родники оказывается антропогенное воздействие, особенно на родники Трушанка и Ильинский святой источник, которые находятся практически в центре города. В результате проведенных анализов установлены превышения концентраций некоторых веществ в воде родников, данное превышение может вызвать у человека нежелательные последствия в организме. Для предотвращения губительных последствий рекомендуется данную воду подвергнуть термической обработке для снижения концентрации до значений, при которых они не будут оказывать нежелательных последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буймова С.А., Бубнов А.Г., Каленова А.А., Малова Ю.А., Колотилова А.А., Лузева Ю.С. Проблемы безопасности родниковых вод и оценка воздействия уровня загрязнения на объекты биосферы/ С.А. Буймова, А.Г. Бубнов, А.А. Каленова, Ю.А. Малова, А.А. Колотилова, Ю.С. Лузева // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. — 2021. — № 1 (1). — С. 11–18.
2. Альмитова Л.И., Макаева В.И., Макаева А.Р. Результаты исследований качества родниковых вод Республики Татарстан/ Л.И. Альмитова, В.И. Макаева, А.Р. Макаева //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2021. — № 5. — С. 75–83.
3. Злыгостев П.С. Экологическая деятельность по защите и обустройству родников на урбанизированных территориях/ П.С. Злыгостев //Вестник магистратуры. — 2024. — № 5-5. — С. 37–39.
4. Злыгостев П.С. Школа экологического волонтерства «Родники малой родины»: выпускная квалификационная работа по специальности 05.03.06 «Экология и природопользование», профиль «Природопользование» /П.С. Злыгостев; Башкирский государственный университет, Бирский филиал; науч. рук. Н.В. Шахинова. Бирск. — 2022. — 43 с.
5. Шабалин В.В., Рогожина Т.С. Определение компонентов, растворенных органических и неорганических веществ в природных водах / В.В. Шабалин, Т.С. Рогожина //Вода и экология: проблемы и решения. — 2021. — № 1(85). — С. 61–70.
6. «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.12.2023).
7. «ГОСТ Р 59024-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Вода. Общие требования к отбору проб» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 10.09.2020 N 640-ст) (ред. от 02.09.2022).

© Шахинова Надежда Викторовна (shahrinova1963@mail.ru); Яппарова Эльвира Нигматуллаевна (alvera03@mail.ru);

Рябова Татьяна Геннадьевна (tgr22@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СТАТУСА НАСЕЛЕНИЯ МЕГАПОЛИСА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Швец Юрий Юрьевич

Старший научный сотрудник, кандидат экономических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РА. г. Москва
jurijswets@yahoo.com

ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL ASSESSMENT OF THE MICROELEMENT STATUS OF THE MEGAPOLIS POPULATION UNDER CONDITIONS OF TECHNOGENIC LOAD

Yu. Shvets

Summary. The study is devoted to a systematic analysis of the formation of the microelement status of the adult population of a large industrial metropolis under conditions of technogenic and socio-economic load. Based on a retrospective analysis of data from more than 20,000 residents of the Moscow region (2019–2022), a comprehensive assessment was conducted using blood serum and hair as substrates, employing AAS and ICP-MS methods.

A persistent deficiency of zinc and selenium was identified in 30–40 % of the population, indicating «hidden hunger.» A direct correlation was found between the growth of investment activity and the accumulation of copper, while an inverse correlation was observed with lead. Economic factors, especially inflation, negatively affect the sufficiency of zinc and iron.

It is concluded that the microelement profile is formed under the influence of «risk scissors»: the technogenic environment increases the level of urbanization markers, while economic constraints deplete the diet. The results justify the need for implementing a regional biomonitoring system for health risk management.

Keywords: human ecology, obesity, ecology, microelement status, heavy metals, zinc, selenium, technogenic load, biomonitoring.

Аннотация. Исследование посвящено системному анализу формирования микроэлементного статуса взрослого населения крупного промышленного мегаполиса в условиях техногенной и социально-экономической нагрузки. На основе ретроспективного анализа данных более 20000 жителей Московского региона (2019–2022 гг.) проведена комплексная оценка по сыворотке крови и волосам методами ААС и ИСП-МС.

У 30–40 % популяции выявлен устойчивый дефицит цинка и селена, указывающий на «скрытый голод». Обнаружена прямая корреляция между ростом инвестиционной активности и накоплением меди, а обратная — со свинцом. Экономические факторы, особенно инфляция, негативно влияют на обеспеченность цинком и железом.

Сделан вывод, что микроэлементный профиль формируется под воздействием «ножниц рисков»: техногенная среда повышает уровень урбанизационных маркеров, а экономические ограничения истощают рацион. Результаты обосновывают необходимость внедрения регионального биомониторинга для управления рисками здоровья.

Ключевые слова: экология человека, ожирение, экология, микроэлементный статус, тяжелые металлы, цинк, селен, техногенная нагрузка, биомониторинг.

Введение

Современная экологическая повестка все чаще рассматривает здоровье человека не изолированно, а как результат сложного взаимодействия с геохимической средой. В условиях урбанизированных территорий почвенный покров и водные ресурсы испытывают колоссальное давление, становясь аккумуляторами техногенных загрязнений. Как справедливо отмечают исследователи, формируется своего рода «экологическая воронка»: промышленные выбросы трансформируют элементный состав почв, что неизбежно сказывается на качестве трофических цепей и, в конечном итоге, на нутриентном статусе населения.

Представляется очевидным, что в крупных мегаполисах проблема приобретает двойственный характер. С одной стороны, мы наблюдаем феномен «скрытого голода» — парадоксального состояния, при котором на фоне достаточной калорийности рациона сохраняется хронический дефицит эссенциальных микроэлементов, таких как, например, цинк, селен или железо [12, 19].

С другой стороны, интенсивная антропогенная нагрузка повышает риски накопления токсичных металлов (кадмия, свинца, ртути), которые действуют как эндокринные дизрапторы и вмешиваются в фундаментальные метаболические процессы [7, 16].

Особую тревогу вызывает тот факт, что загрязнение окружающей среды нередко носит латентный характер.

В зонах интенсивной промышленной нагрузки и активных инвестиционных циклов формируются устойчивые геохимические аномалии. При этом существующие нормативы не всегда успевают реагировать на динамику загрязнения, а население продолжает испытывать воздействие так называемой «молчаливой метаболической нагрузки».

Следует отметить, что традиционные биомедицинские подходы часто игнорируют экологический контекст, фокусируясь лишь на клинических проявлениях. Однако анализ литературы показывает необходимость интеграции данных мониторинга среды и биомедицинской статистики [2, 18]. География проживания, качество воды и уровень техногенного прессинга становятся равнозначными участниками формирования здоровья, наравне с генетикой и образом жизни.

Цель исследования — провести эколого-физиологический анализ микроэлементного статуса взрослого населения Московской области за период 2019–2022 гг., выявив характерные дисбалансы эссенциальных и токсичных элементов в контексте социально-экологических факторов среды.

Материалы и методы исследования

В основу работы положен ретроспективный наблюдательный дизайн с элементами панельного анализа. Такой подход позволил использовать обширный массив накопленных данных без прямого вмешательства в клинические процессы, что соответствует современным стандартам эпидемиологических исследований [17].

Исследование базируется на деперсонализированных данных лабораторных обследований жителей Московской области. Общий массив содержит данные более чем 20000 пациентов, период наблюдения охватывает 2019–2022 годы.

Для оценки элементного статуса использовались два биологических субстрата, отражающих разные временные горизонты экспозиции:

1. Сыворотка крови — маркер текущего функционального состояния и краткосрочного баланса элементов.
2. Волосы — биосубстрат, аккумулирующий информацию о долговременном накоплении веществ и позволяющий оценить хроническую нагрузку токсикантами [6, 18].

Определение концентраций проводилось методами атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Данные технологии признаны «золотым стандартом» для многокомпонентного анализа в клинической и экологической практике [19].

В работе анализировались данные по 27 химическим элементам, включая эссенциальные (Zn, Fe, Se, Cu, Mn и др.) и токсичные (Pb, Cd, As, Ni). Для унификации результатов, полученных разными методами, применялась процедура нормирования относительно референсных лабораторных диапазонов. Это позволило перевести абсолютные концентрации в безразмерные индексы отклонения, где значения $|S| > 0,5$ интерпретировались как значимый выход за пределы нормы.

Для выявления взаимосвязей между уровнем микроэлементов и факторами внешней среды (индикаторами экономической активности, техногенной нагрузки) использовался корреляционный анализ по Спирмену. Данный метод выбран ввиду ненормального распределения большинства экологических переменных. В качестве маркеров состояния среды использовались официальные данные Росстата по региону: валовой региональный продукт (ВРП), объем инвестиций в основной капитал (как индикатор промышленной активности) и индекс потребительских цен [8].

Результаты

Первичный анализ полученных данных позволил выявить неоднородную картину. Если обеспеченность макроэлементами (натрием, калием, кальцием) в целом оставалась стабильной и соответствовала физиологическим нормам, то ситуация с микроэлементами оказалась тревожной. Мы обнаружили, что значительная часть взрослого населения мегаполиса находится в состоянии хронического микронутриентного дисбаланса.

Особенно показательно распределение отклонений по эссенциальным элементам. Данные свидетельствуют, что такие ключевые для иммунитета и антиоксидантной защиты металлы, как цинк и селен, находятся в дефиците у трети обследованных (Таблица 1).

Полученные нами цифры демонстрируют высокую сходимость с результатами других крупных популяционных исследований. В частности, В.М. Коденцова и соавт., анализируя витаминно-минеральный статус населения Центрального федерального округа, также фиксировали недостаточность эссенциальных элементов у 22–38 % взрослого трудоспособного населения [3]. Это позволяет утверждать, что выявленный нами дефицит является не локальной аномалией, а маркером системного неблагополучия.

Клиническая значимость этих отклонений крайне высока. Хронический дефицит цинка, зафиксированный у трети выборки, выступает доказанным фактором риска метаболических расстройств: он нарушает синтез и секрецию инсулина, способствуя развитию инсулинорезистентности [4, 21]. Ситуация усугубляется на фоне не-

Таблица 1.
Характеристика обеспеченности населения
ключевыми микроэлементами
(по материалам выборки 2019–2022 гг.)

Группа элементов	Элемент	Преобладающий статус	Характеристика отклонения в выборке
Критические эссенциальные	Цинк (Zn)	Дефицит	Отклонение к нижней границе нормы или явный дефицит фиксируется у 35–40 % пациентов.
	Селен (Se)	Дефицит	Недостаточность выявлена более чем у 30 % обследованных.
Пограничные состояния	Железо (Fe)	Нижняя граница	Около 15–20 % выборки имеют показатели на пределе нормы.
	Медь (Cu)	Нижняя граница	Тенденция к снижению, особенно выраженная в 2021–2022 гг.
Токсичные (маркеры среды)	Свинец (Pb)	Накопление	Выявляются субклинические уровни накопления, коррелирующие с техногенной нагрузкой.
	Кадмий (Cd)	Накопление	Периодические всплески концентраций.

Примечание: Составлено авторами по результатам лабораторного скрининга.

достатка селена, который критически ослабляет систему антиоксидантной защиты (снижение активности глутатионпероксидазы) и повышает уязвимость организма к вирусным инфекциям и окислительному стрессу [1, 17].

Особую обеспокоенность вызывает статус селена в контексте среды. Наши данные коррелируют с выводами межгосударственных программ по биогеохимии, в которых В.В. Ермаков указывает на прогрессирующее обеднение почв селеном в агробиоценозах [11]. Что касается пограничных состояний по железу и меди, то они формируют скрытую угрозу адаптационному потенциалу. Даже без клинической картины анемии, снижение тканевых запасов железа приводит к митохондриальной дисфункции и хронической утомляемости, а дефицит меди нарушает процессы кроветворения и синтеза соединительной ткани [10].

Возникает закономерный вопрос о драйверах этих изменений. Чтобы оценить вклад среды, мы сопоставили данные биомониторинга с макроэкономическими показателями развития региона — в частности, с динамикой инвестиций в основной капитал. Инвестиции в мегаполисе выступают маркером интенсивности строительства

и промышленной активности, то есть косвенным индикатором техногенного давления.

Результаты корреляционного анализа (Рисунок 1) выявили четкую закономерность. Данные тепловой карты позволяют сделать вывод, что экономический рост сопровождается качественным изменением профиля техногенной нагрузки.

Мы наблюдаем максимально сильную положительную корреляцию ($r=1,0$) между объемом инвестиций и уровнем накопления меди (Cu), молибдена (Mo) и вольфрама (W). Этот комплекс элементов является характерным маркером современной урбанизированной среды: медь ассоциирована с интенсивным трафиком, а молибден и вольфрам — с промышленными и строительными технологиями. Рост инвестиций, отражающий активизацию строительства и транспортных потоков, закономерно приводит к увеличению экспозиции населения именно к этим металлам.

В то же время для целой группы элементов, включая свинец (Pb), марганец (Mn) и железо (Fe), зафиксирована сильная обратная корреляция ($r=-1,0$). Снижение уровня свинца на фоне роста инвестиций может свидетельствовать о положительном эффекте модернизации инфраструктуры: новые проекты способствуют замене устаревших технологий и снижению активности «устаревших» источников загрязнения.

При этом зарубежные исследователи (С. Huang et al.) отмечают, что подобная смена элементного профиля несет свои риски. Воздействие накапливающихся токсичных металлов (в нашем случае — W, Mo) может усиливаться на фоне дефицита эссенциальных протекторов [15].

Обсуждение

Полученные данные о широкой распространенности дисбаланса цинка и селена находят подтверждение в работах, посвященных биомониторингу населения Центральной России. В частности, исследования В.М. Коденцовой и соавт. свидетельствуют, что полигиповитаминозы и недостаточность эссенциальных элементов — это системная проблема для всего Центрального федерального округа, где частота дефицитных состояний достигает 38 % [3]. Природу этого явления целесообразно рассматривать через призму биогеохимии. Как отмечается в работах В.В. Ермакова, в агробиоценозах наблюдается прогрессирующее обеднение почв подвижными формами селена [11]. Это создает первичный экологический дефицит в трофической цепи «почва — растение — продукт питания», который невозможно компенсировать без специализированных агротехнических или диетологических интервенций.

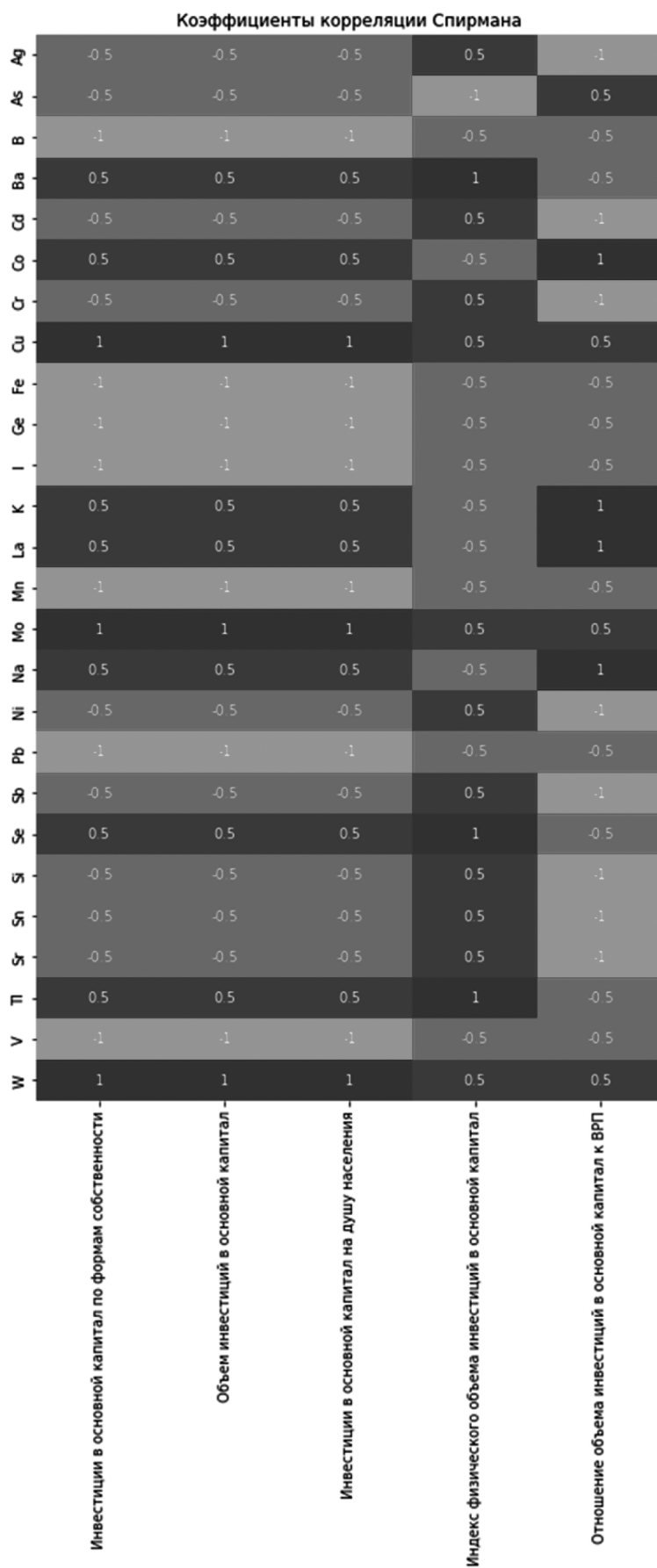


Рис. 1. Корреляционная взаимосвязь между показателями инвестиционной активности и накоплением химических элементов

Особое внимание следует уделить интерпретации техногенного влияния. Зафиксированная нами связь инвестиционной активности с накоплением специфических металлов согласуется с данными А.В. Скального и соавт., доказавших высокую информативность волос как индикатора географической вариативности загрязнения в промышленных регионах [18]. Однако главная угроза кроется не столько в самом наличии токсикантов, сколько в их сочетании с микронутриентной недостаточностью. Зарубежные исследования (С. Huang et al.) указывают на синергический эффект: токсичность свинца и других техногенных металлов многократно возрастает на фоне дефицита протекторов — цинка и железа. Таким образом, наблюдаемая нами картина (рост Cu/W/Mo при низком Zn/Se) формирует профиль повышенного метаболического риска.

Экономическая детерминанта этого процесса (отрицательная связь инфляции и обеспеченности нутриентами) укладывается в концепцию «городского недоедания», описанную экспертами FAO [12]. Несмотря

на сравнительно высокие доходы населения мегаполиса, структура потребления смещается в сторону рафинированных продуктов с низкой биологической ценностью, что и провоцирует феномен «скрытого голода» даже при избыточной калорийности рациона [20].

Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать, что микроэлементный профиль жителя современного мегаполиса формируется под перекрестным воздействием экологической нагрузки и экономических ограничений. Доказано, что интенсификация урбанистических процессов сопряжена не только с трансформацией внешней среды, но и с качественным изменением элементного статуса населения: происходит накопление специфических техногенных маркеров на фоне критического снижения обеспеченности эссенциальными протекторами. Таким образом, биосубстраты человека выступают чувствительным индикатором как индустриальных циклов, так и социально-экономической конъюнктуры региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батырова Г., Тлегунова Ж., Умарова Г. и др. Микроэлементный статус взрослого населения Западного Казахстана // Экология человека. 2021. Т. 28. № 11. С. 42–49.
2. Горбунов А.В., Ушакова Е.Н. Микроэлементы в водах и волосах жителей различных регионов России // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 12. С. 1356–1362.
3. Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В., Никитюк Д.Б. Микронутриентный статус населения Российской Федерации и возможность его коррекции. Состояние проблемы // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 4. С. 113–124.
4. Лавренова Е.А., Драпкина О.М. Роль цинка в развитии инсулинорезистентности и сахарного диабета 2 типа // Эндокринология: новости, мнения, обучение. 2020. Т. 9. № 2. С. 64–71.
5. Омарова С.О., Абдуллаева Н.М., Магомедова М.А. Влияние дисбаланса микроэлементов в питьевой воде на заболеваемость населения (на примере Республики Дагестан) // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. № 1. С. 145–153.
6. Скальный А.В. Микроэлементы: бодрость, здоровье, долголетие. М.: Эксмо, 2018. 304 с.
7. Ульзетуева И.Д., Намжилова А.Ю. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова и здоровья населения в зоне влияния Гусиноозерского промышленного узла // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 4. С. 45–54.
8. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Валовой региональный продукт. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 21.11.2025).
9. Balk E.M., Tatsioni A., Lichtenstein A.H. et al. Effect of chromium supplementation on glucose metabolism and lipids: a systematic review of randomized controlled trials // Diabetes Care. 2007. Vol. 30. № 8. P. 2154–2163.
10. Cepeda-Lopez A.C., Melse-Boonstra A., Zimmermann M.B. et al. In overweight and obese women, dietary iron absorption is reduced and the enhancement of iron absorption by ascorbic acid is one-half that in normal-weight women // American Journal of Clinical Nutrition. 2015. Vol. 102. № 6. P. 1389–1397.
11. Ermakov V.V., Jovanovic L. Selenium deficiency as a consequence of human activity and its correction // Journal of Geochemical Exploration. 2010. Vol. 107. № 2. P. 193–199.
12. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome: FAO, 2020.
13. Geisler C.E., Ghimire S., Hepler C. et al. Copper accumulation in the liver correlates with steatosis and fibrosis // Nutrients. 2021. Vol. 13. № 5. P. 1517.
14. Guerrero-Romero F., Rodríguez-Morán M. Magnesium improves the beta-cell function to compensate variation of insulin sensitivity: double-blind, randomized clinical trial // European Journal of Clinical Investigation. 2011. Vol. 41. № 4. P. 405–410.
15. Huang C., Gao E., Xiao F. et al. The relative and interactive effects of urinary multiple metals exposure on hyperuricemia among urban elderly in China // Frontiers in Public Health. 2023. Vol. 11. Article 1015202.
16. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 p.
17. Rocourt C.R., Cheng W.H. Selenium supranutrition: are the potential benefits of chemoprevention outweighed by the acute risk of type 2 diabetes? // Nutrients. 2013. Vol. 5. № 4. P. 1349–1365.
18. Skalny A., Burtseva T.I., Salnikova E.V., Ajsuvakova O.P. Geographic variation of environmental, food, and human hair selenium content in an industrial region of Russia // Environmental Research. 2019. Vol. 171. P. 293–301.
19. Stevens G.A., Beal T., Mbuya M.N. et al. Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide // The Lancet Global Health. 2022. Vol. 10. № 11. e1590–e1599.
20. Tunakova Y.A., Galimova A.R., Valiev V.S. Assessment of the impact of the elemental composition of drinking water on the health of the population // Journal of Water Chemistry and Technology. 2021. Vol. 43. № 3. P. 298–307.
21. Yariybegi H., Sathyapalan T., Atkin S.L., Sahebkar A. Molecular mechanisms linking Zn deficiency to insulin resistance // Journal of Diabetes Research. 2019. Vol. 2019. Article 8681763.

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Андреев Артем Александрович

Ведущий специалист, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС), г. Москва
artem2033andreev@yandex.ru

HYBRID MODEL FOR STORING AND PROCESSING TEMPORAL DATA IN DIGITAL TWIN SYSTEMS OF INDUSTRIAL OBJECTS

A. Andreev

Summary. The article examines modern approaches to storing and processing temporal data in digital twin systems for industrial objects. The increasing volume of data generated by intelligent sensors and monitoring systems, as well as the widespread adoption of digital twin technologies, necessitates the development of efficient architectures for managing both historical and streaming data. The study analyzes levels of data temporality, their impact on database structures and computational performance, and the major limitations of traditional relational models under rapidly growing data loads.

Based on an analysis of scientific publications and practical solutions, two promising approaches to temporal data organization are identified: a multidimensional MIVAR information space and the architecture of digital data factories. A comparative evaluation of these approaches is conducted, and a hybrid model combining the strengths of both directions is proposed, taking into account their respective advantages and constraints.

Keywords: digital twin; temporal data; data storage; stream processing; digital data factory; multidimensional models; MIVAR model; Big Data.

Аннотация. Статья посвящена анализу современных подходов к хранению и обработке темпоральных данных в системах цифровых двойников промышленных объектов. Рост объемов данных, генерируемых интеллектуальными датчиками и системами мониторинга, а также широкое распространение технологий цифровых двойников обуславливают необходимость разработки эффективных архитектур управления историческими и потоковыми данными. В работе рассматриваются уровни темпоральности данных, их влияние на структуру баз данных и производительность вычислительных систем, а также основные ограничения традиционных реляционных моделей в условиях быстрорастущих нагрузок.

На основе анализа научных публикаций и практических решений выделены два перспективных подхода к организации темпорального хранения: многомерное миварное информационное пространство и архитектура цифровых фабрик данных. Проведен сравнительный анализ указанных подходов и на основании выявленных преимуществ и ограничений предложена гибридная модель, объединяющая сильные стороны обоих направлений.

Ключевые слова: цифровой двойник; темпоральные данные; хранение данных; потоковая обработка; цифровая фабрика данных; многомерные модели; миварная модель; Big Data.

В последние годы технология цифровых двойников демонстрирует устойчивый рост популярности. Ее внедрение и использование можно заметить во всех отраслях экономики: в промышленности, энергетике, нефтегазовом комплексе, транспорте, строительстве и ряде других отраслей. Наибольшее распространение данная технология получила в сфере промышленного производства благодаря тому, что она позволяет получить значимый экономический эффект в относительно короткие сроки. Там с помощью цифровых двойников моделируют производственные линии, оборудование и целые заводы, анализируют и оптимизируют технологические процессы. Используя данные с датчиков IoT (Internet of Things), такие системы также прогнозируют износ оборудования, предотвращают неполадки и снижают затраты на обслуживание за счёт уменьшения времени простоя. Кроме того, они позволяют проводить анализ сценариев «что-если», выполнять прогнозные

расчёты, выбирать оптимальные режимы работы и оценивать ожидаемый экономический эффект. В целом цифровые двойники становятся важным инструментом поддержки принятия решений и повышения эффективности эксплуатации сложных технических объектов.

Впервые концепцию цифровых двойников сформулировал М. Гривс. Он дал им такое определение: набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический реальный произведенный продукт от микроскопического уровня до геометрического макроскопического уровня [9]. В контексте обсуждения промышленных объектов это означает создание точной динамической цифровой копии реального производственного объекта, от отдельного станка то целого предприятия.

Основой работы любого цифрового двойника являются данные. Для того чтобы цифровой двойник мог опе-

ративно и достоверно отображать текущее состояние физического объекта, необходима установка датчиков и организация непрерывного сбора информации. Цифровым двойникам необходимо непрерывно получать данные, корректировать математическую модель объекта, уточнять параметры его поведения и, при необходимости, воздействовать на физический объект, опираясь на результаты обработки поступающей информации. Источниками данных могут выступать датчики различных типов, устройства идентификации (штрих-коды, QR-коды), видеокамеры и другие средства фиксации параметров. Таким образом, данные являются фундаментом функционирования цифровых двойников, так как от их полноты и качества зависят границы возможностей моделирования и качество принимаемых решений.

При этом рост объёмов данных приводит к появлению новых технологических вызовов. Так, использование популярной в последнее время технологии Big Data влечет за собой ряд проблем: наличие шумов, неполнота измерений и трудности при прогнозировании редких событий. На практике значительная часть собираемой информации может оказаться избыточной: при накоплении ежедневных массивов данных до 95 % из них не несут существенной ценности, что усложняет выделение информативных признаков и повышает трудоёмкость анализа. Разработчики, ориентирующиеся на сбор максимально полного объёма данных в надежде выявить скрытые зависимости, сталкиваются с тем, что поиск действительно значимых корреляций оказывается значительно более ресурсоёмким, чем предполагалось [2].

Эта проблема особенно актуальна в проектах, где объём ежедневно поступающих данных превышает возможности аналитической обработки. В подобных ситуациях ключевую роль начинают играть физические модели, позволяющие определить, какие параметры необходимо фиксировать, в каких областях могут проявляться критические состояния и как следует выстраивать мониторинг на разных стадиях жизненного цикла изделия. При этом важно учитывать, что объём доступных данных напрямую зависит от этапа разработки. На начальных стадиях («концепция», «прототип») информация об объекте может полностью отсутствовать, а модели строятся главным образом на основе физического моделирования. В процессе эксплуатации объём доступных данных естественным образом увеличивается.

В этой связи важным понятием становится Smart Big Data (содержательные большие данные) — данные, обладающие высоким уровнем информационной насыщенности, полученные на основе четкого представления о расположении критических зон в конструкции, в которых имеет смысл размещать датчики [2]. Сбор всех возможных данных без предварительного отбора приводит к формированию объёмных массивов Big Data,

значительная часть которых состоит из малозначимой информации, что приводит к резкому росту нагрузки на системы хранения и аналитической обработки.

Следовательно, для эффективной работы с данными необходима комплексная инфраструктура, обеспечивающая весь жизненный цикл данных: сбор, фильтрацию, безопасную передачу, контроль качества, классификацию, устранение дубликатов, надёжное хранение, извлечение, последующую обработку, анализ и визуализацию. Реализация этих процессов обеспечивается широким спектром инструментов и программных решений, которые условно могут быть сгруппированы в четыре основных этапа: сбор данных, управление данными, хранение данных и использование данных.

В традиционных моделях данных, используемых в классических системах управления базами данных (СУБД), фиксируется только актуальное состояние объектов предметной области. При внесении изменений старые значения перезаписываются новыми, вследствие чего сведения о предыдущих состояниях объекта не сохраняются. Однако во многих приложениях, связанных с мониторингом и аналитикой, чем и занимаются цифровые двойники, возникает необходимость хранить не только актуальные, но и прошлые, а в некоторых случаях и будущие (плановые) значения. Цифровые двойники опираются преимущественно на темпоральные данные — произвольные данные, которые связаны с определёнными датами или промежутками времени [3]. То есть это данные, привязанные к моментам времени или временным интервалам, что требует особых инструментов для их хранения и анализа. В разработку методов хранения и обработки темпоральных данных внесли вклад учёные, такие как Р. Снодграс, К. Дженсен, С. Гадия, Е. МакКензи, А. Стейнер.

Темпоральные данные представляют собой значения параметров, соотнесённые с конкретными моментами времени или временными промежутками. Использование подобных моделей позволяет фиксировать изменения объектов во времени: если объект появляется в момент t_1 и перестаёт существовать в момент t_2 , то темпоральная база данных содержит последовательность его состояний на всём интервале $[t_1, t_2]$. При этом объём данных напрямую зависит от выбранного уровня темпоральности и частоты обновления параметров.

Принято выделять следующие несколько уровней темпоральности [3]:

- Темпоральность на уровне базы данных предполагает добавление временной информации ко всей структуре данных и сохранение периодических снимков состояния БД. Такой подход обеспечивает полную временную историю, однако приводит к значительной избыточности, поскольку

соседние состояния зачастую отличаются минимально.

- Темпоральность на уровне отношения означает, что каждая таблица имеет собственную временную ось и хранится в виде последовательности её исторических версий. Каждая версия отражает состояние отношения в определённый момент времени, формируя временную траекторию развития структуры.
- Темпоральность на уровне кортежа заключается в присвоении временных интервалов отдельным строкам таблиц. Каждый кортеж содержит значения атрибутов и указание периода их актуальности. При любом изменении данных создаётся новая строка, что приводит к росту числа записей и дублированию неизменённых значений. В результате информация о состоянии одного объекта распределяется между множеством кортежей, усложняя хранение, анализ и обработку данных.

Таким образом, темпоральные модели расширяют возможности реляционных баз данных, позволяя фиксировать историю изменений и обеспечивать полноценную временную аналитику, но вместе с тем создают высокую нагрузку на системы хранения и обработки данных в силу неизбежного увеличения объёмов информации.

В контексте обсуждения промышленных объектов вопросы хранения и обработки темпоральных данных приобретают особое значение, поскольку именно они позволяют решать следующие важнейшие задачи цифрового двойника:

- Прогнозирование срока службы оборудования: анализ исторических данных изменения основных параметров (вибрация, температура, давление) позволяет точно предсказывать момент наступления критического износа;

- Реконструкция событий при расследовании инцидентов: возможность восстанавливать полную картину изменения технологических параметров в период, предшествующий аварийной ситуации, что необходимо для установления причинно-следственных связей и дальнейшего обучения модели;
- Сравнительный анализ режимов работы: сопоставление временных рядов данных, полученных в различных условиях работы, помогает выявлять наиболее оптимальные условия эксплуатации;
- Ремонт и техническое обслуживание: планирование сервисных вмешательств на основе фактической накопленной нагрузки, а не по календарному графику, что позволяет перейти от профилактического к предиктивному обслуживанию;
- Валидация математических моделей: использование исторических данных для калибровки расчетных моделей цифрового двойника, обеспечивающее их адекватность реальному поведению физического объекта.

Поскольку объём хранимых данных неуклонно растёт, что усложняет возможность обращения к историческим данным, необходимо исследовать и проанализировать пути решения этой проблемы. В научной литературе описаны различные подходы, направленные на оптимизацию хранения, минимизацию избыточности и повышение эффективности темпоральной обработки.

Одним из вариантов решения указанных проблем является представление темпоральных данных в виде многомерного миварного информационного пространства (МВП) [3, 4]. Суть данного подхода заключается в отказе от классического табличного представления в пользу модели, где каждое значение данных представляется как точка в многомерном пространстве с осями: «Объект» (ID), «Атрибут» (S), «Время» (T) и «Отношение» (V).

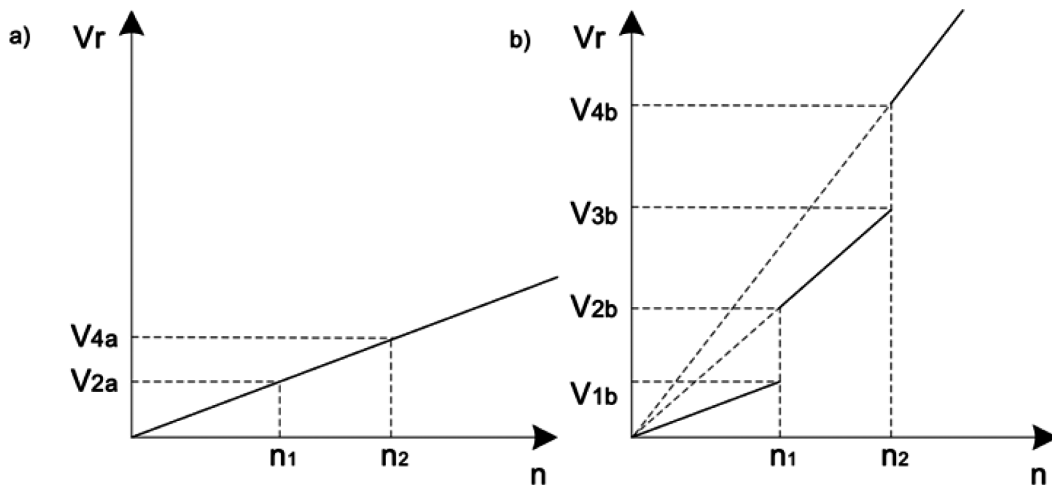


Рис. 1. Зависимость размера отношения с темпоральными кортежами от количества кортежей при неизменяющейся (а) и изменяющейся (б) схеме отношения [4]

Следовательно, состояние БД в какой-либо определённый момент времени характеризуется не набором таблиц, а совокупностью точек во временном пространстве, где каждая точка представляет собой отдельное значение конкретного атрибута для конкретного объекта в заданный момент времени.

Такой подход решает проблему избыточности темпоральных данных, так значения хранятся только для тех комбинаций, в которых происходили изменения. Таким образом не происходит дублирования не изменившихся данных при обновлении отдельного атрибута, что характерно для темпоральности на уровне кортежа. Также при добавлении нового атрибута в систему не происходят структурные изменения основы (например, добавления столбца в таблицу) и, соответственно, не происходит рост её объёма, как в реляционном случае (Рис. 1b). Новая ось или точка в пространстве просто начинает использоваться для новых данных, не затрагивая исторические. Согласно результатам, приведённым в статье, применение миварного подхода для системы кадрового учёта позволило сократить размер хранимых отношений на 32 % и ускорить адаптацию системы к изменяющимся требованиям на 53 %, что говорит о высокой эффективности подхода.

Другой подход к построению архитектуры цифровых двойников основан на концепции цифровых фабрик данных (Рисунок 2) [7]. Суть данного подхода заключается в создании платформы, которая выступает в роли системного интегратора для управления разнородными потоками данных в реальном времени. Цифровая фабрика данных представляет собой замкнутую экосистему, организующую процессы сбора, обработки, хранения и анализа информации от множества источников.

Перечислим ключевые характеристики цифровых фабрик данных для цифровых двойников:

- Контейнеризация и микросервисная архитектура: использование Docker, Kubernetes для инкапсуляции модулей обработки данных, что обеспечивает гибкость и масштабируемость системы;
- Оркестрация потоков данных: координация разнородных информационных потоков от IoT-устройств, датчиков, внешних систем с использованием инструментов типа Apache Kafka, Spark, AirFlow;
- ELT-процессинг (Extract-Load-Transform): в отличие от традиционного ETL, так как в данном случае операция преобразования данных опциональна, а операции выгрузки и загрузки данных выходят



Рис. 2. Типовая архитектура цифровой фабрики данных [7]

на первый. Подходящим инструментом является программное обеспечение с открытым исходным кодом Airbyte;

- Интеграция с облачными технологиями (cloud computing): максимальное использование облачных решений для виртуализации компонентов ИТ-инфраструктуры;

Выделим ключевые параметры двух подходов и проведем их сравнительную характеристику:

Таблица 1.

Сравнительная таблица подходов к работе с темпоральными данными для цифровых двойников

Критерий	Многомерное миварное пространство (ММП)	Цифровые фабрики данных (ЦФД)
Концепция	Представление данных как точек в многомерном пространстве	Интеграция потоков данных через контейнеризованную платформу с оркестрацией
Архитектура хранения	Многомерное пространство с осями: отношения, атрибуты, объекты, время	Многоуровневая архитектура DataOps с Data Lakes, хранилищами, «песочницами»
Обработка темпоральных данных	Хранение только изменяющихся значений в точках пространства	Потоковая обработка в реальном времени (Kafka, Spark) + ELT-процессинг
Масштабируемость	За счет разреженности многомерного представления	Горизонтальное масштабирование через контейнеризацию (Docker, Kubernetes)
Эффективность хранения	Сокращение объема за счет устранения избыточности	Оптимизация через многоуровневое хранение (горячие/теплые/холодные данные)
Тип цифрового двойника	Универсальный подход для различных типов двойников	Специализирован для DTA (Двойник-Агрегатор)
Преимущества	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая эффективность хранения • Гибкость структуры • Устранение избыточности 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая производительность обработки • Масштабируемость • Интеграция с современным стеком технологий
Ограничения	<ul style="list-style-type: none"> • Специфическая модель запросов • Сложность миграции существующих систем 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие требования к инфраструктуре • Сложность управления распределенной системой
Применимость к промышленным объектам	Эффективно для хранения исторических временных рядов параметров оборудования	Оптимально для обработки потоковых данных с промышленных датчиков в реальном времени

На основании проведенного сравнительного анализа двух подходов представляется целесообразным разработать гибридную модель, объединяющую сильные стороны каждой из рассмотренных методик.

Предлагаемая гибридная модель строится на принципе синтеза двух подходов. От цифровых фабрик данных заимствуются механизмы оркестрации потоковой обработки и контейнеризации, обеспечивающие высокую производительность и масштабируемость. От многомерного миварного пространства берется эффективная модель хранения темпоральных данных, устраняющая избыточность и обеспечивающая гибкость структуры.

Архитектурно модель реализуется как многоуровневая система, где каждый уровень решает специфические задачи в рамках единого контура управления цифровым двойником. Уровень сбора данных обеспечивает взаимодействие с физическими объектами через интеллектуальные датчики (IoT) и edge-устройства, осуществляя предварительную фильтрацию и агрегацию данных. Уровень обработки, реализованный по принципу цифровой фабрики, организует конвейеры ELT-процессинга с использованием контейнеризованных микросервисов. Уровень хранения реализует гибридную схему, где горячие данные (последние 30 дней) размещаются в колоночных хранилищах для обеспечения высокой скорости запросов, а исторические данные преобразуются в многомерное представление для эффективного долгосрочного хранения. Уровень аналитики и представления предоставляет единый интерфейс для временных запросов и OLAP-анализа.

Ключевым механизмом, обеспечивающим работу данной модели, будет являться трансформатор, преобразующий потоковые данные в точки многомерного пространства. Реализация такой технологии позволит сохранить преимущества потоковой обработки в сочетании с эффективностью многомерного хранения.

Для цифровых двойников промышленных объектов предлагаемая гибридная модель будет особенно эффективной, поскольку позволит решить характерные для промышленной области задачи, связанные с разнородностью данных, их большими объемами и высокими требованиями к надежности и производительности.

В результате проведенного исследования и анализа современных подходов к хранению и обработке темпоральных данных для цифровых двойников промышленных объектов можно прийти к следующим выводам.

Сравнительный анализ подходов показал, что ни один из рассмотренных методов не является универсальным. Каждый из них обладает своими преимуще-

ствами и ограничениями. Так, ММП обеспечивает эффективное хранение за счёт устранения избыточности хранимых данных и гибкости структуры, но при этом требует специфических механизмов запросов. ЦФД же демонстрируют высокую производительность при обработке потоковых данных и обладают потенциалом масштабируемости, однако предъявляют повышенные требования к инфраструктуре.

Предлагаемая гибридная модель интегрирует сильные стороны обоих подходов, что позволяет прийти

к сбалансированному решению, сочетающему высокую производительность, масштабируемость и экономичность хранения. Практическая значимость гибридной модели заключается в её способности решать главные задачи цифровых двойников промышленных объектов. В целом, реализация гибридной модели откроет перспективы для создания более гибких, эффективных и адаптивных систем управления данными в цифровых двойниках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов С.Г. Программное обеспечение для физической части цифрового двойника и связи его элементов // Бюллетень инновационных технологий. — 2024. — №3 (31). — С. 10–14.
2. Денисов С.Г. Технологии сбора и обработки данных для создания цифровых двойников // Бюллетень инновационных технологий. 2023. — №2 (26). — С. 12–17.
3. Елисеев Д.В. МИВАРное представление темпоральных реляционных моделей // I-methods. 2016. №2. . — С. 35–42.
4. Елисеев Д. В. Темпоральные объектно-реляционные модели в многомерном представлении // Объектные системы. 2015. №10. — С. 28–34.
5. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник ЗабГУ. 2021. №8. — С. 124–133.
6. Нелюбина Е.А. Парадигма программирования для обработки мультимодальных темпоральных данных цифровых двойников // Новое в экономической кибернетике. — 2023. — №4. — С. 39–51.
7. Потапов В.П., Попов С.Е., Счастливцев Е.Л. Цифровые двойники: стратегии и подходы к созданию систем экологического мониторинга // Вычислительные технологии. — 2023. — №3. — С. 167–181.
8. Тоноян С.А., Сараев Д.В. Темпоральные модели базы данных и их свойства // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. №12 (36). — С. 1–11.
9. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А.И. Боровков [и др.]. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — 62 с.

© Андреев Артем Александрович (artem2033andreev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УТВЕРЖДЕНИЯ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

MODELING OF ADMINISTRATIVE DOCUMENT APPROVAL PROCESS IN AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

**I. Asaliev
N. Mysakov
O. Romashkova
T. Dobrynina**

Summary. The paper presents the results of AS-IS modeling of an administrative document approval process (memos/requests) in a general education organization. The model was developed using Erwin Process Modeler with explicit representation of roles, approval stages, control points, and decision flows. The analysis of the AS-IS model reveals typical bottlenecks: parallel approval channels, duplication of actions and data, unclear responsibilities, lack of unified statuses and formalized return reasons, and deadline risks. Based on the findings, a set of improvement and digital support requirements is proposed, which can serve as input for TO-BE design and for defining automation tasks within the administrative document workflow of a general education organization.

Keywords: general education organization, organizational system, management, document workflow, approval, business process, process modeling.

Асалиев Ислам Асалиевич
Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
asaliev.isl@mail.ru

Мысаков Никита Алексеевич
Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
mr.mysakov@mail.ru

Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (РАНХиГС)», г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Добрынина Татьяна Николаевна
Кандидат технических наук, доцент, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
ermaktat@bk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования процесса согласования и утверждения управленческих документов (служебных записок/заявок) в общеобразовательной организации в текущем состоянии (AS-IS). Моделирование выполнено с использованием Erwin Process Modeler с фиксацией ролей участников, этапов прохождения документа, контрольных точек и потоков решений. На основе анализа модели AS-IS выявлены типовые проблемные зоны: параллельные каналы согласования, дублирование действий и информации, размытая ответственность, отсутствие единых статусов и формализованных причин возврата, а также риски нарушения сроков. Сформулирован перечень требований к оптимизации процесса и цифровой поддержке, который может быть использован как вход для проектирования целевой модели (TO-BE) и постановки задач автоматизации управленческого контура документооборота и согласований в общеобразовательной организации.

Ключевые слова: общеобразовательная организация, организационная система, управление, документооборот, согласование, бизнес-процесс, процессное моделирование.

Введение

На сегодняшний день актуальность проблемы моделирования процесса утверждения административных документов в образовательных организациях обусловлена недостаточной коммуникацией и координацией между подразделениями образовательной организации, специализирующимися на ведении образовательной деятельности, несоответствие между

административными процессами образовательной организации и информационно-технологической инфраструктурой [1].

Модель AS-IS процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки

Модель AS-IS отражает типовую последовательность прохождения управленческого документа в общеоб-

разовательной организации в условиях смешанного документооборота. Для процесса характерны: вариативность маршрута согласования в зависимости от содержания заявки, наличие повторяющихся циклов «возврат на доработку», а также участие нескольких ролей, принимающих решения на разных этапах [2]. Основная диаграмма процесса с распределением работ по ролям представлена на рисунке 1.

Основной сценарий (утверждение)

Шаг 1. Подготовка документа инициатором. Инициатор формирует служебную записку/заявку, указывает цель, обоснование, требуемые ресурсы и сроки. При необходимости прикладываются материалы, подтверждающие обоснованность обращения (списки, расчеты, план, согласия и др.).

Шаг 2. Регистрация документа (при наличии выделенной функции). Документ может регистрироваться секретарем/делопроизводителем (присваивается номер, фиксируется дата поступления). В реальной практике регистрация может быть неполной или происходить не на всех типах заявок, что влияет на наблюдаемость процесса и контроль сроков.

Шаг 3. Предварительное согласование (проверка полноты и корректности). Куратор/руководитель направления выполняет первичную проверку документа: полнота сведений, соответствие текущим планам и ограничениям, наличие необходимых приложений [3]. На данном этапе возможны следующие исходы: а) согласование и передача на следующий этап; б) возврат инициатору на доработку; в) отклонение (в случае принципиального несоответствия).

Шаг 4. Принятие решения о необходимости маршрутного согласования. Заместитель директора по направлению уточняет маршрут согласования: требуется ли участие функциональных служб (бухгалтерии, хозяйственной службы, ИТ-поддержки, ответственного за безопасность и др.). В модели AS-IS этот этап часто реализуется как последовательная передача документа по адресатам, что увеличивает время прохождения и усложняет контроль статуса.

Шаг 5. Согласование с функциональными службами (по необходимости). При затрагивании финансовых, материально-технических, организационных или иных ресурсов документ передается на экспертное согласование соответствующим службам [4]. Каждая служба может выдать согласование, замечания или отказ. Замечания нередко фиксируются в свободной форме и не унифицируются, что затрудняет последующую обработку и увеличивает число итераций доработки.

Шаг 6. Свод замечаний и принятие промежуточного решения. Заместитель директора консолидирует результаты согласований: при отсутствии замечаний документ передается на утверждение; при наличии замечаний — инициируется возврат на доработку (с последующим повторным прохождением согласования).

Шаг 7. Утверждение руководителем (или отклонение). Директор принимает окончательное решение по документу: утверждает (возможна постановка поручения) либо отклоняет с указанием причины/условий.

Шаг 8. Фиксация результата и уведомление инициатора. Секретарь/регистратор (или ответственное лицо) фиксирует итоговый статус и доводит результат до инициатора. В модели AS-IS фиксация результата может осуществляться в разных средах (реестр/бумага/переписка), что влияет на полноту цифрового следа процесса.

Ветвления процесса и возврат на доработку

Для процесса согласования управленческих документов в образовательной организации характерно повторяющееся ветвление, связанное с выявлением замечаний на этапе предварительной проверки и/или на этапе согласования с функциональными службами [5]. В текущем состоянии (AS-IS) возврат на доработку, как правило, инициируется при отсутствии обязательных сведений, неполном обосновании, несоответствии требованиям регламентов, а также при необходимости уточнения сроков и ресурсов.

Шаг 9. Инициирование возврата на доработку. Соглашающий (куратор, заместитель директора или функциональная служба) формирует замечания и возвращает документ инициатору. В модели AS-IS замечания могут фиксироваться в свободной форме и передаваться по разным каналам (устно, в переписке, на бумаге), что снижает полноту фиксации причин возврата и усложняет контроль итераций доработки.

Шаг 10. Доработка документа инициатором. Инициатор вносит изменения, уточняет недостающие сведения, корректирует обоснование, добавляет необходимые приложения. При отсутствии единых правил оформления и шаблонов повышается вероятность повторного возврата.

Шаг 11. Повторная подача на согласование. Доработанный документ повторно направляется на предварительную проверку и далее следует по маршруту согласования. В зависимости от типа замечаний повторный цикл может включать либо только один этап (например, повторная проверка куратором), либо повторное согласование с функциональными службами. Количество итераций не является фиксированным и определяется со-

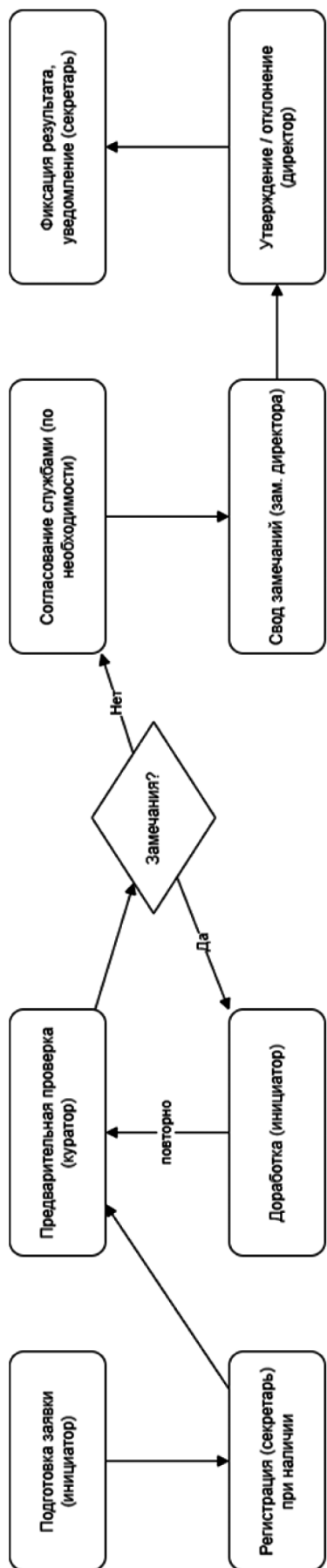


Рис. 1. AS-IS модель процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки

держанием замечаний и согласованностью требований разных участников.

Шаг 12. Альтернативный исход: отклонение документа. В случае принципиального несоответствия или невозможности выполнения заявки (ограничения по ресурсам, срокам, требованиям безопасности [6]) документ может быть отклонён. Для модели AS-IS процесса важно фиксировать причину отклонения, так как данный параметр является значимым для последующего анализа управленческих рисков и корректировки регламентов.

Таким образом, модель AS-IS процесса включает не только линейный сценарий согласования и утверждения, но и повторяющийся цикл возврата на доработку, который формирует один из ключевых источников задержек и информационной неопределенности [7]. Данный факт должен учитываться при формировании требований к оптимизации и цифровой поддержке процесса.

Далее выполнен анализ модели AS-IS с выделением проблемных зон и формированием требований к оптимизации процесса и его цифровой поддержке.

Анализ модели AS-IS и выявление «узких мест»

Анализ разработанной модели AS-IS показывает, что основные потери эффективности в процессе согласования и утверждения служебной записки/заявки формируются за счет (1) недостаточной формализации статусов и причин возврата, (2) вариативности маршрута согласования без единой точки контроля, (3) смешанного документооборота и параллельных каналов коммуникации, (4) отсутствия единого реестра и журналирования действий в масштабе процесса. В результате увеличивается время прохождения документа, усложняется контроль сроков и ответственности, а управленческая аналитика становится неполной и несопоставимой [8].

Узел 1 — предварительная проверка и возвраты.

На этапе предварительной проверки (куратор/руководитель направления) концентрируется значительное число возвратов на доработку. При отсутствии унифицированных требований к составу заявки и шаблонов документа инициатор часто получает замечания в свободной форме; это повышает риск повторных возвратов и создает «петлю» согласования без предсказуемого числа итераций.

Узел 2 — маршрутное согласование с функциональными службами.

Модель AS-IS процесса предполагает подключение функциональных служб (финансы, МТО, безопасность,

ИТ) «по необходимости». Однако критерии необходимости не всегда формализованы, из-за чего маршрут может определяться ситуативно. При последовательной передаче по адресатам (а не параллельной проверке) время согласования существенно увеличивается, а при параллельной коммуникации через разные каналы теряется единая версия документа и единый статус [9].

Узел 3 — отсутствие единой среды фиксации статусов и решений.

Даже при наличии регистрации отдельных документов наблюдаемость процесса остаётся ограниченной, если часть согласований происходит вне реестра (переписка, устные согласования, бумажные визы). В таких условиях затруднены контроль очереди документов, управление сроками и восстановление истории принятия решений.

Узел 4 — размывание ответственности и «точки ожидания».

В модели AS-IS ответственность за своевременное прохождение документа часто носит распределенный характер. При отсутствии SLA/дедлайнов и механизма напоминаний возникают «точки ожидания», где документ фактически простаивает между ролями, при этом источник задержки не фиксируется.

Узел 5 — риски информационной безопасности и персональных данных.

В случае передачи документов через неконтролируемые каналы повышаются риски нарушения требований по доступу и хранению информации. Это особенно актуально для документов, содержащих персональные данные и служебную информацию, требующую разграничения прав.

Систематизация выявленных проблем представлена в таблице 1.

Выявленные проблемы позволяют сформулировать требования к оптимизации процесса и цифровой поддержке, которые выступают основой для разработки целевой модели (TO-BE).

Требования к оптимизации процесса и цифровой поддержке (вход для TO-BE)

На основе выявленных проблемных зон AS-IS модели формируется перечень требований к оптимизации процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки и к его цифровой поддержке. Требования ориентированы на повышение управляемости процесса и включают: стандартизацию входа (шаблоны и обяза-

Таблица 1.

Проблемные зоны модели AS-IS процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки

Проблема	Где проявляется в процессе	Последствия	Вероятная причина (AS-IS)	Проблема
Параллельные каналы согласования	шаги 2–7	потеря истории, расхождение версий, «две версии решения»	смешанный документооборот (бумага/почта/мессенджеры)	Параллельные каналы согласования
Нет единого реестра статусов	шаги 2–8	сложно контролировать очередь, сроки, нагрузку	фиксация статусов фрагментарна или отсутствует	Нет единого реестра статусов
Неунифицированные причины возврата	шаги 3, 5, 9–11	рост числа итераций доработки, повторные возвраты	замечания передаются в свободной форме без классификатора	Неунифицированные причины возврата
Недостаточная стандартизация заявки	шаги 1, 3	неполнота сведений, ошибки оформления	нет шаблонов/обязательных полей/чек-листа	Недостаточная стандартизация заявки
Вариативность маршрута без правил	шаги 4–6	непредсказуемые сроки, «лишние согласующие»	критерии «по необходимости» не формализованы	Вариативность маршрута без правил
Последовательное согласование службами	шаг 5	увеличение времени согласования	отсутствие параллельной экспертизы/оркестрации	Последовательное согласование службами
Отсутствие SLA и напоминаний	шаги 4–7	просрочки, «зависания» документа	нет дедлайнов и автоматических уведомлений	Отсутствие SLA и напоминаний
Размытая ответственность	шаги 2–8	сложно установить источник задержки	нет закрепления владельца процесса/ответственного за маршрут	Размытая ответственность
Нет журналирования действий	шаги 2–8	сложно восстановить ход решения, трудно разбирать спорные случаи	отсутствует аудит действий/лог	Нет журналирования действий
Риски ИБ и ПДн	на всем процессе	утечки, нарушение требований хранения/доступа	использование неконтролируемых каналов, слабое разграничение прав	Риски ИБ и ПДн
Дублирование действий и пересылок	шаги 2, 4, 7	лишняя нагрузка, рост времени обработки	нет интеграции и единого контура	Дублирование действий и пересылок
Нет фиксации причин отклонения	шаг 12	невозможно анализировать отказы и корректировать регламенты	нет обязательного поля «причина отказа»	Нет фиксации причин отклонения

тельные поля), унификацию статусов и причин возврата, формализацию маршрутов согласования по типам заявок, создание единого реестра и журналирования действий, а также внедрение механизмов контроля сроков (SLA) и уведомлений. Дополнительно учитываются требования информационной безопасности и разграничения прав доступа, особенно при работе с документами, содержащими персональные данные или служебную информацию [10].

С точки зрения процессного управления требования можно сгруппировать в четыре блока [11]:

1. регламентирование (правила маршрутизации, роли и ответственность);
2. данные (шаблоны, справочники, статусы, причины возврата/отказа);

3. контроль (SLA, очередь, уведомления, аналитика);
4. безопасность и аудит (журналы, разграничение прав, контроль каналов).

Свод требований представлен в таблице 2.

Заключение

В статье выполнено AS-IS моделирование процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки в образовательной организации с использованием программного средства Erwin Process Modeler. Определены границы процесса, выделены ключевые роли участников и описан типовой сценарий прохождения документа, включая ветвление «возврат на доработку» и аль-

Таблица 2.

Требования к улучшению процесса (AS-IS → TO-BE) и ожидаемый эффект

Проблема AS-IS	Требование к TO-BE	Ожидаемый эффект	Элемент цифровой поддержки
Параллельные каналы согласования	единый контур прохождения документа; запрет/ограничение обходных согласований	единая «версия правды», полная история решений	единый workflow/ECM-контур; корпоративные правила
Нет единого реестра статусов	единый реестр документов и статусов для всех заявок	наблюдаемость процесса, контроль очереди	реестр + статусы + витрина «в работе/просрочено»
Неунифицированные причины возврата	классификатор причин возврата и обязательное указание причины	снижение повторных возвратов, анализ причин	справочник причин + обязательное поле
Нестандартизированный вход	шаблон заявки и обязательные поля (цель, сроки, ресурсы, приложения)	уменьшение ошибок и неполноты	формы ввода + проверки заполнения
Вариативность маршрута без правил	правила маршрутизации по типам заявок и условиям («если... то...»)	предсказуемость сроков, исключение лишних согласований	настройка маршрутов/правил workflow
Последовательное согласование службами	возможность параллельного согласования службами с единой точкой контроля	сокращение времени согласования	параллельные ветки workflow + «сборка» результатов
Отсутствие SLA/напоминаний	нормативные сроки по этапам; автоматические уведомления и эскалация	снижение просрочек и «зависаний»	SLA, напоминания, эскалация руководителю
Размытая ответственность	назначение владельца процесса и ответственного за маршрут/контроль	снижение «точек ожидания», прозрачность	роли «владелец процесса/контролер»
Нет журналирования действий	обязательное логирование действий и решений	аудит, разбор спорных случаев	журнал действий (audit log)
Риски ИБ и ПДн	разграничение прав, контроль доступа, безопасные каналы хранения	снижение рисков утечек, соответствие требованиям	RBAC/ACL, политики хранения, защищенные каналы
Дублирование пересылок	интеграция и исключение двойного ввода; автоматическая доставка задач	снижение ручной нагрузки	интеграции, авто-уведомления/задачи
Не фиксируются причины отказа	обязательное указание причины отклонения и условий	управленческая аналитика по отказам	поле «причина отказа», шаблон решения

тернативный исход «отклонение». Анализ AS-IS модели показал, что наиболее существенные потери эффективности связаны с отсутствием единого контура фиксации статусов и решений, вариативностью маршрута согласования без формализованных правил, неунифицированными причинами возврата и недостаточной стандартизацией входных данных заявки. Дополнительные риски формируются в области контроля сроков, ответственности и информационной безопасности.

По результатам анализа сформулирован перечень требований для реинжиниринга процесса и его цифро-

вой поддержке, включающий стандартизацию формы заявки, унификацию статусов и причин возврата/отказа, формализацию маршрутов согласования, внедрение SLA и уведомлений, создание единого реестра и журналирования действий, а также обеспечение разграничения доступа и аудита. Сформированные требования могут быть использованы как исходные данные для проектирования целевой модели процесса (TO-BE) и последующей реализации практико-ориентированных информационных технологий управления организационными системами в образовательной организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В., Ермакова Т.Н. Современное состояние и перспективы моделирования цифровых профессиональных пространств в бизнесе и образовании. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. Том 20, № 4 (2023) С.358–372.
2. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
3. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
4. Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования //Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2022. № 4 (62). С. 29–43.
5. Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н. Моделирование информационных процессов управления образовательным комплексом //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2014. № 2. С. 122–129.
6. Астафьев А.Ю. Обновление образовательной парадигмы в условиях перехода вузов на электронное обучение и использование дистанционных образовательных технологий // Вестник ВГУ. Серия: Право. 2021. № 1. С. 316–326.
7. Ponomareva L.A., Romashkova O.N. Training of specialists in on-board communication systems. // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. С. 9078594.
8. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М: Наука. 2021. 584 с.
9. Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Модель эффективного управления объединенной образовательной системой (структурой)// В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 16–18.
10. Рябовичева О.В., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Процесс обработки и передачи виртуальных данных в вычислительных комплексах и компьютерных сетях вуза //Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 7–2. С. 85–92.
11. Захаров Я.В., Ромашкова О.Н. Анализ информационных потоков в образовательной организации в целях соответствия современным вызовам в образовании // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки — 2025 — №1 — С. 74–79

© Асалиев Ислам Асалиевич (asaliev.isl@mail.ru); Мысаков Никита Алексеевич (mr.mysakov@mail.ru);
Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru); Добрынина Татьяна Николаевна (ermaktat@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКИ МЕТОДОВ КВАНТИЗАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ КОМПАКТНЫХ АРХИТЕКТУР MOBILENET ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ НА МОБИЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗАСЫПАНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОСВЕЩЕНИЯ

Афанасьев Арсений Геннадьевич

Аспирант, Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)
afanasievag@bmstu.ru

COMPARATIVE ANALYSIS
AND EVALUATION OF NEURAL NETWORK
QUANTIZATION METHODS OF COMPACT
MOBILENET ARCHITECTURES
FOR DEPLOYMENT ON MOBILE
COMPUTING DEVICES FOR VISUAL
MONITORING OF DRIVERS' SLEEP
IN VARIOUS LIGHTING CONDITIONS

A. Afanasyev

Summary. This paper presents a comparative analysis of the impact of quantization methods on the efficiency, performance, and accuracy of neural network models based on the compact MobileNetV1, MobileNetV2, and MobileNetV3 architectures. This analysis is based on the implementation of a driver sleep/wake binary classification task using a Samsung Galaxy A50 smartphone with the front camera. A comparative analysis of detection quality under different lighting conditions (daytime and nighttime) is conducted, and tradeoffs between accuracy, inference speed, and resource requirements are considered.

Keywords: MobileNet, smartphone, falling asleep, drowsiness, driver, visual monitoring, neural network, quantization.

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ воздействия методов квантизации на эффективность, производительность и точность нейросетевых моделей компактных архитектур MobileNetV1, MobileNetV2 и MobileNetV3 на примере реализации задачи бинарной классификации «засыпание/бодрствование» водителя с применением смартфона Samsung Galaxy A50 с использованием фронтальной камеры. Проводится сравнительный анализ качества детекции в разных условиях освещения (дневные и ночные), рассматриваются компромиссы между точностью, скоростью инференса (inference) и требованиями к ресурсам.

Ключевые слова: MobileNet, смартфон, засыпание, сонливость, водитель, визуальный мониторинг, нейросеть, квантизация.

Введение

Проблема сонливости, засыпания водителей является одной из ключевых причин дорожно-транспортных происшествий во всем мире. По данным различных исследований, утомление и микросон за рулем приводят к снижению скорости реакции, ухудшению восприятия дорожной обстановки и, как следствие, к повышению аварийности. Особенно опасны такие состояния в ночное время и при монотонных условиях движения. В связи с этим системы мониторинга состояния водителя (Driver Monitoring Systems, DMS) становятся важной частью современных транспортных систем [1]. Одним из подходов для создания этих систем является

использование методов машинного обучения, которое успешно зарекомендовало себя в самых различных областях, таких как например, медицина [2], определение эмоционального содержания текста [3], поиск и обнаружение инфракрасных целей [4], прогнозирование загрузки виртуальных вычислительных систем [5-8], компьютерное зрение [9], распознавание лиц [10, 11], определение усталого состояния человека [12], и для других задач.

Ключевой задачей при реализации подобных систем на мобильных вычислительных устройствах является обеспечение высокой точности распознавания при ограниченных вычислительных ресурсах и энергопо-

треблении. Для этого могут применяться легковесные архитектуры сверточных нейронных сетей, таких как MobileNetV1, MobileNetV2 и MobileNetV3.[13] Дополнительным способом оптимизации является квантизация нейронных сетей [14], позволяющая уменьшить размер модели и ускорить вычисления за счет использования чисел пониженной разрядности.

Целью данной статьи является анализ методов квантизации для нейронных сетей семейства MobileNet для повышения эффективности решения задачи определения сонливости водителя с использованием фронтальной камеры смартфонов в различных условиях освещенности.

В качестве аппаратной платформы для проведения экспериментов был выбран смартфон Samsung Galaxy A50, оснащенный однокристальной системой Exynos 9610 (8 ядер: Cortex A73 и Cortex A53), графическим ускорителем Mali G72 MP3 и оперативной памятью объемом 4 Гб. Операционная система Android 11.

Емкость аккумулятора смартфона Samsung Galaxy A50 составляет 4000 мАч (миллиампер-часов). Эта литий-полимерная (Li-Pol) батарея обеспечивает непрерывную работу в режиме с фронтальной камерой около 20 часов.

Устройство не содержит выделенного нейропроцессора (NPU), поэтому инференс нейронных сетей выполняется и на CPU и GPU.

Фронтальная камера смартфона Samsung Galaxy A50 имеет разрешение 25 Мп и оптимизирована для работы как при дневном свете (для четкости), так и в условиях недостаточного освещения (для яркости и насыщенности).

Необходимо отметить, что квантизация наиболее эффективна, когда вычисления выполняются на CPU или NPU. Поэтому наличие GPU у смартфона Samsung Galaxy A50 не сильно влияет на эффективность вычислений при квантизации в случае int 8/int 4, так как GPU оптимизирован под вычисления в формате float16.

Данные ограничения делают Samsung Galaxy A50 показательной платформой для оценки эффективности квантизации моделей MobileNet с точки зрения скорости инференса и энергопотребления на массовых мобильных устройствах

Постановка задачи и требования к системе

Задача определения сонливости, засыпания водителя формулируется как задача бинарной сводной классификации зевков, состояний глаз, положения головы по видеопотоку с фронтальной камеры (рис. 1).

Пусть видеопоток, получаемый с фронтальной камеры смартфона, представлен в виде последовательности кадров:

$$X = \{x_t | x_t \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}, t = 1, 2, \dots, T\},$$

где H, W — пространственное разрешение изображения,
 C — количество цветовых каналов,
 T — длина временного интервального окна анализа.

Задача определения засыпания водителя формулируется как задача бинарной классификации:

$$y = f(X, \theta), y \in \{0, 1\}$$

- $y = 1$ — соответствует состоянию засыпания,
- $y = 0$ — состояние бодрствования водителя,
- θ — параметры нейронной сети MobileNet.

Вероятность засыпания вычисляется с использованием сигмоидной функции активации:

$$P(y = 1|X) = \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

где z — выход последнего слоя нейронной сети.

Основными признаками засыпания являются:

- длительное закрытие глаз (метрика PERCLOS);
- частое моргание или, наоборот, редкое моргание;
- наклон головы;
- частота зевков.

Математически метрика PERCLOS (PERcentage of eye CLOSure) определяется следующим образом:

$$PERCLOS = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbb{I}(e_t < \tau),$$

где

- T — общее число кадров в анализируемом временном окне,
- e_t — нормированная степень раскрытия глаз на кадре t ,
- τ — пороговое значение, соответствующее состоянию «глаза закрыты»,
- $\mathbb{I}(\cdot)$ — индикаторная функция, принимающая значение 1 при выполнении условия и 0 в противном случае.

Для непрерывного видеопотока метрика PERCLOS может быть представлена в эквивалентной временной форме:

$$PERCLOS = \frac{T_{closed}}{T_{window}},$$

где T_{closed} — суммарная длительность интервалов, в течение которых глаза водителя находятся в закрытом со-



Рис. 1. Система мониторинга засыпания водителя

стоянии, а T_{window} -длительность временного интервала наблюдения. При превышении заданного порогового значения система делает вывод о высокой вероятности засыпания водителя:

$$PERCLOS \geq P_{thr} \Rightarrow y = 1.$$

На практике значение порога P_{thr} выбирается в диапазоне 0,3–0,4 в зависимости от условий освещенности и требований к чувствительности системы.

Методы квантизации нейронных сетей

Квантизация нейронных сетей представляет собой процесс преобразования весов и значений активаций из чисел с плавающей точкой (обычно float32) в числа с меньшей разрядностью (int4, int8, int16, float16).

Основные преимущества квантизации:

- уменьшение размера модели;
- ускорение инференса;

- снижение энергопотребления;
- лучшая совместимость с мобильными ускорителями (Digital Signal Processor, DSP; Neural Processing Unit, NPU).

Основные методы квантизации

Пост-тренировочная квантизация (Post-Training Quantization, PTQ) — данный метод применяется после завершения обучения модели. Веса и/или значения активации преобразуются в int8 с использованием калибровочного набора данных. PTQ проста в реализации и не требует повторного обучения, однако может приводить к заметному снижению точности, особенно для сложных моделей и задач с высокой чувствительностью к шуму. Этот метод очень популярен для смартфонов. Потеря качества обычно небольшая (часто <math><1-2\%</math>).

Квантизация с учетом обучения (Quantization Aware Training, QAT). При QAT эффекты квантизации моделируются непосредственно в процессе обучения. Это позволяет сети адаптироваться к пониженной разрядности и сохранить точность. Этот метод используется если важна максимальная точность. Точность почти как у float32. Недостатком является увеличение времени и сложности обучения.

Динамическая квантизация. При динамической квантизации веса хранятся в квантизованном виде, а значения активации квантизируются на лету во время инференса. Такой подход часто используется для рекуррентных и полносвязных сетей, но реже применяется для сверточных моделей в задачах компьютерного зрения.

Адаптивная квантизация представляет собой расширение классических методов квантизации, при котором параметры квантизации (разрядность, масштабные коэффициенты или пороги) изменяются в зависимости от условий работы системы или характеристик входных данных. В отличие от статической квантизации, где используется единый набор параметров для всей модели, адаптивный подход позволяет учитывать неоднородность распределений активаций в различных слоях и изменчивость внешних факторов. В задачах мониторинга состояния водителя адаптивная квантизация может учитывать условия освещенности (день/ночь), уровень шума изображения и текущую нагрузку на вычислительные ресурсы. Например, при хорошей освещенности возможно применение более агрессивной int8-квантизации, тогда как в ночных условиях для чувствительных слоев целесообразно использовать повышенную разрядность (int16 или float16). Адаптивная квантизация позволяет достичь более выгодного компромисса между точностью и скоростью инференса, однако усложняет реализацию системы и требует дополнительных механизмов мониторинга условий работы.

Для устройств без выделенного NPU, таких как Samsung Galaxy A50, данный подход представляет интерес прежде всего в исследовательском контексте, поскольку его практическая реализация на уровне мобильных фреймворков ограничена.

Архитектуры MobileNet и их особенности

MobileNetV1 является одной из первых архитектур, специально разработанных для мобильных и встраиваемых устройств. Основная идея заключается в использовании глубинно-разделимых сверток (Depthwise Separable Convolutions), которые разбивают стандартную свертку на две операции:

- Depthwise-свертка — применяется отдельно к каждому каналу входного тензора;
- Pointwise-свертка (1×1) — объединяет каналы.

Использование данной схемы позволяет существенно сократить вычислительные затраты. И это обеспечивает значительное ускорение инференса и снижение энергопотребления, что особенно важно для мобильных устройств. MobileNetV1 отличается простой структурой и предсказуемым поведением при оптимизации, однако может уступать более новым версиям по точности.

MobileNetV2 развивает идеи предыдущей версии и вводит два ключевых улучшения:

- инвертированные остаточные блоки (Inverted Residuals);
- линейные «бутылочные слои» (Linear Bottlenecks).

В отличие от классических остаточных соединений, MobileNetV2 сначала расширяет размерность признаков, а затем сжимает ее. Использование линейных активаций на выходе «бутылочного» слоя снижает потери информации при квантизации и сжатии. Это делает MobileNetV2 более устойчивой к агрессивным методам оптимизации.

MobileNetV3 является результатом автоматизированного поиска архитектур (NAS) и включает в себя дополнительные оптимизации:

- нелинейность h-Swish вместо ReLU;
- механизм внимания Squeeze-and-Excitation;
- более эффективное распределение вычислений между слоями.

Существуют две основные конфигурации: MobileNetV3-Large и MobileNetV3-Small. Для задач мониторинга водителя на смартфоне чаще используется версия Small, так как она обеспечивает лучший баланс между скоростью и точностью.

Анализ применения квантизации для MobileNetV1

MobileNetV1 благодаря своей простой структуре хорошо поддается пост-тренировочной квантизации.

Эксперименты показывают, что при использовании int8-квантизации размер модели уменьшается примерно в 4 раза, а скорость инференса на мобильном процессоре возрастает на 30–50 %.

Однако в задаче определения засыпания водителя, особенно в ночных условиях, MobileNetV1 демонстрирует заметное падение точности после PTQ. Это связано с тем, что слабоконтрастные изображения лица и шумы при плохом освещении требуют более точного представления признаков. В таких условиях предпочтительнее использовать QAT, что позволяет снизить потери точности до 1–2 % по сравнению с float32-моделью.

Анализ применения квантизации для MobileNetV2

MobileNetV2 считается более устойчивой к квантизации благодаря линейным «бутылочным» слоям. При пост-тренировочной int8-квантизации снижение точности в дневных условиях обычно не превышает 1%, а в ночных — 2–3 %. При использовании QAT метода MobileNetV2 показывает стабильные результаты как днем, так и ночью. Дополнительным преимуществом является более высокая точность по сравнению с MobileNetV1 при схожих вычислительных затратах. Для Samsung Galaxy A50, не оснащенного специализированным NPU высокого класса, MobileNetV2 в квантизованном виде является одним из наиболее сбалансированных вариантов.

Анализ применения квантизации для MobileNetV3

MobileNetV3 изначально проектировалась с учетом работы на мобильных устройствах и хорошо адаптирована к int8-инференсу. Использование h-swish и блоков внимания повышает выразительную способность сети, однако может усложнять квантизацию при отсутствии QAT. Пост-тренировочная квантизация MobileNetV3-Small дает хорошие результаты в дневных условиях, но в ночных сценариях возможно более заметное падение точности из-за чувствительности механизмов внимания к шуму. Применение QAT позволяет практически полностью нивелировать этот эффект. С точки зрения производительности MobileNetV3-Small в int8-формате демонстрирует наилучшее соотношение точности и скорости, что делает ее перспективным выбором для длительной работы системы мониторинга без значительного расхода аккумулятора смартфона.

Методика эксперимента

1. Сбор данных. Использовались видеозаписи с фронтальной камеры Samsung Galaxy A50 в реальных условиях. Дневные условия: яркий свет, естественное освещение. Ночные условия: искусственное освещение, слабая видимость. Данные

были аннотированы вручную. Класс 0 — водитель бодрствует. Класс 1 — засыпание.

2. Предобработка. Детекция лица с помощью детектора MediaPipe Face Detection (BlazeFace)— самый быстрый по FPS с хорошей точностью детектор лица на смартфоне [15]. Нормализация размера изображения на 224×224. Аугментации (яркость, контраст, поворот) для устойчивости к условиям.
3. Обучение и оптимизация. Базовая тренировка моделей (float32). Настройка параметров квантизации через PTQ и QAT. Тестирование производительности на Samsung Galaxy A50 (табл. 1).

Таблица 1.

Точность моделей по условиям освещенности для формата float32

Модель	Дневные условия	Ночные условия
MobileNetV1	~87 %	~75 %
MobileNetV2	~90 %	~83 %
MobileNetV3-Small	~92 %	~85 %

Замечание. MobileNetV3-Large обычно даёт ещё лучший результат, но слишком тяжёлая для реального времени на Samsung Galaxy A50 без оптимизации.

4. Влияние PTQ. Значительное уменьшение размера моделей (до ~4). Небольшое падение точности (на 2–5 %). Ускорение инференса ~30–80 %.
5. Влияние QAT. Уменьшение потерь точности (почти на уровне float32). Настройка веса моделей позволила адаптировать их к шуму ночных кадров. Требуется больше времени тренировки и вычислительных ресурсов.
6. Сравнение по условиям освещения (табл. 2)

Таблица 2.

Сравнение по условиям освещения

Метод	Лучшая модель	Аккурасу (днём)	Аккурасу (ночь)
Float32	MobileNetV3	92 %	85 %
PTQ int8	MobileNetV3	90 %	82 %
QAT int8	MobileNetV3	91 %	84 %

7. Выявленные особенности использования на смартфоне:

- Температура мобильного устройства может снижать FPS;
- Фронтальная камера плохо справляется с шумом ночью;
- Требуется баланс между скоростью, точностью и энергопотреблением.

8. Практические рекомендации. Наличие целесообразности в адаптивной квантизации для переключения между режимами работы нейронной сети в зависимости от освещения и времени суток.

Заключение

Методы квантизации позволяют эффективно адаптировать нейросети MobileNet к работе в реальном времени на мобильных устройствах подобных Samsung Galaxy A50, сохраняя приемлемую точность. Наблюдается чёткая зависимость между архитектурой модели, методом квантизации и условиями освещения. MobileNetV3 с QAT-оптимизацией наиболее универсален, особенно для сложных условий ночной трассы, тогда как PTQ даёт

хорошую производительность с минимальными затратами на разработку.

Перспективы дальнейших исследований:

- Исследование адаптивной квантизации в реальном времени;
- Использование трансформеров с адаптивным порогом;
- Гибридные модели с отслеживанием зевков, состояния глаз и положения головы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Driver_monitoring_system [Electronic resource] // En.wikipedia.org URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Driver_monitoring_system (accessed: 04.01.2026).
2. Ся Т., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г. Искусственный интеллект в стоматологии // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2023. № 2-2. С.121–127.
3. Инь С., Афанасьев Г.И., Калистратов А.П. Метод применения нейронных сетей BERT-BiLSTM-Attention для определения эмоционального отношения автора к тексту // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2023. № 7-2. С.55–58.
4. Ван Ч., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г. Алгоритм обнаружения слабых инфракрасных целей на сложном фоне посредством нейросетевой модели YOLOv5 // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2023. № 8-2. С. 54–59.
5. Зуев Д.А., Калистратов А.П., Семкин П.С., Афанасьев Г.И. Анализ производительности алгоритма HyperLogLog при потоковой обработке данных // Динамика сложных систем-XXI век. 2017. т.11. №4. С.51–55.
6. Калистратов А.П., Афанасьев Г.И., Подход к реализации моделирования производительности вычислительной системы // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2018. № 6. С.58–62.
7. Калистратов А.П., Ревунков Г.И. Семкин П.С., Афанасьев Г.И., Влияние распределения системных ресурсов на производительность виртуальных машин // Динамика сложных систем-XXI век. 2017. т.11. №4. С.46–50.
8. Нестеров Ю.Г., Калистратов А.П., Афанасьев Г.И. Подход к применению машинного обучения в прогнозировании загрузки виртуальных вычислительных систем // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 11-2. С. 73–76.
9. Ма Л., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г. Компьютерное зрение в интеллектуальных транспортных системах // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2023. № 2-2. С.101–105.
10. Крутов Т.Ю., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г. Сиамские нейросети для задачи распознавания лиц // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2022. № 12-2. С.88–92.
11. Чжоу Х., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г., Филатова А.Е. Система распознавания лиц на основе библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2023. № 8-2. С.142–145.
12. Фэн Кэцзя, Афанасьев Г.И., Нестеров Ю.Г. Применение искусственного интеллекта в прогнозировании усталого поведения водителей при вождении автотранспортными средствами // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. 2022. № 12-2. С.190–195.
13. MobileNet [Electronic resource] // Keras.io URL: <https://keras.io/api/applications/mobilenet> (accessed: 04.01.2026).
14. A Survey On Neural Network Quantization A Survey On Neural Network Quantization [Electronic resource] /Jiawei Y., Zhongbo L., Zeqin F., Yongqiang X. // ACM Digital Library URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3746709.3746773> (accessed: 04.01.2026).
15. BlazeFace: Sub-millisecond Neural Face Detection on Mobile GPUs [Electronic resource] /Valentin Bazarevsky V., Kartyannik Yu., Vakunov A., Raveendran K., Grundmann M. //Cornell University URL: <https://arxiv.org/abs/1907.05047> (accessed: 04.01.2026).

© Афанасьев Арсений Геннадьевич (afanasievag@bmstu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.06

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И ПОДХОДОВ К ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ПРИ МИГРАЦИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Баданов Артем Андреевич

ведущий разработчик, ООО «Амбердата»
artem_badanov@inbox.ru

ANALYSIS OF PROBLEMS AND APPROACHES TO INFORMATION PROCESSING DURING BIG DATA MIGRATION

A. Badanov

Summary. This article examines information processing challenges arising during big data migration in the context of heterogeneous and multivariate data warehouses. A one-time data migration scenario, typical for infrastructure modernization, technology platform transitions, and data source consolidation, is examined as a methodological constraint. It is shown that transferring data and associated metadata between systems with different storage models significantly complicates information processing. This paper identifies and analyzes five key issues that have the greatest impact on the correctness and efficiency of big data migration: differences in supported data types and storage models, limited portability of data processing methods, failures and errors when processing large volumes of information, the specifics of data extraction from non-standard sources, and the limited computing resources of the source systems. For each of these challenges, approaches and mitigation methods are considered, based on adapting data processing processes to architectural and resource constraints. The research results can be used in the design and implementation of big data migration processes in modern information systems and also serve as a basis for developing adaptive and hybrid approaches to information processing.

Keywords: big data, big data migration, information processing, data warehouses, ETL, storage models, computing resources, big data migration challenges.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы обработки информации, возникающие при миграции больших данных в условиях использования разнородных и многовариационных хранилищ данных. В качестве методологических ограничений исследуется сценарий единоразовой миграции данных, характерный для задач модернизации инфраструктуры, смены технологических платформ и консолидации источников информации. Показано, что перенос данных и сопутствующих метаданных между системами с различными моделями хранения существенно усложняет процессы обработки информации.

В работе выделены и проанализированы пять ключевых проблем, оказывающих наибольшее влияние на корректность и эффективность миграции больших данных: различия в поддерживаемых типах данных и моделях хранения, ограниченная переносимость методов обработки данных, сбои и ошибки при обработке больших объемов информации, особенности извлечения данных из нестандартных источников, а также ограниченность вычислительных ресурсов исходных систем. Для каждой из выделенных проблем рассмотрены подходы и методы их смягчения, основанные на адаптации процессов обработки данных с учетом архитектурных и ресурсных ограничений.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и реализации процессов миграции больших данных в современных информационных системах, а также служат основой для разработки адаптивных и гибридных подходов к обработке информации.

Ключевые слова: большие данные, миграция больших данных, обработка информации, хранилища данных, ETL, модели хранения, вычислительные ресурсы, проблемы миграции больших данных.

В условиях цифровизации и роста объемов информации процессы миграции данных приобретают особую значимость. Современные информационные системы постоянно эволюционируют: происходит переход от монолитных архитектур к распределенным, от локальных хранилищ к облачным и гибридным средам, от традиционных реляционных баз данных к MPP— и NoSQL-решениям. В рамках таких преобразований неизбежно возникает необходимость переноса данных между различными системами хранения и обработки.

Миграция данных представляет собой сложный многоэтапный процесс, включающий извлечение, преобразование, передачу и загрузку информации в целе-

вое хранилище. При этом ключевую роль играет именно обработка информации, так как данные зачастую различаются по структуре, формату, семантике и требованиям к качеству. Ошибки, допущенные на этапе обработки, могут приводить к потере данных, снижению их достоверности, нарушению целостности и, как следствие, к некорректной работе прикладных систем.

Целью данной работы является анализ основных проблем, возникающих при обработке информации в процессе миграции данных, а также обзор существующих и перспективных подходов к их решению. В статье рассматриваются как технологические, так и методологические аспекты миграции, что позволяет комплексно оценить эффективность применяемых решений.

Процесс миграции данных, как правило, представляет собой многоэтапную процедуру, направленную на перенос информации между разнородными информационными системами с сохранением ее целостности, корректности и семантического смысла. Каждый этап миграции характеризуется собственным набором задач и потенциальных рисков.

1. Анализ источников и системы-приемника данных

На начальном этапе выполняется детальное исследование исходных систем и целевого хранилища данных. В рамках данного этапа анализируются логическая и физическая структуры данных, используемые форматы хранения, объемы информации, а также существующие ограничения, связанные с типами данных, ключами, индексами и бизнес-правилами. Особое внимание уделяется выявлению различий между схемами источника и приемника, включая несоответствия в именовании атрибутов, типах данных и правилах их интерпретации. Результаты данного анализа служат основой для построения стратегии обработки и преобразования информации на последующих этапах.

2. Извлечение данных

Этап извлечения данных предполагает получение информации из исходных систем без нарушения их работоспособности и целостности. В зависимости от архитектуры источников данные могут извлекаться пакетным или потоковым способом, а также в полном или инкрементальном режиме. На этом этапе возникают проблемы, связанные с доступностью источников, ограничениями по времени выполнения операций и возможными изменениями данных в процессе миграции. Кроме того, извлеченные данные часто содержат избыточную или нерелевантную информацию, что требует их последующей обработки.

3. Обработка и преобразование данных

Обработка и преобразование данных является центральным и наиболее критичным этапом миграции. Именно на данном этапе осуществляется приведение данных к требованиям целевой системы хранения. Процедуры обработки включают очистку данных от ошибок и дубликатов, заполнение пропущенных значений, нормализацию форматов, агрегацию и декомпозицию данных, а также применение бизнес-правил преобразования. Дополнительно может выполняться сопоставление атрибутов и семантическое выравнивание данных между источником и приемником. Ошибки или неточности на данном этапе приводят к искажению информации и могут негативно сказаться на дальнейшей аналитической и операционной деятельности, что делает данный этап ключевым с точки зрения качества миграции.

4. Загрузка данных в систему-приемник

После завершения обработки данные загружаются в целевое хранилище. Данный этап требует учета особенностей архитектуры системы-приемника, включая требования к производительности, ограничения на объемы загрузки и механизмы обеспечения транзакционной целостности. При загрузке могут использоваться различные стратегии, такие как пакетная загрузка, параллельная обработка или поэтапное наполнение хранилища. Некорректная организация данного этапа может привести к частичной загрузке данных, нарушению связей между сущностями или снижению производительности системы.

5. Верификация и контроль качества данных

Заключительным этапом является верификация результатов миграции и контроль качества данных. На данном этапе проводится проверка полноты и корректности перенесенной информации, сопоставление объемов данных до и после миграции, а также контроль логической и ссылочной целостности. Дополнительно могут выполняться выборочные проверки бизнес-показателей и тестирование прикладных сценариев работы с данными. Верификация позволяет выявить ошибки, допущенные на предыдущих этапах, и при необходимости скорректировать процедуры обработки данных.

При анализе проблем обработки информации в процессе миграции данных необходимо ввести ряд методологических ограничений, позволяющих сузить предмет исследования и обеспечить корректность получаемых выводов. В рамках данной статьи рассматривается сценарий единоразовой (one-time) миграции данных, осуществляемой при переходе между информационными системами или хранилищами данных нового поколения. Такой подход характерен для задач модернизации инфраструктуры, смены технологической платформы или консолидации разнородных источников данных.

Дополнительно предполагается, что в процессе миграции используются многовариационные хранилища данных, поддерживающие различные модели представления информации, включая реляционные, колоночные, документоориентированные и аналитические структуры. В рамках рассматриваемого процесса осуществляется перенос не только самих данных, но и сопутствующих метаданных, таких как схемы данных, справочники, словари значений, описания связей и бизнес-правила обработки информации. Это существенно усложняет задачи обработки данных и расширяет спектр возникающих проблем.

Следует отметить, что использование нескольких разнородных хранилищ данных порождает широкий круг проблем, связанных с различиями в архитектуре,

Данные		Триггеры	
Схемы данных		Представления (View)	
Метаданные		Материализованные представления (Materialized View)	
Методы обработки данных		Справочники и словари данных	
Функции		Ограничения и правила целостности	

Рис 1. Переносимые элементы в рамках миграции больших данных

поддерживаемых типах данных, методах обработки и ограничениях на использование ресурсов. Полный анализ всех возможных проблем в рамках одной статьи представляется затруднительным. В связи с этим в настоящем исследовании рассматриваются основные и наиболее характерные проблемы обработки информации, оказывающие наибольшее влияние на корректность и эффективность миграции данных в условиях использования многовариационных хранилищ.

Проблема 1. Различия в поддерживаемых типах данных и моделях хранения

Одной из существенных проблем обработки информации при миграции является наличие различных

типов данных и моделей их представления в системах-источниках и системах-приемниках. Хранилища данных могут поддерживать различные наборы типов, включая примитивные, составные, вложенные и специализированные типы, что приводит к необходимости дополнительного преобразования данных. Методы обработки, корректно применимые к данным в одном хранилище, могут оказаться неприменимыми или неэффективными в другом вследствие различий в форматах хранения, механизмах сериализации и правилах интерпретации данных.

В результате возникает необходимость адаптации или переопределения процедур обработки информа-

ции с учетом особенностей целевой системы, что увеличивает сложность миграции и повышает риск возникновения ошибок на этапе преобразования данных.

Проблема 2. Ограниченная переносимость методов обработки данных

Методы обработки данных, применяемые в процессе миграции, как правило, тесно связаны не только с вычислительной платформой, но и с внутренними механизмами конкретного хранилища данных. Даже при использовании формально схожих операций, таких как фильтрация, агрегация или работа с текстовыми данными, реализация и поведение соответствующих методов могут существенно различаться в разных системах хранения.

Например, методы обработки текстовых данных, реализованные в реляционных системах управления базами данных, могут опираться на иные принципы индексирования, кодирования и сопоставления строк по сравнению с аналитическими колоночными хранилищами. В результате операции, корректно и эффективно выполняемые в одном хранилище, могут демонстрировать иное поведение, снижение производительности либо вообще отсутствовать в другом.

Данная проблема усугубляется при использовании многовариационных хранилищ, где в рамках одного процесса миграции задействуются несколько систем с различными наборами поддерживаемых функций и методов обработки. Чем больше количество таких хранилищ, тем выше вероятность того, что отдельные методы обработки данных будут работать по-разному либо не будут поддерживаться целевой системой вообще. Это приводит к необходимости переопределения логики обработки данных, разработки альтернативных алгоритмов или применения дополнительных этапов преобразования информации.

Проблема 3. Сбои и ошибки, связанные с обработкой больших объемов данных

Работа с большими объемами данных и сложными преобразованиями существенно повышает вероятность возникновения ошибок, связанных с нехваткой вычислительных ресурсов, превышением лимитов памяти, временными задержками и обрывами соединений с источниками или приемниками данных. Такие сбои могут происходить как на этапе извлечения, так и в процессе обработки информации.

В условиях единократной миграции повторное выполнение всех этапов обработки данных является крайне нежелательным, так как оно требует значительных временных и вычислительных затрат. В связи с этим воз-

никает необходимость использования промежуточных хранилищ, позволяющих сохранять результаты частично выполненной обработки и продолжать миграцию с точки прерывания, а не начинать процесс заново.

Проблема 4. Особенности извлечения данных из нестандартных источников

Дополнительные сложности возникают в тех случаях, когда источником данных выступают системы, не предназначенные для предоставления данных через формализованные интерфейсы, такие как API. Примером таких источников могут служить корпоративные порталы, внутренние информационные системы или пользовательские приложения, которые одновременно подвергаются модернизации или миграции.

В подобных условиях процесс извлечения данных может быть нестабильным и подверженным изменениям структуры и форматов информации. Это приводит к необходимости дополнительной обработки данных, включая адаптацию методов извлечения и обеспечение устойчивости к изменениям источника в процессе миграции.

Проблема 5. Ограниченность вычислительных ресурсов при миграции больших данных

При миграции больших объемов данных существенной проблемой обработки информации является ограниченность вычислительных и системных ресурсов исходных хранилищ. В большинстве практических сценариев системы-источники продолжают использоваться в штатном режиме другими сотрудниками и прикладными сервисами, что накладывает жесткие ограничения на допустимую нагрузку, создаваемую процессами миграции.

В условиях совместного использования ресурсов выделение достаточных вычислительных мощностей для выполнения операций извлечения и обработки данных оказывается затруднительным. Интенсивные запросы, сложные преобразования и длительные операции чтения могут негативно сказаться на производительности рабочих процессов, что ограничивает возможности применения ресурсоемких методов обработки информации в рамках миграции [6, 7]. В результате процедуры миграции вынужденно адаптируются к доступному объему ресурсов, что может приводить к увеличению времени обработки данных и усложнению логики преобразований [9,10].

Дополнительные сложности возникают при миграции больших данных, требующих параллельной обработки и значительных объемов оперативной памяти. Недостаток ресурсов может приводить к прерыванию операций, увеличению времени отклика систем и воз-

никновению ошибок выполнения. В таких условиях особое значение приобретает планирование использования ресурсов и выбор методов обработки информации, минимизирующих нагрузку на системы-источники [6, 14].

В настоящее время в научной и прикладной литературе представлено значительное количество подходов и решений, направленных на организацию процессов миграции больших данных. Наиболее распространенными среди них являются концепции ETL (Extract, Transform, Load) и ELT (Extract, Load, Transform), широко применяемые при переносе данных между различными информационными системами и хранилищами данных.

ETL-подход предполагает предварительное извлечение данных из источников с последующим выполнением операций обработки и преобразования, после чего данные загружаются в систему-приемник. Такой подход традиционно используется при построении хранилищ данных и ориентирован на обеспечение высокого качества информации за счет выполнения преобразований до момента загрузки. В свою очередь, ELT-подход переносит акцент на использование вычислительных возможностей целевого хранилища, где преобразование данных осуществляется уже после их загрузки. Данный подход особенно актуален в условиях современных аналитических платформ, обладающих высокой производительностью и масштабируемостью [6–8, 14].

Несмотря на широкое распространение указанных подходов, большинство существующих решений носят достаточно абстрактный характер и ориентированы преимущественно на описание общих этапов миграции данных. Как правило, такие решения не учитывают в явном виде проблемы, возникающие при обработке информации в условиях использования разнородных хранилищ, различий в поддерживаемых типах данных, ограниченной переносимости методов обработки, а также рисков, связанных с ресурсными ограничениями и сбоями в процессе миграции больших объемов данных [9–10].

В результате практическая реализация миграции данных в сложных инфраструктурах требует значительной адаптации существующих подходов и разработки дополнительных механизмов обработки информации. Особенно это актуально для сценариев единократной миграции, где отсутствует возможность многократной итеративной корректировки процессов, а ошибки обработки данных могут привести к существенным затратам времени и ресурсов.

В связи с этим в рамках данной статьи предлагаются одни из возможных решений, направленные на устранение и минимизацию проблем обработки информации, выявленных на предыдущих этапах исследования.

Рассматриваемые решения ориентированы на повышение устойчивости процессов миграции, обеспечение корректности обработки данных и снижение рисков, связанных с использованием многовариационных хранилищ и большими объемами обрабатываемой информации [1, 2, 11].

Дальнейшее изложение будет посвящено детальному рассмотрению предлагаемых решений и их применению для устранения конкретных проблем обработки информации при миграции данных.

Проблема 1. Различия в поддерживаемых типах данных и моделях хранения

Для решения проблемы различий в поддерживаемых типах данных и моделях хранения при миграции больших данных необходимо на этапе планирования и выполнения миграции оперировать исключительно теми типами данных и структурами, которые поддерживаются как системой-источником, так и системой-приемником. В большинстве практических случаев базовые, примитивные типы данных совпадают между различными хранилищами, что позволяет осуществлять их перенос без существенных преобразований. Однако наибольшие сложности возникают при работе с непримитивными и составными структурами данных, такими как массивы, списки, вложенные структуры и пользовательские типы [1, 2, 5].

В подобных ситуациях требуется проведение анализа поддерживаемых типов данных в обоих хранилищах и поиск структурно и семантически близких аналогов. Преобразование таких данных часто требует дополнительной логики конвертации, включая изменение форматов хранения, разбиение сложных структур на более простые элементы или, напротив, агрегацию данных для соответствия требованиям целевой системы. Ошибки на данном этапе могут привести к потере части информации или нарушению ее интерпретации.

Наиболее существенные трудности связаны не столько с типами данных, сколько с различиями в моделях хранения данных. Даже при сравнении формально схожих объектов, таких как материализованные представления в различных хранилищах, различия в принципах их реализации могут быть принципиальными. Например, в аналитических колоночных хранилищах используются дополнительные механизмы агрегации и обработки состояний, которые не имеют прямых аналогов в классических реляционных системах. В таких случаях стандартные методы миграции оказываются неприменимыми, и требуется ручной анализ поведения соответствующих механизмов, а также разработка альтернативных способов хранения и обработки данных в целевой системе [6, 7, 14].

Использование специализированных механизмов обработки, таких как промежуточные состояния агрегации и их последующее объединение, дополнительно усложняет процесс миграции, поскольку требует глубокого понимания внутренней логики работы хранилища-источника. Поиск эквивалентных решений в системе-приемнике часто возможен лишь на уровне логики обработки данных, а не на уровне прямого переноса структур.

Таким образом, чем больше различий выявляется в поддерживаемых типах данных и моделях хранения, тем выше сложность и продолжительность процесса миграции больших данных. Учет данных факторов на этапе обработки информации является необходимым условием для обеспечения корректности и завершенности миграции [10, 15].

Проблема 2. Ограниченная переносимость методов обработки данных

Для решения проблемы ограниченной переносимости методов обработки данных при миграции необходимо на этапе подготовки и выполнения миграции оперировать явным перечнем методов и функций, поддерживаемых каждым из используемых хранилищ данных. В отличие от типов данных, методы обработки информации значительно сильнее зависят от внутренней реализации конкретной системы хранения и не обладают универсальной совместимостью.

На практике единственным возможным подходом к решению данной проблемы является детальный анализ официальной документации хранилищ данных и сопоставление используемых методов обработки. Такой анализ включает проверку наличия аналогичных функций, сопоставление входных параметров, типов возвращаемых значений, а также особенностей поведения методов в граничных и нестандартных ситуациях. Даже при совпадении наименований функций различия в их реализации могут приводить к отличиям в результатах обработки данных.

Дополнительные сложности возникают при использовании пользовательских функций (User-Defined Functions, UDF). В подобных случаях методы обработки данных могут быть реализованы вне стандартного набора функций хранилища и не иметь формализованного описания. Отсутствие или недостаточная полнота документации по UDF существенно затрудняет их перенос и адаптацию в рамках миграции данных.

Ситуация усложняется тем, что разработчик, выполняющий миграцию, не всегда является автором используемых UDF. В таких условиях анализ логики пользовательских функций требует изучения исходного кода,

выявления зависимостей от конкретных методов хранилища и оценки возможности воспроизведения аналогичного поведения в целевой системе. При невозможности прямого переноса UDF возникает необходимость разработки альтернативных методов обработки данных, что увеличивает трудоемкость и продолжительность миграции.

Таким образом, ограниченная переносимость методов обработки данных обусловлена как различиями в стандартных функциях хранилищ, так и сложностями, связанными с использованием пользовательских функций. Учет данных факторов является обязательным при проектировании процедур обработки информации и выборе решений для миграции больших данных.

Проблема 3. Сбои и ошибки, связанные с обработкой больших объемов данных

При миграции больших объемов данных между архитектурно различающимися системами хранения возникает принципиальная проблема, заключающаяся в невозможности прямой загрузки данных из хранилища-источника в хранилище-приемник без использования дополнительного промежуточного слоя. В случае кардинальных различий архитектур, моделей хранения и механизмов обработки данных попытка прямого переноса информации приводит к высокой вероятности сбоев, потере данных либо некорректному результату миграции [9, 10, 15].

Такая ситуация характерна, например, при переносе данных из реляционной системы хранения в аналитическое колоночное хранилище. В системе-источнике данные могут обрабатываться с использованием транзакционных механизмов, сложных связей и пользовательских функций, тогда как система-приемник ориентирована на пакетную загрузку, агрегацию и аналитические операции. В подобных условиях выполнение прямых операций извлечения, преобразования и загрузки данных становится затруднительным или невозможным без предварительного приведения информации к универсальному формату.

В связи с этим возникает необходимость использования компромиссного промежуточного решения, обеспечивающего разделение этапов обработки данных и их последующей загрузки. Промежуточное хранилище выполняет роль нейтрального слоя, позволяющего зафиксировать результаты преобразований и обеспечить устойчивость миграционного процесса к сбоям и архитектурным ограничениям целевого хранилища.

В качестве промежуточного хранилища могут использоваться объектные системы хранения данных, такие как S3-совместимые хранилища, обладающие мини-

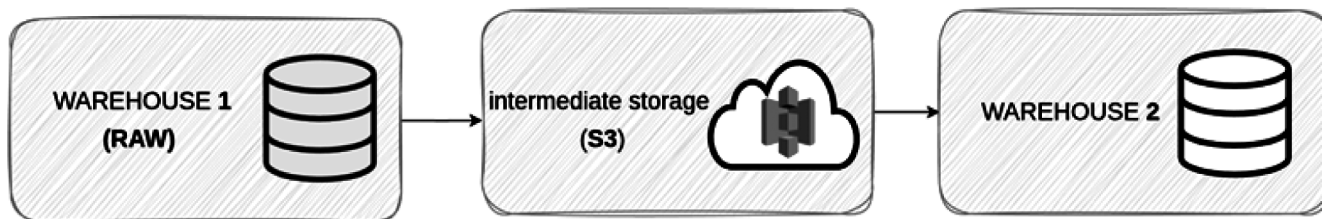


Рис. 2. Использование промежуточного хранилища S3

мальными ограничениями на типы и структуры данных. Подобные хранилища способны принимать и хранить данные в различных форматах без привязки к конкретной модели обработки или типу хранилища. Это делает их универсальным механизмом для аккумуляции преобразованных данных и последующей загрузки в систему-приемник.

Использование промежуточного хранилища позволяет:

- обеспечить корректное завершение этапов обработки данных независимо от состояния хранилища-приемника;
- минимизировать влияние архитектурных различий между системами хранения;
- снизить риск загрузки несогласованных или частично обработанных данных;
- упростить процедуры восстановления и повторного запуска миграции в случае сбоев.

Таким образом, при миграции больших данных между архитектурно разнородными хранилищами использование промежуточного компромиссного хранилища является не просто рекомендательным, а необходимым условием обеспечения корректности и завершенности процесса обработки информации.

Проблема 4. Особенности извлечения данных из нестандартных источников

Отдельную группу проблем при обработке информации в процессе миграции данных составляют особенности извлечения данных из нестандартных источников. В отличие от классических сценариев, где источником данных выступают хранилища, предоставляющие формализованные интерфейсы доступа (например, API или прямое подключение к базе данных), в ряде практических случаев информация может находиться в системах, не предназначенных для автоматизированного извлечения данных.

К таким источникам относятся, в частности, корпоративные порталы, внутренние информационные системы и веб-приложения, доступ к которым ограничен и осуществляется исключительно через пользовательский веб-интерфейс. В подобных условиях прямой доступ к данным отсутствует, что делает невозможным применение

стандартных методов миграции и требует использования альтернативных подходов извлечения информации.

В качестве одного из таких подходов применяются экранные роботы, реализующие автоматизированное взаимодействие с пользовательским интерфейсом системы-источника. Процесс извлечения данных в этом случае включает анализ структуры веб-страниц, выявление элементов, содержащих целевую информацию, и последующий парсинг данных. Извлеченная информация загружается во временное или промежуточное хранилище, после чего может быть использована в рамках основного процесса миграции, описанного ранее.

Данный сценарий характеризуется повышенной сложностью и нестабильностью, поскольку структура веб-интерфейса может изменяться без предварительного уведомления, а извлечение данных зависит от корректной интерпретации визуальных и структурных элементов страницы. Кроме того, процесс экранного извлечения, как правило, менее производителен по сравнению с использованием формализованных интерфейсов доступа к данным.

Особый интерес представляет тот факт, что на текущий момент отсутствуют автоматизированные гибридные методы, способные динамически определять оптимальный способ извлечения данных в зависимости от характеристик источника. В частности, не существует универсальных решений, которые могли бы автоматически выявлять наличие API и использовать его при возможности, либо переходить к методам экранного извлечения в случае отсутствия формализованных интерфейсов.

Указанное ограничение открывает перспективы для дальнейших исследований, направленных на разработку интеллектуальных гибридных методов извлечения данных, способных адаптивно выбирать стратегию миграции в зависимости от типа и свойств источника информации.

Проблема 5. Ограниченность вычислительных ресурсов при миграции больших данных

При миграции больших объемов данных основная вычислительная нагрузка, как правило, возникает на этапе выполнения операций обработки информации, таких как фильтрация, агрегация, сортировка и преоб-

разование данных. Именно данные операции требуют значительных вычислительных ресурсов и оказывают наибольшее влияние на производительность системы-источника.

Современные хранилища данных, особенно ориентированные на аналитические или транзакционные нагрузки, не всегда обладают возможностью эффективного распараллеливания выполнения подобных операций в контексте миграции. В ряде случаев архитектура хранилища или его конфигурация ограничивает масштабирование вычислений, что приводит к увеличению времени обработки данных и росту нагрузки на систему. Дополнительной проблемой является тот факт, что выполнение ресурсоемких операций обработки непосредственно в исходном хранилище может существенно ограничить доступ к вычислительным ресурсам для других пользователей и прикладных сервисов. В результате другие запросы могут выполняться с задержками либо вовсе быть отклонены.

В связи с указанными ограничениями на практике широко применяются внешние инструменты обработки больших данных, такие как распределенные вычислительные платформы, позволяющие выносить основную нагрузку за пределы системы-источника. Использование подобных инструментов дает возможность извлекать данные из исходного хранилища, выполнять над ними операции обработки и преобразования во внешней среде, а затем передавать результаты в промежуточное или целевое хранилище.

Одним из наиболее распространенных решений данного класса являются распределенные вычислительные фреймворки, обеспечивающие работу с внутренними структурами данных и предоставляющие механизмы оптимизации вычислений за счет параллельной обработки. Применение таких инструментов позволяет существенно снизить нагрузку на исходное хранилище и повысить масштабируемость процессов обработки информации при миграции больших данных.

В то же время использование внешних вычислительных платформ также имеет определенные ограничения. В отдельных случаях в таких системах могут отсутствовать специализированные методы обработки данных, доступные в исходном хранилище. Хотя подобные ситуации являются маловероятными и большинство базовых и расширенных операций обработки, как правило, поддерживаются, данный фактор должен учитываться при проектировании процесса миграции.

На практике это приводит к архитектуре, в которой данные извлекаются из исходного хранилища, обрабатываются во внешнем инструменте обработки больших данных, а затем загружаются в промежуточное хранилище, откуда осуществляется их дальнейшая передача

в целевую систему. Такой подход позволяет оптимизировать использование вычислительных ресурсов, минимизировать влияние миграции на рабочие процессы и повысить устойчивость обработки информации.

В рамках данной работы были рассмотрены основные проблемы обработки информации, возникающие в процессе миграции больших данных между разнородными хранилищами. Проведенный анализ показал, что различия в поддерживаемых типах данных и моделях хранения, ограниченная переносимость методов обработки, нестабильность выполнения операций при больших объемах данных, особенности извлечения информации из нестандартных источников, а также ограниченность вычислительных ресурсов существенно усложняют процессы миграции и требуют комплексного подхода к их решению.

Рассмотренные в статье подходы и решения позволяют повысить устойчивость и управляемость процессов обработки информации при миграции данных, однако не обеспечивают полной гарантии успешного завершения миграции. Даже при использовании промежуточных хранилищ, внешних инструментов обработки и адаптации методов преобразования данных сохраняется вероятность возникновения дополнительных проблем, обусловленных спецификой конкретных систем хранения, особенностями инфраструктуры и условиями эксплуатации.

Следует отметить, что для выполнения миграций больших данных на практике зачастую требуется оперировать значительным количеством различных хранилищ, каждое из которых обладает собственной архитектурой, набором поддерживаемых типов данных и методов обработки информации. С увеличением числа задействованных хранилищ возрастает и сложность процесса миграции, а также вероятность возникновения новых проблем, не охваченных в рамках настоящего исследования.

В этой связи полученные результаты следует рассматривать как шаг к формированию более универсального подхода к миграции больших данных. Проведенное исследование позволяет обосновать целесообразность дальнейших работ, направленных на разработку гибридного адаптивного метода, способного динамически учитывать особенности источников данных, выбирать оптимальные способы извлечения и обработки информации, а также обеспечивать эффективную и устойчивую миграцию данных в условиях разнородных хранилищ.

Таким образом, представленное исследование формирует основу для дальнейшего развития методов миграции больших данных и может быть использовано как теоретическая и практическая база для создания более интеллектуальных и адаптивных решений в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Date C.J. An Introduction to Database Systems. 8th ed. // Pearson, 2003. 983 p. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/an-introduction-to-database-systems/P200000003415> (дата обращения: 14.01.2025)
2. Elmasri R., Navathe S. B. Fundamentals of Database Systems. 7th ed. // Pearson, 2016. 1272 p. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/fundamentals-of-database-systems/P200000003245> (дата обращения: 14.01.2025)
3. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных = An Introduction to Database Systems. 8-е изд. // М.: Вильямс, 2006. 1328 с. URL: <https://www.ozon.ru/product/vvedenie-v-sistemy-baz-dannyh-v-2-t-komplekt-deyt-k-dzh-1438146150/?at=ywtA5Wk6uEwZ6A7S1BxG15sXnwnmTzrmylGT5ZIP3> (дата обращения: 14.01.2025)
4. Кренке Д. Теория и практика построения баз данных. 10-е изд. = Database Processing: Fundamentals, Design, and Implementation // СПб.: Питер, 2018. 976 с. URL: <https://www.ozon.ru/product/redkaya-kniga-tverdyye-pereplet-teoriya-i-praktika-postroeniya-baz-dannyh-krenke-devid-2317964010/?at=gpt4ZWpNPsy1zp4fqxomocNm44NTOLVRrQs1vJoYp> (дата обращения: 14.01.2025)
5. Кириллов В.В. Основы проектирования реляционных баз данных: учебное пособие // СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 288 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_3a0ac872e9ffd72f928632e4b30104a/?ysclid=mkarq54pbj722922934 (дата обращения: 14.01.2025)
6. Inmon W.H. Building the Data Warehouse. 5th ed. // Wiley, 2019. 576 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=QFKTmh5IFS4C&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 14.01.2025)
7. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. 3rd ed. // Wiley, 2013. 600 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/The+Data+Warehouse+Toolkit%3A+The+Definitive+Guide+to+Dimensional+Modeling%2C+3rd+Edition-p-9781118530801> (дата обращения: 14.01.2025)
8. Кимбалл Р., Росс М. Хранилище данных. Проектирование = The Data Warehouse Toolkit. 2-е изд. // М.: Диалектика, 2020. 576 с. URL: https://books.google.ru/books/about/The_Data_Warehouse_Toolkit.html?id=4rFXzk8wAB8C&redir_esc=y (дата обращения: 14.01.2025)
9. Marz N., Warren J. Big Data: Principles and best practices of scalable realtime data systems // Manning Publications, 2015. 328 p. URL: <https://www.manning.com/books/big-data> (дата обращения: 14.01.2025)
10. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems // O'Reilly Media, 2017. 616 p. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/designing-data-intensive-applications/9781491903063/> (дата обращения: 14.01.2025)
11. Sadalage P.J., Fowler M. NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence // Addison-Wesley Professional, 2012. 192 p. URL: <https://www.informit.com/store/nosql-distilled-a-brief-guide-to-the-emerging-world-9780321826626> (дата обращения: 14.01.2025)
12. Грофф Дж.Р., Вайнберг П.Н., Опелл Э.Дж. SQL: Полное руководство. 3-е изд. = SQL: The Complete Reference // М.: Диалектика, 2021. 960 с. URL: <https://www.ozon.ru/product/sql-polnoe-rukovodstvo-3-e-izd-1147649373/> (дата обращения: 14.01.2025)
13. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks // Communications of the ACM, 1970, Vol. 13, Issue 6, pp. 377–387. URL: <https://doi.org/10.1145/362384.362685> (дата обращения: 14.01.2025)
14. Chaudhuri S., Dayal U. An overview of data warehousing and OLAP technology // ACM Sigmod Record, 1997, Vol. 26, Issue 1, pp. 65–74. URL: <https://doi.org/10.1145/248603.248616> (дата обращения: 14.01.2025)
15. Большие данные. Big Data. Учебник для СПО: Макшанов, Журавлев, Тындыкарь // Лань, 2022 188 с. <https://www.labyrinth.ru/books/795544/?ysclid=mkas40ac8h636323968> (дата обращения: 14.01.2025)

© Баданов Артем Андреевич (artem_badanov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ПРЯМЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В CAD-СИСТЕМАХ

DEVELOPMENT OF METHODS FOR SYSTEM ANALYSIS AND DATA MANAGEMENT IN THE INTEGRATION OF PARAMETRIC AND DIRECT MODELING METHODS IN CAD SYSTEMS

O. Borisova

Summary. The article discusses the development of methods for system analysis and data management in the integration of parametric and direct modeling methods in modern CAD systems. The main problems of joint use of different approaches to geometric modeling are analyzed. A methodology for data integration and design process optimization is proposed. Recommendations for improving project data management systems in hybrid modeling conditions are developed.

Keywords: system analysis, data management, parametric modeling, direct modeling, CAD systems, method integration, design optimization.

Борисова Ольга Алексеевна

кандидат педагогических наук, доцент,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
o.borisova@stankin.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки методов системного анализа и управления данными при интеграции параметрических и прямых методов моделирования в современных CAD-системах. Проанализированы основные проблемы совместного использования различных подходов к геометрическому моделированию. Предложена методология интеграции данных и оптимизации процессов проектирования. Разработаны рекомендации по совершенствованию систем управления проектными данными в условиях гибридного моделирования.

Ключевые слова: системный анализ, управление данными, параметрическое моделирование, прямое моделирование, CAD-системы, интеграция методов, оптимизация проектирования.

Введение

Современные системы автоматизированного проектирования представляют собой сложные программные комплексы, обеспечивающие создание трехмерных моделей изделий различной степени сложности. На протяжении последних десятилетий в области компьютерного моделирования сформировались два основных подхода: параметрическое моделирование, основанное на истории построения и параметрических зависимостях, и прямое моделирование, позволяющее непосредственно манипулировать геометрией без сохранения истории операций [6]. Каждый из этих подходов обладает своими преимуществами и ограничениями, что обуславливает необходимость их комплексного использования в рамках единой проектной среды.

Параметрическое моделирование обеспечивает высокую степень управляемости конструкцией, возможность быстрого внесения изменений через модификацию параметров, а также поддержку ассоциативных связей между различными элементами модели. Однако данный подход требует тщательного планирования последовательности построения, что может затруднять работу с импортированной геометрией или при необхо-

димости внесения локальных изменений. Прямое моделирование, напротив, предоставляет большую гибкость при работе с геометрией, особенно при редактировании моделей без истории построения, но затрудняет внесение системных изменений и управление сложными зависимостями [1].

Интеграция этих двух подходов в рамках единой системы проектирования создает новые возможности для повышения эффективности конструкторской деятельности, однако порождает ряд методологических и технических проблем, связанных с управлением данными, обеспечением целостности модели и оптимизацией процессов проектирования. Актуальность решения данных проблем обусловлена растущими требованиями к скорости разработки изделий, необходимостью обработки больших объемов проектных данных и интеграции CAD-систем с другими компонентами цифрового предприятия [8].

Анализ проблем интеграции параметрических и прямых методов моделирования

Основная сложность совместного использования параметрических и прямых методов моделирования

заключается в принципиально различных подходах к представлению и хранению геометрической информации. Параметрическая модель представляет собой последовательность операций с заданными параметрами и зависимостями, тогда как результат прямого моделирования содержит только итоговую геометрию без информации о способе ее получения. Это создает фундаментальное противоречие при попытке обеспечить единообразное управление гибридными моделями [3].

Важнейшей задачей является разработка методов идентификации и классификации геометрических объектов в условиях гибридного моделирования. Необходимо обеспечить возможность отслеживания изменений, вносимых различными методами, и поддержания целостности модели при переходе между режимами работы. Методы идентификации моделей, разработанные для традиционных систем управления, требуют существенной адаптации для применения в контексте CAD-систем [2].

Существенную проблему представляет управление ассоциативными связями между элементами модели. В параметрической среде такие связи обеспечиваются автоматически через механизм истории построения и параметрических зависимостей. При применении операций прямого моделирования эти связи могут нарушаться, что требует разработки специальных алгоритмов их восстановления или альтернативных механизмов поддержания целостности конструкции. Оптимизация контролей в таких многомерных системах представляет собой сложную задачу, требующую применения современных методов системного анализа [4].

Другим важным аспектом является обеспечение производительности системы при работе с большими объемами данных. Хранение полной истории построения для параметрических моделей требует значительных вычислительных ресурсов, особенно для сложных изделий с большим числом элементов. Интеграция с прямым моделированием может как улучшить, так и ухудшить ситуацию в зависимости от применяемых стратегий управления данными [7].

Методология системного анализа гибридных CAD-систем

Для эффективной интеграции параметрических и прямых методов моделирования необходимо применение системного подхода, рассматривающего CAD-систему как сложную многокомпонентную структуру с множественными взаимосвязями между элементами. Основой такого подхода должна стать структуризация целей и функций системы управления проектными данными, учитывающая специфику обоих методов моделирования [5].

Предлагается следующая методология системного анализа гибридных CAD-систем. На первом этапе осуществляется декомпозиция системы на функциональные подсистемы: подсистему параметрического моделирования, подсистему прямого моделирования, подсистему управления данными, подсистему визуализации и подсистему интеграции. Для каждой подсистемы определяются входные и выходные потоки данных, внутренние состояния и алгоритмы обработки информации.

На втором этапе выполняется анализ взаимодействий между подсистемами с использованием методов теории графов и математического моделирования. Каждое взаимодействие характеризуется типом передаваемых данных, частотой обмена, требованиями к синхронизации и механизмами обеспечения целостности. Численные методы расчета динамических систем управления позволяют оценить устойчивость и производительность системы в различных режимах работы [1].

Третий этап включает разработку формализованной модели управления данными, учитывающей особенности представления геометрической информации в обоих подходах к моделированию. Ключевым элементом такой модели является концепция унифицированного геометрического ядра, способного работать как с параметрическими, так и с явными представлениями геометрии. Методы компьютерного моделирования позволяют верифицировать предложенные решения и оптимизировать параметры системы [6].

Четвертый этап предполагает разработку системы метрик и критериев оценки эффективности гибридного моделирования. К таким метрикам относятся время выполнения типовых операций, объем занимаемой памяти, количество ошибок при переходе между режимами моделирования, степень сохранности ассоциативных связей и другие показатели. Методы получения данных и идентификации моделей должны обеспечивать достоверную оценку этих параметров в процессе эксплуатации системы [3].

Разработка методов управления проектными данными

Эффективное управление проектными данными в условиях гибридного моделирования требует создания многоуровневой архитектуры хранения и обработки информации. Предлагается трехуровневая модель организации данных: уровень геометрического представления, уровень семантической информации и уровень управления версиями и конфигурациями.

На уровне геометрического представления реализуется гибридное хранение данных, сочетающее параме-

трическое описание с явной геометрией. Для каждого элемента модели поддерживается информация о способе его создания, что позволяет при необходимости восстановить параметрические зависимости или перейти к явному представлению. Разработаны алгоритмы автоматического определения оптимального способа представления для каждого элемента на основе анализа паттернов его использования и модификации.

Уровень семантической информации обеспечивает хранение метаданных о назначении элементов модели, их взаимосвязях и ограничениях. Это позволяет поддерживать логическую целостность конструкции независимо от способа ее создания. Разработана онтология проектных данных, обеспечивающая единообразную интерпретацию информации различными компонентами системы. Интеграция анализа данных и автоматизации управленческих решений на этом уровне позволяет повысить эффективность проектирования [8].

Уровень управления версиями и конфигурациями реализует механизмы отслеживания изменений, внесенных в модель различными методами. Предложен алгоритм версионирования, учитывающий специфику параметрических и прямых операций. Для параметрических изменений фиксируется модификация параметров и зависимостей, для прямых операций сохраняется дельта-представление геометрии. Это обеспечивает возможность эффективного отката изменений и анализа истории развития конструкции.

Важным аспектом управления данными является обеспечение консистентности при параллельной работе нескольких пользователей над различными частями модели. Разработан протокол синхронизации, минимизирующий конфликты при одновременном применении параметрических и прямых операций. Протокол основан на анализе зависимостей между элементами модели и использует механизм блокировок с различной степенью детализации.

Оптимизация процессов проектирования в гибридной среде

Оптимизация процессов проектирования при использовании гибридного моделирования должна учитывать сильные стороны каждого из подходов и минимизировать влияние их недостатков. Разработана методика выбора оптимального метода моделирования для конкретной задачи на основе анализа характеристик создаваемой геометрии и требований к дальнейшему использованию модели.

Предложены критерии принятия решения о применении параметрического или прямого моделирования. Параметрический подход рекомендуется использовать

для создания элементов с четко определенными размерными зависимостями, для типовых конструктивных элементов, требующих частых модификаций, а также для геометрии, используемой в параметрических сборках. Прямое моделирование целесообразно применять при работе с импортированной геометрией, для создания нестандартных форм, при необходимости быстрых локальных изменений, а также на ранних стадиях концептуального проектирования.

Разработан алгоритм автоматической конвертации между параметрическим и прямым представлением геометрии. Алгоритм анализирует структуру модели и выявляет паттерны, характерные для параметрического построения, что позволяет при конвертации из прямого представления восстановить часть параметрических зависимостей. Обратная конвертация осуществляется путем вычисления итоговой геометрии с сохранением опционального параметрического описания для возможного будущего использования.

Для повышения производительности системы предложен метод адаптивного кэширования геометрических данных. Метод учитывает частоту обращения к различным элементам модели и приоритизирует хранение в оперативной памяти наиболее востребованных компонентов. Для параметрических элементов кэшируется как описание операций, так и вычисленная геометрия, что позволяет избежать повторных вычислений при изменении параметров.

Разработана система автоматизированного контроля качества гибридных моделей, выявляющая потенциальные проблемы, связанные с некорректным взаимодействием параметрических и прямых элементов. Система анализирует целостность ассоциативных связей, корректность геометрии, наличие избыточных зависимостей и другие характеристики, влияющие на надежность и удобство использования модели.

Практическая реализация и результаты

Разработанные методы были апробированы в рамках экспериментального прототипа системы гибридного моделирования, созданного на базе открытого геометрического ядра. Прототип реализует основные компоненты предложенной архитектуры управления данными и включает средства параметрического и прямого моделирования с возможностью их совместного использования.

Тестирование прототипа проводилось на наборе типовых конструкторских задач различной сложности, включающих создание деталей машиностроения, элементов строительных конструкций и изделий бытовой техники. Оценивалась эффективность работы с гибридными моделями по сравнению с традиционным подходом, использующим только один метод моделирования.

Результаты тестирования показали сокращение времени на внесение изменений в конструкцию в среднем на тридцать пять процентов за счет возможности выбора оптимального метода для каждой конкретной операции. Особенно значительный эффект наблюдался при работе с импортированной геометрией и на этапах концептуального проектирования, где применение прямого моделирования позволило существенно ускорить процесс разработки.

Анализ использования системных ресурсов выявил увеличение потребления памяти на двадцать процентов по сравнению с чисто параметрическим подходом из-за необходимости хранения дополнительной информации о геометрии. Однако применение разработанных методов адаптивного кэширования позволило минимизировать влияние этого фактора на производительность при работе с моделями средней сложности.

Оценка качества создаваемых моделей показала высокую степень сохранности ассоциативных связей при переходах между режимами моделирования. В восьмидесяти процентах случаев система автоматически поддерживала целостность модели, в остальных случаях пользователю предоставлялись рекомендации по устранению выявленных несоответствий.

Заключение

Разработанные методы системного анализа и управления данными обеспечивают эффективную интеграцию

параметрических и прямых методов моделирования в рамках современных CAD-систем. Предложенная методология базируется на комплексном подходе к организации проектных данных, учитывающем специфику обоих методов моделирования и обеспечивающем их органичное взаимодействие.

Ключевыми результатами исследования являются разработка трехуровневой архитектуры управления проектными данными, создание алгоритмов конвертации между различными представлениями геометрии, формирование методики выбора оптимального метода моделирования для конкретных задач и реализация системы автоматизированного контроля качества гибридных моделей.

Практическая апробация подтвердила эффективность предложенных решений и их применимость для повышения производительности конструкторской деятельности. Дальнейшие направления исследований включают совершенствование алгоритмов автоматического распознавания параметрических зависимостей в явной геометрии, разработку методов машинного обучения для интеллектуальной поддержки выбора метода моделирования, а также интеграцию гибридных CAD-систем с технологиями виртуальной и дополненной реальности для повышения эффективности проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никоноров А.Н., Елисеев В.В. Численные методы расчета динамических систем управления: идентификация, моделирование, оптимизация // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXIII Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию Российской атомной промышленности. В 3-х томах. Иваново, 2025. С. 27–30.
2. Шорников Ю.В., Тимофеев К.А. Моделирование транспортных потоков методом системной динамики // Системы анализа и обработки данных. 2024. № 1 (93). С. 41–52.
3. Билятдинов К.З., Кривчун Е.А., Карпов А.Н. Методы получения данных, идентификации моделей и совершенствования управления организационными системами на основе экспертной информации // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 1. С. 67–77.
4. Кокунов А.А., Таганов А.И. Задача оптимизации контролей в многомерных алгоритмических процессах информационных систем // Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2024. С. 372–378.
5. Семенова К.А. Сравнительный анализ методик структуризации целей и функций систем управления // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Сборник научных трудов. Москва, 2024. С. 3841–3845.
6. Меретукова С.К., Чундышко В.Ю., Сапиев А.З. Методы компьютерного моделирования как основа организации сложных систем // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения. Сборник материалов VII Всероссийской научной конференции с международным участием. Тольятти, 2024. С. 150–157.
7. Шушкин И.А., Микаева С.А., Журавлева Ю.А. Математические модели для анализа больших данных в информационных системах: проблемы, методы и инструменты // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех — 2024). Международная научно-техническая конференция. Москва, 2024. С. 761–766.
8. Забайкин Ю.В., Барыкин М.В. Разработка методологии интеграции анализа данных и автоматизации управленческих решений для повышения производительности и снижения издержек на промышленных предприятиях // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Т. 14. № 7-1. С. 596–605.

© Борисова Ольга Алексеевна (o.borisova@stankin.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CYBERSECURITY SYSTEMS

**N. Verezubova
O. Yakovleva
N. Sakovich**

Summary. The rapid adoption of artificial intelligence (AI) technologies is fundamentally transforming the cybersecurity landscape, creating a paradoxical situation. On the one hand, AI has become an indispensable tool for defenders, allowing them to automate threat detection, analyze behavioral anomalies, and promptly respond to incidents in the face of huge amounts of data. On the other hand, these same technologies are actively used by hackers to create sophisticated phishing attacks, generate polymorphic malware and produce convincing deepfakes, which significantly reduces the threshold for entry into cybercrime and increases the effectiveness of attacks. The relevance of the research is due to the need to understand this dual nature of AI and develop strategies that would maximize the protective potential of the technology while minimizing the risks associated with it. The purpose of the article is to analyze the security problems generated and exacerbated by AI, and to develop a comprehensive adaptive protection model based on them. As an author's development, the concept of an integrated cybersecurity platform based on the principles of machine learning security, hybrid human-machine analytics and proactive data privacy protection is proposed. The practical significance of the work lies in structuring a step-by-step approach to building systems resistant to modern threats, balancing technological efficiency and ethical and legal requirements.

Keywords: artificial intelligence, cybersecurity, adaptive protection, data privacy, data protection.

Вереzubова Наталья Афанасьевна

Кандидат экономических наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
nverez@mail.ru

Яковлева Ольга Анатольевна

Кандидат с/х наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
yakovleffo@yandex.ru

Сакович Наталия Евгениевна

Доктор технических наук, доцент, Брянский государственный аграрный университет
nasa2610@mail.ru

Аннотация. Стремительное внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) коренным образом трансформирует ландшафт кибербезопасности, создавая парадоксальную ситуацию. С одной стороны, ИИ стал незаменимым инструментом для защитников, позволяя автоматизировать обнаружение угроз, анализировать поведенческие аномалии и оперативно реагировать на инциденты в условиях огромных массивов данных. С другой — эти же технологии активно используются злоумышленниками для создания изощренных фишинговых атак, генерации полиморфного вредоносного ПО и производства убедительных дипфейков, что значительно снижает порог входа в киберпреступность и повышает эффективность атак. Актуальность исследования обусловлена необходимостью осмысления этой двойственной природы ИИ и выработки стратегий, которые позволили бы максимизировать защитный потенциал технологии при одновременной минимизации связанных с ней рисков. Целью статьи является анализ проблем безопасности, порождаемых и обостряемых ИИ, и разработка на их основе комплексной модели адаптивной защиты. В качестве авторской разработки предлагается концепция интегрированной платформы кибербезопасности, основанной на принципах безопасности машинного обучения, гибридной человеко-машинной аналитики и проактивной защиты конфиденциальности данных. Практическая значимость работы заключается в структурировании поэтапного подхода к построению устойчивых к современным угрозам систем, балансирующих между технологической эффективностью и этико-правовыми требованиями.

Ключевые слова: искусственный интеллект, кибербезопасность, адаптивная защита, конфиденциальность данных, защита данных.

Введение

Цифровая эпоха привела к экспоненциальному росту поверхности атаки предприятий, превратив кибербезопасность в задачу по обработке сотен миллиардов сигналов, которая уже не может быть решена исключительно человеческими силами. В этот пере-

ломный момент искусственный интеллект выступает как катализатор перемен, кардинально меняя баланс сил в цифровом пространстве. Однако его роль далеко не однозначна. Если для специалистов по защите ИИ — это мощный инструмент, способный к предиктивной аналитике и автоматизации рутинных операций, то для злоумышленников он стал универсальным инструмен-

том для масштабирования и усложнения атак [2, 6]. Генеративные модели, такие как большие языковые модели (LLM), стирают границу между реальным и сгенерированным контентом, что несет фундаментальные риски для целостности информации и может провоцировать серьезные социальные и дипломатические кризисы [1, 3, 8]. Таким образом, современный этап характеризуется переходом от дискуссий о потенциальных угрозах к необходимости управления реальными, материализовавшимися рисками. Актуальность данного исследования продиктована необходимостью преодоления фрагментарного подхода к безопасности ИИ. Проблемы часто рассматриваются изолированно: либо как технические уязвимости моделей, либо как вопросы нормативного регулирования. Однако реальный вызов заключается в их системной взаимосвязи. Атака на обучающие данные может привести к утечке коммерческой тайны, а усовершенствованный фишинг с помощью ИИ обнуляет инвестиции в обучение сотрудников, если не интегрирован в общую стратегию защиты [3, 6]. Поэтому актуальным становится поиск целостных моделей, объединяющих технологические, процессные и человеческие аспекты. Цель статьи — провести комплексный анализ дуалистической природы применения ИИ в кибербезопасности, выявить системные проблемы на стыке технологий, данных и человеческого фактора, а также разработать и обобщить модель построения адаптивной системы защиты.

Материалы и методы исследования

Методологическую основу исследования составил многоуровневый анализ, сочетающий изучение технологических трендов, нормативных инициатив и практических кейсов. Для выявления глобальных тенденций и прогнозов на 2025 год были проанализированы отраслевые обзоры и экспертные мнения, опубликованные ведущими компаниями в сфере кибербезопасности (такими как ESET) и ИТ-сектора. Особое внимание было уделено материалам профессиональных дискуссий, в частности, итогам круглого стола «Современные вызовы в безопасности AI», прошедшего в рамках Kazan Digital Week 2025, где экспертами обсуждались конкретные уязвимости и методологии защиты. Вторым, практический блок метода, включал кейс-анализ конкретных технологий и инцидентов. На основе синтеза полученных данных методом системного проектирования была разработана авторская концепция интегрированной платформы, вбирающая в себя лучшие практики и направленная на устранение выявленных системных противоречий.

Результаты и обсуждения

Проведенный анализ позволил систематизировать несколько взаимосвязанных групп проблем, формирующих современный комплекс угроз в области использования ИИ в кибербезопасности.

Первая группа проблем — технологическая дуальность и усиление атак. Наиболее очевидной проблемой является использование преступниками тех же инструментов, что и у защитников. Генеративный ИИ радикально повысил эффективность социальной инженерии. С помощью языковых моделей создаются персонализированные фишинговые письма без грамматических ошибок, имитирующие стиль коллег или руководителей. Дипфейк-технологии позволяют генерировать поддельные аудио- и видеосообщения для обмана систем биометрической аутентификации или мошеннических звонков [3]. Более того, ИИ используется для автоматизации создания вредоносного ПО, способного динамически изменять свой код (полиморфизм), чтобы избежать обнаружения сигнатурными методами. Также развиваются атаки на сами ИИ-системы, такие как «отравление данных» (внесение искажений в наборы для обучения) и «джейлбрейк» (обход этических и safety-ограничений модели для получения запрещенной информации) [6, 7, 11].

Другая группа проблем — уязвимости данных и конфиденциальности. ИИ-системы, особенно в корпоративном контексте, становятся новыми критически важными активами и одновременно — новыми векторами атаки. Как отмечают эксперты, модель, обученная на уникальных корпоративных данных, сама по себе несет угрозу утечки конфиденциальной информации, коммерческой тайны или персональных данных. Риск возникает на всех этапах: при сборе и подготовке данных, в процессе обучения модели (когда злоумышленник может попытаться извлечь сведения) и в ходе эксплуатации, через специально сформулированные промпты. Проблема усугубляется практикой сотрудников, которые могут неосознанно загружать конфиденциальные документы в публичные ИИ-сервисы для анализа, что ведет к непреднамеренному раскрытию информации [5, 10].

Также необходимо рассмотреть операционные и кадровые вызовы. Внедрение ИИ в SOC (Security Operations Center) не отменяет, а трансформирует роль человека. Возникает проблема эффективного человеко-машинного взаимодействия. С одной стороны, ИИ великолепно справляется с обработкой больших объемов данных и первичным анализом, освобождая аналитиков от рутины. С другой — сохраняется риск избыточной зависимости от «черного ящика» алгоритмов, ложного чувства безопасности и, как следствие, деградации экспертных навыков у специалистов [8, 9]. Необходимы новые компетенции: способность «допрашивать» модель, понимать принципы ее работы, интерпретировать и проверять ее выводы. Как подчеркивают в «Лаборатории Касперского», построением комплексных систем защиты по-прежнему должны заниматься профессионалы, способные корректно интегрировать ИИ-инструменты в существующие процессы [4].

По результатам исследования была предложена целостная концепция построения системы безопасности, основанная на трех фундаментальных принципах: безопасность жизненного цикла ИИ (MLSecOps), гибридный интеллект и проактивная защита данных.

Ядром концепции является внедрение практик MLSecOps — методологии, которая распространяет принципы безопасной разработки (DevSecOps) на полный жизненный цикл машинного обучения. Это подразумевает непрерывный мониторинг и безопасность на всех этапах: от управления версиями и целостности обучающих данных, через безопасное проведение экспериментов с моделями, до контроля качества и устойчивости развернутых моделей к враждебным атакам [6]. Предлагаемая концепция предполагает создание технологического контура, где каждая модель перед внедрением проходит тестирование не только на точность, но и на устойчивость к попыткам манипуляции ее выводами или извлечения данных.

Второй элемент — архитектура гибридного интеллекта для SOC. В рамках предложенной концепции ИИ выступает не как замена аналитика, а как его «второй пилот» или сильный ассистент [3, 5]. Система строится по принципу взаимного контроля: ИИ обрабатывает потоки телеметрии, выявляет аномалии, кластеризует инциденты и предлагает гипотезы и варианты реагирования. Человек-аналитик выполняет функцию валидатора, стратега и принимает финальные решения на основе контекста, недоступного машине (например, знаний о политических мотивах атаки или внутренних бизнес-процессах). Такое разделение труда позволяет, как в случае с Kaspersky MDR, значительно снизить нагрузку на специалистов, фильтруя ложные срабатывания, и одновременно сохранить человеческий контроль над критическими решениями [4].

Третья составляющая — инфраструктура проактивной защиты данных для ИИ. Предлагаемая концепция предлагает встроить защиту конфиденциальности в сам процесс работы с данными для ИИ. Это включает [6]:

- строгую сегментацию и управление доступом к корпоративным данным, используемым для обучения или запрашиваемых моделями в режиме RAG (Retrieval-Augmented Generation). LLM-агент не должен иметь неограниченного доступа ко всей корпоративной базе знаний; его права должны соответствовать принципу минимальных привилегий;
- применение методов дифференциальной приватности и федеративного обучения там, где это возможно, чтобы минимизировать риски утечки исходных данных;
- обязательный аудит всех запросов к внешним и внутренним ИИ-сервисам для предотвращения

утечек через промпты сотрудников. Организация должна иметь четкую политику, определяющую, какие данные можно обрабатывать в публичных облачных ИИ, а какие — только в изолированных, локальных контурах.

Реализация предлагаемой концепции носит итеративный характер. Она начинается с аудита существующих ИИ-активов и потоков данных, продолжается через пилотные проекты по внедрению MLSecOps-практик для наиболее критичных моделей и построения пилотного гибридного центра мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности, и завершается интеграцией этих компонентов в единую управляемую платформу с общим интерфейсом и скоординированными процессами реагирования.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что искусственный интеллект стал не просто новым инструментом в арсенале кибербезопасности, а фактором, формирующим принципиально новую, более сложную и динамичную среду цифровых угроз. Проблемы носят системный характер: технологическое усиление атак со стороны злоумышленников неразрывно связано с уязвимостями в жизненном цикле корпоративных ИИ-систем, а операционные выгоды от автоматизации SOC могут быть нивелированы рисками утраты экспертного контроля и новых утечек данных. Успешное противостояние современным угрозам требует отказа от точечного внедрения ИИ-инструментов в пользу выстраивания целостных стратегий.

В качестве концептуального ответа на эти вызовы предложена Концепция интегрированной платформы адаптивной защиты, представляющая собой авторскую разработку. Ее отличие от традиционных подходов — в синтезе трех ранее разрозненных направлений: операционной безопасности машинного обучения (MLSecOps), архитектуры эффективного взаимодействия человека и ИИ в процессах защиты (гибридный интеллект) и встроенных механизмов охраны конфиденциальности данных на всех этапах работы с ИИ. Модель акцентирует, что безопасность должна быть заложена в сам процесс создания и эксплуатации ИИ-активов, а не являться надстройкой над ними. Таким образом, будущее кибербезопасности лежит в построении адаптивных, «умных» систем управления безопасностью, где технологии искусственного интеллекта выполняют роль мощного усилителя человеческих компетенций, а не их замены. Практическая реализация подходов, подобных предложенному, позволит организациям трансформировать вызовы эпохи ИИ в возможности для построения более устойчивой и проактивной цифровой защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисян, А. Обеспечение кибербезопасности в эпоху ИИ: проблемы, методы и институционализация / А. Аветисян, А. Белеванцев // Пути к миру и безопасности. — 2025. — № 1(68). — С. 40–52. — DOI 10.20542/2307-1494-2025-1-40-52.
2. Белорусов, М.М. Основные проблемы, которые можно решать с помощью ИИ в сфере кибербезопасности / М.М. Белорусов, Е.А. Дмитриева, А.Е. Мартынова // Социосфера. — 2025. — № 1. — С. 240–246.
3. Будущее технологий или угроза: что ожидать от искусственного интеллекта в 2025 году // ESET. — URL: <https://www.eset.com/ge-ru/about/newsroom/press-releases/malware/budushcheye-tekhnologiy-ili-ugroza-cto-ozhidat-ot-iskusstvennogo-intellekta-v-2025-godu/> (дата обращения: 09.12.2025).
4. «В эпоху искусственного интеллекта заниматься кибербезопасностью должны профессионалы». Интервью с представителем «Лаборатории Касперского» // Infocity.tech. — URL: <https://infocity.tech/2025/11/v-epohu-iskusstvennogo-intellekta-zanimatsya-kiberbezopasnostyu-dolzhny-professionalny/> (дата обращения: 09.12.2025).
5. Журина, А. Искусственный интеллект в кибербезопасности: польза, риски и реальная эффективность // Anti-Malware.ru. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/Artificial-Intelligence-in-Information-Security (дата обращения: 09.12.2025).
6. Заметки по результатам участия в круглом столе «Современные вызовы в безопасности AI и пути их решения» на KDW — 2025 // Хабр. — URL: <https://habr.com/ru/articles/953374/> (дата обращения: 09.12.2025).
7. ИИ в кибербезопасности: друг или враг // DDOS-guard. — URL: <https://ddos-guard.ru/blog/ii-v-kiberbezopasnosti> (дата обращения: 09.12.2025).
8. Марков, Я.А. Преимущества и риски применения ИИ в кибербезопасности / Я.А. Марков // Интеллектуальные ресурсы — региональному развитию. — 2025. — № 1. — С. 119–124.
9. Намиот, Д.Е. О кибербезопасности ИИ-агентов / Д.Е. Намиот, Е.А. Ильюшин // International Journal of Open Information Technologies. — 2025. — Т. 13, № 9. — С. 13–24.
10. Татаринов, К.А. Влияние искусственного интеллекта на кибербезопасность / К.А. Татаринов // Вопросы российского и международного права. — 2025. — Т. 15, № 5-1. — С. 197–205.
11. Gadelshina, V.D. The future of cybersecurity: how AI is changing approaches to data protection in the era of digital transformation / V.D. Gadelshina. — 2025. — №1. — pp. 451–453.

© Верезубова Наталья Афанасьевна (nverez@mail.ru); Яковлева Ольга Анатольевна (yakovleffo@yandex.ru);

Сакович Наталия Евгениевна (nasa2610@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ: ПОДХОДЫ, КЛАССИФИКАЦИИ, ТРЕБОВАНИЯ

PRACTICE-ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY MANAGEMENT IN EDUCATIONAL ORGANIZATIONS: APPROACHES, CLASSIFICATIONS, AND REQUIREMENTS

**T. Dobrynina
I. Asaliev
O. Romashkova
N. Mysakov**

Summary. The paper reviews approaches to applying practice-oriented information technologies for managing organizational systems in a educational organization. The main areas of digital support for school management are considered, including document workflow and approvals, planning and execution control, resource and facilities management, communication with stakeholders, and information security with personal data compliance. A classification of practice-oriented solutions is proposed by functional purpose, integration level, and degree of process formalization. Based on typical issues of «hybrid» management (parallel communication channels, fragmented data, low transparency of statuses and responsibilities), a set of requirements for implementing and operating management platforms is formulated: a unified data and status layer, process-oriented support, audit logging, SLA and notification mechanisms, role-based access control, and measurable performance indicators. The results can serve as a methodological basis for designing target management models and defining automation tasks for the administrative domain of a general education organization.

Keywords: educational organization, organizational system, management, practice-oriented information technologies, digital platform, process approach, document workflow, approvals, classification, requirements, information security.

Добрынина Татьяна Николаевна

Кандидат технических наук, доцент,
ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
ermaktat@bk.ru

Асалиев Ислам Асалиевич

Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
asaliev.isl@mail.ru

Ромашкова Оксана Николаевна

Доктор технических наук, Профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (РАНХиГС)», г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Мысаков Никита Алексеевич

Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
mr.mysakov@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен обзор подходов к применению практико-ориентированных информационных технологий для управления организационными системами в образовательной организации. Рассмотрены направления цифровой поддержки управленческих процессов: документооборот и согласования, планирование и контроль исполнения, управление ресурсами и хозяйственной деятельностью, взаимодействие с участниками образовательных отношений, а также обеспечение информационной безопасности и соблюдение требований по персональным данным. Предложена классификация практико-ориентированных решений по функциональному назначению, уровню интеграции и степени регламентированности процессов. На основе анализа типовых проблем «смешанного» управления (параллельные каналы коммуникации, разрозненность данных, непрозрачность статусов и ответственности) сформулированы требования к внедрению и эксплуатации цифровых платформ управления: единый контур данных и статусов, поддержка процессного подхода, журналирование действий, механизмы SLA и уведомлений, разграничение прав доступа, а также измеримые показатели эффективности. Результаты могут быть использованы в качестве методической основы для проектирования целевых моделей управления и постановки задач автоматизации управленческого контура образовательной организации.

Ключевые слова: образовательная организация, организационная система, управление, практико-ориентированные информационные технологии, цифровая платформа, процессный подход, документооборот, согласование, классификация, требования, информационная безопасность.

Введение

Современная образовательная организация любого уровня функционирует как сложная организационная система, объединяющая образовательные, административно-управленческие, хозяйственные и коммуникационные процессы. Устойчивость и результативность работы такой системы во многом определяется качеством управления: согласованностью действий участников, регламентированностью процедур, прозрачностью распределения ответственности и своевременностью принятия решений. В условиях роста информационных потоков, усложнения требований к отчетности, повышенного внимания к безопасности данных и необходимости оперативного взаимодействия с участниками образовательных отношений традиционные формы управления, основанные преимущественно на бумажном документообороте и разрозненных цифровых инструментах, демонстрируют ограничения по скорости, контролируемости и воспроизводимости управленческих процедур.

Несмотря на широкое распространение цифровых сервисов в практике общеобразовательных организаций сохраняются типовые проблемные зоны: разрозненность инструментов, отсутствие унифицированной модели процессов, слабая формализация ролей и ответственности, ограниченная интеграция источников данных, недостаточная прозрачность статусов выполнения и контроля сроков. Это приводит к тому, что управление осуществляется «в режиме реагирования», а не на основе заранее определенных процедур и показателей. Следовательно, требуется обоснование подходов к выбору и внедрению практико-ориентированных информационных технологий (ИТ), их классификация по управленческим функциям и формирование набора требований, которые могут служить основой для последующего моделирования процессов «как есть» и «как должно быть» и разработки решений в рамках цифровой трансформации образования.

Образовательная организация
как объект управления

Образовательная организация может быть рассмотрена как организационная система, в которой устойчивые цели (качество образовательных результатов, безопасность, соблюдение нормативных требований, развитие кадрового потенциала) достигаются за счет согласованной деятельности участников в рамках регламентированных процессов. В отличие от простых административных структур, управление школой характеризуется многоуровневостью и разнородностью процессов: образовательный контур (планирование, проведение и контроль учебных занятий), административно-управленческий контур (приказы, распоряжения,

управление поручениями), ресурсный контур (кадры, материально-техническое обеспечение), а также коммуникационный контур (взаимодействие с обучающимися и родителями). В совокупности это формирует распределенную систему поддержки принятия решений, где значительная часть управленческих действий выполняется на операционном уровне, но должна оставаться согласованной с тактическими и стратегическими целями.

Управление организационной системой целесообразно описывать в процессной логике: как последовательность действий с определенными входами/выходами, участниками (ролями), регламентами, контрольными точками и результатами. Для управленческого контура документооборота и согласований такими входами являются документы и иницирующие события (обращение, заявка, поручение), а выходами — оформленные управленческие решения (согласованный документ, утвержденный план, распоряжение, отметка об исполнении). Процессный взгляд позволяет фиксировать не только «что делается», но и «как делается»: где возникают задержки, как распределяется ответственность, в каких точках возникает дублирование информации и какие данные необходимы руководству для контроля [1].

Для дальнейшего анализа в рамках настоящей статьи управление рассматривается на трех взаимосвязанных уровнях: стратегическом (формирование целей и политик), тактическом (планирование и распределение ресурсов) и операционном (исполнение и контроль текущих процедур).

Практико-ориентированные информационные
технологии в управлении образовательной
организацией

Под практико-ориентированными информационными технологиями в контексте управления образовательной организацией целесообразно понимать совокупность цифровых инструментов и решений, которые обеспечивают поддержку управленческих процессов в «рабочем» режиме: регламентируют действия участников, задают роли и маршруты согласований, фиксируют статусы и сроки, обеспечивают трассируемость и контроль исполнения, а также формируют данные для управленческой аналитики. Ключевой признак практико-ориентированности состоит в том, что технология оценивается через измеримый управленческий эффект: сокращение времени прохождения согласований, снижение доли ручных операций, уменьшение количества возвратов/ошибок, повышение прозрачности исполнения поручений.

Важно подчеркнуть, что цифровая поддержка управления не сводится к наличию электронных каналов коммуникации или отдельных сервисов учета. При от-

сутствии единого процессного контура цифровые инструменты могут воспроизводить «бумажную» логику с сохранением проблемных зон: параллельные каналы согласования (почта + мессенджер + бумага), дублирование данных (несогласованные версии документов), размытая ответственность, потеря истории решений. Поэтому в рамках практико-ориентированного подхода приоритетным является обеспечение следующих характеристик управления: формализованность процедур (наличие понятного регламента), наблюдаемость (видимость статусов и сроков), трассируемость (история действий и решений), контролируемость (контрольные точки и показатели), интегрируемость (единые справочники и согласованные данные) [2].

Классификация практико-ориентированных ИТ для управленческого контура образовательной организации

Для систематизации практико-ориентированных информационных технологий, применимых в управлении организационными системами образовательной организации, целесообразно использовать функционально-процессный принцип: выделять классы решений по их вкладу в ключевые управленческие функции и поддерживаемые процессы. В рамках управленческого контура документооборота и согласований можно выделить четыре базовые функции: (1) регламентация и согласование управленческих действий, (2) контроль исполнения и сроков, (3) коммуникации и уведомления, (4) учет и аналитика. Каждая функция может поддерживаться различными классами ИТ-решений, причем значимость поддержки неодинакова: одни инструменты обеспечивают «ядро» процесса (например, workflow/ЕСМ для согласований), другие — повышают наблюдаемость и дисциплину исполнения (системы поручений), третьи — формируют управленческую отчетность (BI и витрины данных).

Такой подход позволяет уйти от перечисления отдельных программных продуктов и сосредоточиться на архитектуре управления: какие элементы должны присутствовать, чтобы управленческий процесс был формализован, наблюдаем и контролируем [3]. Данный формат удобен для выявления «провалов» цифровой поддержки: например, при наличии электронных каналов коммуникации может отсутствовать регламентированный контур согласований или механизм контроля исполнения.

Дополнительно классификация должна учитывать специфику образовательной организации: многообразие ролей, сочетание нормативно закрепленных и локальных регламентов, высокую чувствительность персональных данных, а также необходимость интеграции с используемыми информационными системами.

Ниже представлена расширенная классификация ИТ-решений и их управленческих эффектов (таблица 1). Таблица может использоваться как основа для формирования критериев выбора, а также как «карта» компонентов, которые необходимо учитывать при проектировании цифрового контура управления документооборотом и согласованиями.

Выделенные классы решений задают основу для формирования требований к практико-ориентированной ИТ-поддержке.

Проблемы и риски внедрения практико-ориентированных ИТ в управлении образовательной организацией

Практика внедрения цифровых решений в образовательных организациях показывает, что ключевые барьеры связаны не только с выбором программного инструмента, но и с неготовностью управленческой системы к процессной регламентации. Даже при наличии функционально подходящих ИТ-решений эффект может быть ограничен, если сохраняются параллельные «неформальные» контуры принятия решений, отсутствует единая ролевая модель и не определены показатели, по которым оценивается результат управления [4]. В контуре документооборота и согласований наиболее типичны следующие группы проблем и рисков.

Кадровые и организационные риски. В организации значительная часть управленческих действий распределена между сотрудниками, для которых цифровые процедуры могут восприниматься как дополнительная нагрузка. Спротивление изменениям усиливается при недостаточной квалификации, отсутствии мотивации и неочевидности управленческого эффекта. Кроме того, внедрение практико-ориентированных ИТ требует назначения владельцев процессов и владельцев данных (ответственных за регламенты и справочники), что в условиях высокой занятости персонала становится отдельной управленческой проблемой.

Регламентные риски и несогласованность процедур. Цифровой контур управления воспроизводим только при наличии согласованных регламентов: кто инициирует документ, кто согласует, кто утверждает, в какие сроки, по каким основаниям возможен возврат. На практике локальные акты и реальные процедуры могут различаться: часть решений принимается в переписке, часть — устно, часть — через письменные визы. При попытке автоматизации без предварительной стандартизации возникает ситуация, когда система фиксирует лишь «видимую» часть процесса, а фактическое управление остаётся за пределами цифрового контура [5]. Это снижает наблюдаемость и доверие к данным.

Таблица 1.

Классификация практико-ориентированных ИТ для управления образовательной организацией
(управленческий контур документооборота и согласований)

Класс ИТ/инструмента	Управленческая функция	Поддерживаемые процессы (примеры)	Ожидаемый эффект	Ограничения/риски внедрения
workflow/есm (электронный до-кументооборот)	регламентация и согласование	приказы, служебные записки, согласование мероприятий, согласование закупок	сокращение времени согласо-вания, единая версия документа, трассируемость решений	сопротивление персонала, не-обходимость настройки ролей/маршрутов, требования по иб
система управления поручениями/за-дачами	контроль ис-полнения	поручения администрации, контроль сроков по документам, исполнение решений педсовета	прозрачность статусов, снижение «потери» поручений, повышение исполнительской дисциплины	риск параллельного учета (если остаются мессенджеры/бумага), перегруз уведомлениями
service desk / система заявок	координация и контроль ресурсов	заявки на оборудование/ре-монт/доступы, хозяйственные заявки, ит-инциденты	очередь заявок, распределение по исполнителям, sla/сроки	требуется каталог услуг и ре-гламент обработки, нагрузка на администраторов
система регламентов/база знаний	стандартизация процедур	локальные акты, инструкции по согласованиям, шаблоны документов	единообразие действий, снижение ошибок оформления, обучение сотрудников	актуализация контента, ответ-ственность за ведение базы
электронные формы и конструкторы заявок	упрощение ввода данных	заявки на мероприятия, согла-сование командировок, заявки на закупки	снижение неполноты данных, стандартизация входов процесса	риск «зоопарка форм» без еди-ного реестра, дублирование
электронная подпись/подписание до-кументов	завершение согласования	утверждение приказов, со-гласование договоров/согласий (в пределах применимости)	юридически значимый обо-рот, сокращение бумажных операций	организационные и правовые ограничения, обучение пользо-вателей
единые справочники (mdm/нси)	качество данных	справочники сотрудников, классов, подразделений, типов документов	уменьшение расхождений, единые идентификаторы, корректная аналитика	нужна дисциплина ведения, ответственность владельцев данных
интеграционная шина/обмен данными	интегрируемость	обмен между эдо, журналом, ка-дровыми системами, учетными модулями	устранение двойного ввода, согласованность данных	сложность интеграции, требова-ния к доступам и безопасности
системы уведомлений и событий (почта/боты/пуш)	коммуникации и контроль сроков	уведомления о задачах, дедлай-нах согласований, напоминания исполнителям	снижение просрочек, повыше-ние скорости реакции	информационный «шум», риск игнорирования уведомлений
bi/аналитика, витри-ны данных	учет и управ-ленческая аналитика	отчеты по срокам согласований, нагрузке исполнителей, количе-ству возвратов	управленческие кpi, выявле-ние узких мест, обоснование решений	качество исходных данных, необходимость методики по-казателей
журнал действий/ау-дит (логирование)	трассируемость и контроль	история согласований, кто и ког-да менял документ, причины возвратов	контроль ответственности, расследование инцидентов, соблюдение регламентов	требования к хранению, полити-ка доступа, нагрузка на систему
контроль доступа и разграничение прав	безопасность и соответствие	доступ к документам, персо-нальным данным, ролевая модель	снижение рисков утечек, соот-ветствие требованиям иб	необходимость корректного проектирования ролей, админи-стрирование

Интеграционные риски и фрагментация инстру-ментов. Образовательная организация, как правило, использует несколько информационных систем и сер-висов, при этом данные о сотрудниках, обучающихся, документах и событиях могут храниться в разных источ-

никах. При отсутствии интеграции неизбежно появляет-ся двойной ввод, расхождения версий и «ручные пере-ходы» (копирование из одной системы в другую).

Риски качества данных. Управленческая аналитика (сроки согласований, количество возвратов, нагрузка

исполнителей) становится возможной только при стандартизированных входах процесса и единых справочниках. Если заявки и документы поступают в произвольной форме, статусы трактуются неодинаково, а типы документов не унифицированы, показатели теряют сопоставимость. Следовательно, практико-ориентированная ИТ должна включать механизмы контроля полноты и корректности данных (обязательные поля, шаблоны, справочники), а также ответственность за их актуализацию [6].

Риски информационной безопасности и соблюдения требований к персональным данным. Управленческий документооборот образовательной организации часто содержит сведения ограниченного доступа: персональные данные сотрудников и обучающихся, сведения о здоровье, социальном статусе, результаты оценивания, материалы служебного характера. Это предъявляет требования к разграничению прав, журналированию действий, хранению и передаче данных, а также к управлению доступом в распределённой среде [7]. Использование «удобных», но неконтролируемых каналов (личные мессенджеры, внешние облачные хранилища) повышает риски утечек и затрудняет выполнение регламентов безопасности.

Риск «цифровизации хаоса». Одним из наиболее распространённых сценариев является перенос неэффективного процесса в цифровую форму без его реинжиниринга: сохраняются лишние согласующие, отсутствуют контрольные точки, используются дублирующие каналы коммуникации. В результате техническое внедрение происходит, но управленческий эффект минимален [8]. Поэтому внедрение практико-ориентированных ИТ целесообразно рассматривать как этап управленческого проектирования: сначала фиксируется процесс и его проблемные зоны, затем определяется целевая модель, и только после этого выбирается инструментальная реализация.

Перечисленные проблемы показывают, что для обоснованного выбора и проектирования цифрового контура управления в образовательной организации необходимо перейти от общего описания классов ИТ к формализации требований и критериев эффективности.

Требования и критерии оценки эффективности внедрения практико-ориентированных ИТ

С учетом многоуровневости управления образовательной организацией и специфики управленческого контура документооборота и согласований практико-ориентированные ИТ целесообразно оценивать не только по набору функций, но и по тому, насколько они повышают управляемость процесса [9]. В данном контексте

управляемость понимается как способность системы обеспечивать воспроизводимое выполнение процедур в заданных регламентах и с контролируемым результатом. Это требует формализации ролей и ответственности, наблюдаемости статусов и сроков, трассируемости решений, контроля качества данных и соблюдения требований информационной безопасности.

Предлагаемый набор требований ориентирован на типичные «точки отказа» управленческих процессов: дублирование каналов согласования, разрыв между регламентами и фактическими действиями, отсутствие единого реестра документов, нефиксируемость причин возвратов, низкая сопоставимость данных для управленческой аналитики. Критерии и индикаторы оценки практико-ориентированных ИТ в контуре документооборота и согласований представлены в таблице 2.

Для практической применимости критерии сформулированы таким образом, чтобы они могли использоваться: (а) администрацией образовательной организации — при выборе решения и постановке требований, (б) при моделировании процесса текущего состояния (AS—IS) — как «чек-лист проблем», (в) при проектировании целевого состояния (TO—BE) — как набор проектных ориентиров и метрик ожидаемого эффекта [10].

Заключение

В рамках статьи предложен функционально-процессный подход к систематизации практико-ориентированных ИТ, применимых к управленческому контуру документооборота и согласований в образовательной организации. На этой основе выделены основные управленческие функции цифровой поддержки (регламентация и согласование, контроль исполнения, коммуникации и уведомления, учет и аналитика) и показано, что реализация устойчивого цифрового контура управления требует согласованного набора компонентов: от workflow/ECM и систем поручений до справочников, логирования действий и аналитики KPI.

Показано, что основными факторами, ограничивающими результативность внедрения практико-ориентированных ИТ в общеобразовательной организации, являются кадровые и организационные барьеры, недостаточная формализация регламентов, слабая интеграция инструментов, риски качества данных и требования информационной безопасности.

Для повышения практической применимости результатов предложен набор критериев и индикаторов оценки эффективности практико-ориентированных ИТ в контуре документооборота и согласований.

Таблица 2.

Критерии и индикаторы оценки практико-ориентированных ИТ в контуре документооборота и согласований

Критерий (требование)	Индикаторы (что проверяем)	Как измерять/фиксировать	Управленческий эффект
Формализованность процесса	наличие маршрутов согласования; шаблоны документов; правила возврата	наличие регламента + настроенных маршрутов; доля документов, прошедших по маршруту	воспроизводимость процедур, снижение «ручных договоренностей»
Ролевая модель и ответственность	роли согласующих/утверждающих; назначение владельцев процесса/данных	матрица ролей (RACI); доля документов с назначенными ответственными	ясность ответственности, снижение «зависаний»
Наблюдаемость статусов	статусы документа/заявки; видимость очереди и сроков	наличие единого реестра; % документов со статусом; витрина «в работе/просрочено»	прозрачность управления, контроль исполнения
Управление сроками (SLA)	нормативные сроки согласования; уведомления о дедлайнах	среднее/медианное время согласования; доля просрочек; число напоминаний	сокращение сроков, снижение просрочек
Трассируемость решений	история изменений; кто согласовал/вернул; причины возврата	журнал действий; обязательные поля «причина возврата»; аудит	возможность анализа ошибок, управленческая ответственность
Единая версия документа	исключение параллельных копий; контроль актуальности	доля согласований «в системе»; запрет отправки финальной версии вне контура	снижение конфликтов версий, качество решений
Качество входных данных	полнота заявок/документов; стандартизация полей	доля заявок с ошибками/неполнотой; количество возвратов из-за оформления	снижение возвратов, ускорение обработки
Справочники и единые данные	единые классификаторы типов документов/подразделений/исполнителей	наличие НСИ; число дублей; процент совпадения справочников между системами	сопоставимость данных, корректная аналитика
Интегрируемость	обмен данными с журналом/кадрами/учетом; единый вход (SSO)	число интеграций; доля данных без двойного ввода; инциденты несогласованности	снижение ручного труда, согласованность данных
Управленческая аналитика	KPI по согласованиям, нагрузке, возвратам	набор отчетов; регулярность формирования; использование в управленческих решениях	переход к управлению на основе данных
Масштабируемость и адаптивность	возможность менять маршруты и роли без «разработки»	время внесения изменений; число процессов, покрытых контуром	устойчивость к изменениям, снижение зависимости от ИТ
Информационная безопасность	разграничение прав; защита ПДн; логирование доступа	аудит прав; инциденты доступа; наличие политик хранения/доступа	снижение рисков утечек, соответствие требованиям
Пользовательская приемлемость	простота интерфейса; обучение; поддержка	время обучения; количество ошибок пользователей; % активных пользователей	снижение сопротивления, рост фактического использования
Непротиворечивость каналов	отсутствие «двух контуров» (мессенджер/почта/бумага)	доля согласований вне системы; число «обходов»	полнота цифрового следа, реальная управляемость

ЛИТЕРАТУРА

- Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В., Ермакова Т.Н. Современное состояние и перспективы моделирования цифровых профессиональных пространств в бизнесе и образовании. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. Том 20, № 4 (2023) С.358–372.
- Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
- Михеева Е.О., Ромашкова О.Н. Гибкие методы и алгоритмы управления инновационными проектами для предприятий информатизации// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2022. № 10. С. 63–70.
- Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
- Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования //Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2022. № 4 (62). С. 29–43.

6. Ponomareva L.A., Romashkova O.N. Training of specialists in on-board communication systems. // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. С. 9078594.
7. Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Модель эффективного управления объединенной образовательной системой (структурой)// В книге: Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 16–18.
8. Рябовичева О.В., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Процесс обработки и передачи виртуальных данных в вычислительных комплексах и компьютерных сетях вуза // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 7-2. С. 85–92.
9. Захаров Я.В., Ромашкова О.Н. Анализ информационных потоков в образовательной организации в целях соответствия современным вызовам в образовании // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки — Москва 2025 — №1 — С. 74–79.
10. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М: Наука. 2021. 584 с.

© Добрынина Татьяна Николаевна (ermaktat@bk.ru); Асалиев Ислам Асалиевич (asaliev.isl@mail.ru);
Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru); Мысаков Никита Алексеевич (mr.mysakov@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА МЕР ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МАШИН

DEVELOPMENT OF INFORMATION SECURITY MEASURES FOR VIRTUAL MACHINES

V. Egorov
K. Lazunin

Summary. This article examines security issues in virtualization environments and models attacker actions against the hypervisor. Current threats and countermeasures are analyzed. A security analysis of the correct operation of the hypervisor is provided. Proposals for improving hypervisor security were formulated. An analysis of hypervisor components was conducted. Concepts of interaction between entities were introduced to formulate an approach to hypervisor security. The need for a rigorous mathematical model has been identified. Information security measures for virtual machines have been defined.

Keywords: information security, hypervisor, information security in virtualization environments.

Применение среды виртуализации в современных условиях является неотъемлемой частью построения кластеров центров обработки данных, государство обеспечивает развитие облачных технологий и построение государственной единой облачной платформы в целях размещения информационных систем и информационных ресурсов [1].

Стоит отметить, что к средствам виртуализации регуляторами в области информационной безопасности уделяется большое внимание, разрабатываются соответствующие гипервизоры, однако вопрос построения комплексной безопасности на системном уровне до конца не изучен.

По настоящее время остаются актуальными угрозы в отношении гипервизора [2, 3]. Злоумышленник, получив административный доступ к гостевой виртуальной машине, может воздействовать на виртуальные аппаратные устройства гипервизора с целью внесения ошибок в его работу.

В случае успеха злоумышленник может повлиять на работоспособность виртуальной аппаратуры, обслуживающей не только виртуальную машину, на которой

Егоров Валерий Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
vec@mail.ru.

Лазунин Константин Александрович
старший преподаватель, ФГБОУ ВО «МИРЭА —
Российский технологический университет»
07121917@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы безопасности среды виртуализации, смоделированы действия нарушителя в отношении гипервизора. Рассмотрены действия нарушителя в отношении гипервизора. Проведен анализ актуальных угроз и методов противодействия. Проведен анализ безопасности применения корректной работы гипервизора. Сформированы предложения по необходимости совершенствования безопасности гипервизора. Проведен анализ компонентов гипервизора. Введены понятия взаимодействия между субъектами для формирования подхода по безопасности гипервизора. Сформулирована необходимость формирования строгой математической модели. Определены меры информационной безопасности для виртуальных машин.

Ключевые слова: информационная безопасность, гипервизор, защита информации среды виртуализации.

расположился злоумышленник, но и другие ВМ в составе хостового компьютера.

Рассмотрим, в качестве образца, виртуальную клавиатуру PS/2, которая имеется в наличии любого стандартного гипервизора. На этапе загрузки ОС с этой аппаратурой взаимодействует Firmware (BIOS или EFI загрузчик операционной системы). С помощью виртуальной клавиатуры происходит выбор загрузочных опций.

Рассмотрим средства ввода данных с клавиатуры. Работой клавиатуры управляет контроллер клавиатуры, который при нажатии или отпускании любой клавиши выполняет две функции:

- помещает в свой выходной порт с номером 60h скан-код клавиши;
- посылает процессору через контроллер прерываний сигнал, инициирующий запуск программы обработки аппаратного прерывания от клавиатуры (прерывание INT 09h в стандартном Legacy BIOS).

Скан-код является порядковым номером клавиши и однозначно ее идентифицирует. Каждая клавиша имеет два скан-кода, которые отличаются на величину 80h:

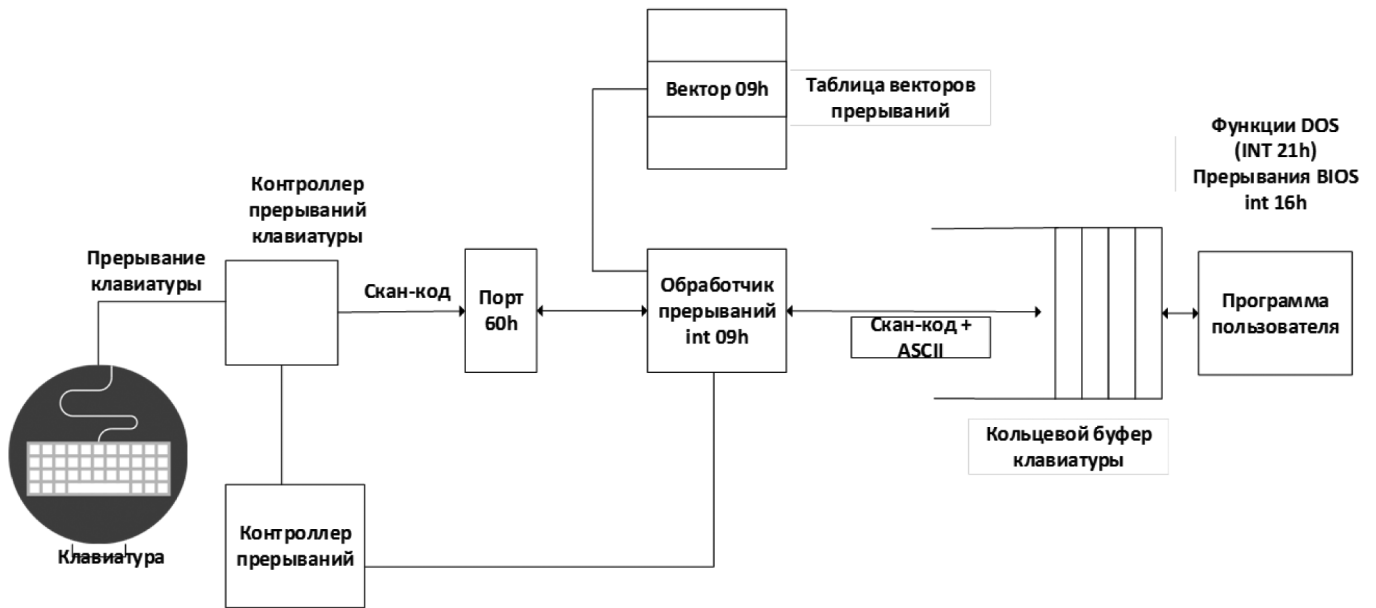


Рис. 1. Структурная схема клавиатуры

меньший — код нажатия

большой — код отпускания.

На рисунке №1 представим структурную схему клавиатуры.

Слова флагов клавиатуры:

1. Занимает байты памяти 40h:17, 40h:18h;
2. Показывает состояние служебных клавиш:
 - если клавиша нажата, то соответствующий бит равен 1;
 - если клавиша отпущена, то соответствующий бит равен 0.

Расположение битов клавиш в слове флагов клавиатуры:

- Байт 40h:17h,
Биты
- 7 — insert;
 - 6 — Caps Lock;
 - 5 — Num Lock;
 - 4 — Scroll Lock;
 - 3 — Alt;
 - 2 — Ctrl;
 - 1 — Left Shift;
 - 0 — Right Shift.
- Байт 40h:18h,
Биты
- 7 — SysRq;
 - 6 — Caps Lock;
 - 5 — Num Lock;
 - 4 — Scroll Lock;
 - 3 — Right Alt;
 - 2 — Right Ctrl;

- 1 — Left Alt;
- 0 — Left Ctrl.

Обработчик прерывания INT 09h считывает из порта 60h скан-код и анализирует его значение. Если скан-код принадлежит служебным клавишам, то в слове флагов клавиатуры при нажатии соответствующие биты, а при отпускании сбрасываются. Если нажать на любую другую клавишу, INT 09h формирует двухбайтовый код, который представляет собой скан-код, ASCII-код. Происходит запись двухбайтового кода в кольцевой буфер ввода клавиатуры. В свою очередь, кольцевой буфер имеет объем 15 слов, размещается в памяти, которая начинается с адреса 40h:1Eh и предназначена для синхронизации аппаратного ввода данных, а также приема их программной пользователем. Программа пользователя, использует прерывание BIOS int 16h, также могут быть использованы системные функции DOS. Программа пользователя, пытается считать символы из кольцевого буфера. Наличие символов подтверждает операцию ввода их и обрабатывает в последствии.

В таком виде всё работает, если используется стандартный загрузчик операционной системы. При наличии злоумышленника в составе виртуальной машины, стандартный загрузочный код подменяется вредоносным ПО, цель которого: нарушить работоспособность виртуальной клавиатуры. Так, например, злоумышленник начинает воздействовать на порты виртуальной клавиатуры (60h, 61h) иным способом, не предусмотренным стандартным алгоритмом взаимодействия между аппаратурой и драйвером.

Смоделируем действия нарушителя в отношении драйвера модуля аппаратной виртуализации на примере работы клавиатуры.

Действие нарушителя № 1 — развертывание подготовленного образа в гипервизоре, представляющий собой операционную систему с вредоносным программным обеспечением. Фактически создается новая виртуальная машина в гипервизоре.

Действие нарушителя № 2 — получение доступа к драйверу модуля аппаратной виртуализации.

Действие нарушителя № 3 — создание условий по воздействию на драйвер модуля аппаратной виртуализации по средству команд/запроса приводящего к нарушению доступности и целостности всего гипервизора.

Эти действия позволят негативно воздействовать на гипервизор, что нарушит работу системы в целом, такие последствия могут значительно негативно воздействовать на информационную инфраструктуру и в результате может привести к нарушению работы государственных систем.

Необходимо рассмотреть возможность совершенствования безопасности информационных систем, позволяющей противодействовать угрозам гипервизора, разработать методику позволяющую создавать систему в защищенном исполнении в условиях непреднамеренного воздействия на среду функционирования.

В современных информационных инфраструктурах применяются современные гипервизоры, которые позволяют создавать гибкую архитектуру для развертывания информационных систем на одном физическом ресурсе.

Однако отмечаются значительные угрозы информационной безопасности, которые могут повлечь нарушение целостности, конфиденциальности и доступности гипервизора, такие как: Угроза выхода за пределы виртуальной машины несет возможные последствия влекущие несанкционированный доступ к ресурсам средства виртуализации. Угроза несанкционированного доступа к ресурсам виртуальной машины пользователем другой виртуальной машины, влекущие возможные последствия распространение вредоносного программного обеспечения в гипервизоре, а также получение несанкционированного доступа к данным. Угроза несанкционированного доступа к гипервизору, влекущий несанкционированный доступ к данным [4].

Анализ современных атак и уязвимостей свидетельствует о необходимости усиления требований по безопасности [5, 6]. В таблице №1 представлены способы реализации угроз на гипервизор в соответствии с банком данных угроз безопасности информации ФСТЭК России [7].

В гипервизоре реализуется взаимодействие между субъектами, которые могут требовать выполнение опе-

Таблица 1.

Способы реализации угроз на гипервизор в соответствии с банком данных угроз безопасности информации ФСТЭК России

Способы реализации угроз в отношении гипервизора	
1.	Эксплуатация известных уязвимостей
2.	Эксплуатация уязвимостей «нулевого дня»
3.	Использование недостатков, связанных с неполнотой проверки вводимых (входных) данных
4.	Использование недостатков, связанных с управлением учетными данными
5.	Использование недостатков, связанных с отсутствием проверки достоверности отправителя и/или получателя
6.	Использование недостатков, связанных с хранением ключевой информации в программном коде (в оперативной памяти)
7.	Использование недостатков, связанных с использованием нестойкой криптографии
8.	Использование недостатков, связанных с некорректной настройкой сетевого доступа
9.	Использование недостатков конфигурации, связанных с настройками по умолчанию (включая пароли по умолчанию)
10.	Использование недостатков, связанных с некорректной настройкой прав доступа
11.	Внедрение вредоносного программного обеспечения через скомпрометированные обновления программного обеспечения или операционной системы
12.	Внедрение закладок в системное программное обеспечение
13.	Идентификация пользователей
14.	Получение данных о пользователях и группах
15.	Получение данных о процессах
16.	Получение данных о настройках безопасности
17.	Блокировка пользователей
18.	Множественный запуск программного обеспечения
19.	Выход за пределы виртуальной инфраструктуры
20.	Перебор паролей к учетной записи
21.	Перебор пользователей к паролю (Password Spraying)
22.	Перебор утекших пар пользователь/пароль (Credential Stuffing)
23.	Восстановление аутентификационной информации из журналов приложений
24.	Доступ без авторизации
25.	Использование ошибок или отсутствия проверки прав доступа

раций посредством передачи команд, что позволяет атакующему воздействовать на его компоненты такие как адресное пространство памяти, адресное пространство ввода-вывода, адресное пространство шин PCI и другая виртуальная аппаратура, понуждая субъект назначения к реализации угрозы.

Введем понятие «последовательность операций» как набора действий, выполняемых субъектом на основе полученных команд от других субъектов.

Введем понятие «валидная последовательность операций», как последовательность операций, допустимая при работе виртуальной машины и не проводящая к ухудшению параметров работоспособности субъектов. Все операции, не являющимися валидными, объявляются невалидными, то есть запрещенными.

Определим, что виртуальные устройства могут требовать выполнения операций другими устройствами только посредством процессоров, а не напрямую. Все операции между виртуальными устройствами, осуществляются напрямую, являются невалидными.

Для анализа безопасности и корректности работы гипервизора требуется строгая математическая модель, описывающая:

- множество субъектов (процессоров и виртуальных устройств);
- доступные им адреса пространства как каналы взаимодействия;
- операции, которые субъекты могут инициировать и принимать;
- последовательность операций, реализующие алгоритмы работы ВМ;
- критерии валидности и невалидности этих последовательностей.

Обмен командами между субъектами осуществляется через адресные пространства, представляемые аппаратной и программной конфигурацией компьютера. Необходимо ввести множество адресных пространств:

Состояние может включать:

- значения регистров процессора;
- конфигурацию виртуального устройства;
- содержимое внутренних буферов и очередей;
- параметры, связанные с производительностью и допустимостью.

Интерпретация: последовательность операций представляет собой алгоритм работы субъекта (или совокупности субъектов) в рамках функционирования виртуальной машины. Тем самым должно исключаться:

- состояния сбоя и зависания;
- некорректные конфигурации;
- состояния с недопустимой деградацией производительности.

То есть для любой валидной последовательности запрещено существование операции, у которой источником и назначением одновременно являются виртуальные устройства.

Предлагаемый подход позволит задать строгую математическую основу для анализа безопасности гипервизора. На его базе возможно решение следующих задач:

- контроль доступа.
- верификация гипервизора.
- защита виртуальных машин.
- противодействие атакам.
- отказоустойчивость.
- статический и динамический анализ.

Возможно предложить формальную модель взаимодействия субъектов гипервизора на основе теории множеств.

Необходимо особое внимание уделить ограничениям на взаимодействие виртуальных устройств и требованиям к корректности состояний субъектов. Это создаст основу для дальнейшей формальной верификации гипервизоров, построения моделей безопасности и нарушителя и разработки методов автоматизированного анализа безопасности гипервизора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правительство Российской Федерации Постановление от 10 июля 2024 г. № 929 «Об утверждении Положения о государственной единой облачной платформе» // Официальный сайт Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс] URL <http://static.government.ru/media/files/cA6wM8fMQGuFv294tfPEumfAVAVGKvTf.pdf/>.
2. Darshan Tank, Akshai Aggarwal, Nirbhay Kumar Chaubey. — Virtualization vulnerabilities, security issues, and solutions: a critical study and comparison, International Journal of Information Technology An Official Journal of Bharati Vidyapeeth's Institute of Computer Applications and Management [Электронный ресурс] <https://www.researchgate.net/>, ISSN 2511-2104, 2019.
3. Francesco Gadaleta, Nick Nikiforakis, Yves Younan, and Wouter Joosen — Hello rootKitty: A lightweight invariance-enforcing framework // Information Security 14th International Conference, ISC 2011, Xi'an, China, October 26–29, 2011, Proceedings [Электронный ресурс] <https://www.researchgate.net/>, 2011.
4. Фомин Юрий Сергеевич, Алтынбаев Артур Фларитович, Тарануха Александр Васильевич Целостность, доступность, конфиденциальность виртуализации и контейнеризации // Парадигма. 2025. №5-5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tselostnost-dostupnost-konfidentsialnost-virtualizatsii-i-konteynerizatsii> (дата обращения: 25.12.2025).
5. Pan G. et al. Breaking Isolation: A New Perspective on Hypervisor Exploitation via Cross-Domain Attacks // arXiv preprint arXiv:2512.04260. — 2025.
6. Lee J. et al. {BOOTKITTY}: A Stealthy {Bootkit-Rootkit} Against Modern Operating Systems // 19th USENIX WOOT Conference on Offensive Technologies (WOOT 25). — 2025. — С. 303–320.
7. Банк данных угроз безопасности информации // БДУ — Компоненты объектов воздействия. URL: <https://bdu.fstec.ru/threat-section/components> (дата обращения: 13.01.2025).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРТИРОВКИ КАРТОФЕЛЯ

IMPROVING POTATO SORTING EFFICIENCY

A. Karyakin
V. Sotskov

Summary. The problem of increasing the efficiency of potato sorting is examined. It is noted that sorting is a key stage that determines the quality of the final product and the optimal use of the harvest. To improve efficiency, comprehensive measures are proposed: the implementation of automated lines, optical control systems, personnel training programs, and quality monitoring systems. The most promising direction is the implementation of an optical sorting system with machine vision. Such a system optimizes post-harvest processing, minimizes tuber damage, and ensures sorting accuracy of over 91 % with minimal losses, which meets modern agro-technical standards.

Keywords: efficiency improvement, sorting, potato, method, technology, optical system.

Карякин Александр Тимофеевич

Кандидат технических наук, доцент,
Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова г. Нальчик
karyakin2279@mail.ru

Соцков Владимир Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент,
Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова г. Нальчик

Аннотация. В работе рассмотрена проблема повышения эффективности сортировки картофеля. Отмечается, что сортировка — ключевой этап, определяющий качество конечного продукта и оптимальное использование урожая. Для повышения эффективности предлагаются комплексные меры: внедрение автоматизированных линий, оптических систем контроля, программ обучения персонала и систем мониторинга качества. Наиболее перспективным направлением является внедрение оптической системы сортировки с техническим зрением. Такая система оптимизирует послеуборочную обработку, минимизирует повреждение клубней и обеспечивает точность сортировки более 91 % при минимальных потерях, что соответствует современным агротехническим стандартам.

Ключевые слова: повышение эффективности, сортировка, картофель, метод, технология, оптическая система.

Введение

Картофель является важнейшим сельскохозяйственным продуктом как в России, так и во всем мире. Вступление России во Всемирную торговую организацию (ВТО) создает значительное конкурентное давление в сельскохозяйственном секторе страны. Учитывая, что доктрина продовольственной безопасности России предусматривает достижение самообеспеченности продуктами питания не менее чем на 95 %, повышение эффективности производства картофеля имеет первостепенное значение [2]. Несмотря на растущую тенденцию к внедрению современных машинных технологий среди фермеров и сельскохозяйственных организаций, товарное качество картофеля часто остается низким [10]. Кроме того, значительные потери, достигающие 30 % и более, происходят по всей цепочке поставок от поля до потребителя. В значительной степени это может быть связано с устаревшими методами послеуборочной обработки и качеством используемого посадочного материала [8].

Сортировка картофеля, являющаяся важным этапом переработки и коммерциализации, существенно влияет на качество продукции и конкурентоспособность на рынке. Поскольку потребительский спрос на высококачественную сельскохозяйственную продукцию воз-

растает в условиях растущей конкуренции в отрасли, эффективная сортировка становится решающим фактором успеха в агропромышленном секторе. Традиционно ручная сортировка по размеру, форме, цвету и дефектам является трудоемкой и подверженной ошибкам. Благодаря технологическому прогрессу появились механические и автоматизированные системы сортировки, повышающие производительность и точность [6].

Министерство сельского хозяйства подчеркивает, что эффективная сортировка не только повышает качество продукции, но и сводит к минимуму потери, тем самым повышая прибыльность предприятия. Все большее распространение получают оптические сортировочные системы, способные автоматизировать процесс и исключить ошибки человека. Однако перед предприятиями по-прежнему стоят сложные задачи, в том числе высокая стоимость оборудования, необходимость в постоянном техническом обслуживании и недостаточная подготовка персонала. Следовательно, исследование методов оптимизации эффективности сортировки картофеля становится все более актуальным [9].

Целью исследования является проведение анализа существующих методов сортировки картофеля, выявление ключевых проблемных аспектов, с которыми сталкиваются предприятия в ходе данного процесса, а также

разработка рекомендаций по оптимизации процессов сортировки.

Объект исследования — технологические процессы сортирования картофеля.

Результаты исследования

Картофель является сельскохозяйственным товаром мирового значения, входящим в число наиболее прибыльных культур благодаря своему статусу основного источника продовольствия во всем мире. Его пищевая ценность удовлетворяет различные потребности людей, сидящих на диете, обеспечивая их необходимыми витаминами, минералами (макро- и микроэлементами), антиоксидантами, аминокислотами, углеводами, биофлавоноидами и фитонцидами [9]. Россия занимает третье место в мире по производству картофеля. В соответствии с инициативой правительства по ускорению импортозамещения основных видов сельскохозяйственной продукции в 2024 году был собран значительный урожай картофеля. Этот показатель производства включает как крупные сельскохозяйственные предприятия, так и небольших независимых производителей, общий объем которых составил 7,3 млн тонн (рисунок 1).

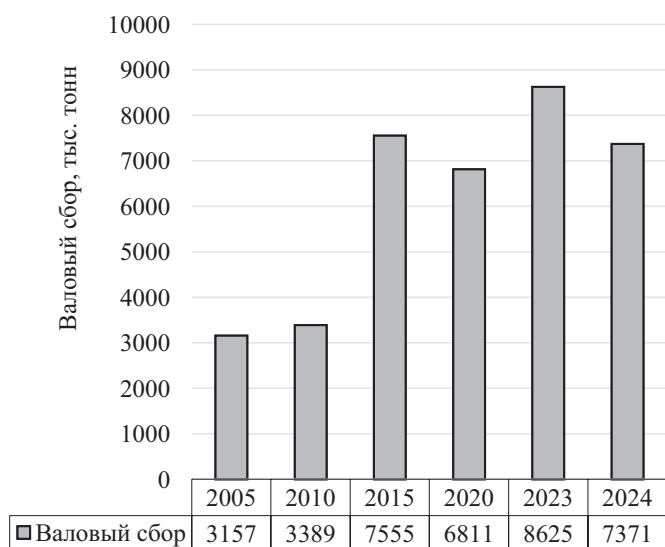


Рис. 1. Валовый сбор картофеля в динамике, тыс. тонн [3]

Лидером по сбору картофеля в промышленном секторе картофелеводства РФ в 2024 году является Брянская область (валовые сборы составили — 990,9 тыс. тонн, доля в общих сборах — 13,4 %). За год сборы сократились на 27,6 % (на 377,2 тыс. тонн). Второе место занимает Тульская область с объемом в 659,1 тыс. тонн. За год сборы здесь снизились на 11,4 %, а доля в общем по стране производстве составила 8,9 % [3].

Снижение объемов производства произошло как за счет некоторого сокращения размеров площадей, так и за счет снижения урожайности (рисунок 2).

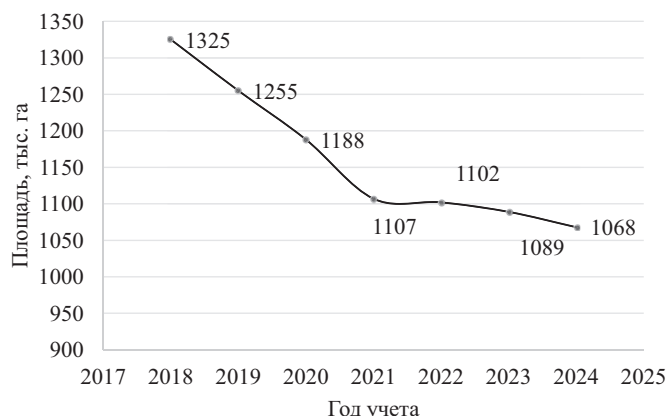


Рис. 2. Динамика площадей картофеля [1]

В 2024 году в Центральном федеральном округе находилась самая большая в России доля земель, отведенных под промышленное выращивание картофеля, — 100,8 тыс. га, что составляло 36,0 % от общей площади страны. Этот показатель снизился на 11,4 % (что эквивалентно 13,0 тыс. га) по сравнению с предыдущим годом. За ним следует Приволжский федеральный округ с площадью 43,2 тыс. га, что составляет 15,4 % от общей посевной площади. Однако это на 16,9 % (или на 8,8 тыс. га) меньше, чем в 2023 году. Аналогичным образом, площади промышленного выращивания картофеля в Сибирском федеральном округе сократились на 7,8 % (на 2,9 тыс. га), достигнув 33,8 тыс. га, что составило 12,1 % от общего объема выращивания картофеля в России. В остальных федеральных округах в 2024 году наблюдался разный уровень промышленного выращивания картофеля: в Уральском федеральном округе — 28,7 тыс. га (10,3 %); в Южном федеральном округе — 28,0 тыс. га (10,0 %); в Северо-Западном федеральном округе — 18,6 тыс. га (6,6 %); в Северо-Кавказском федеральном округе — 14,0 тыс. га (5,0 %); и Дальневосточный федеральный округ — 12,7 тыс. га (4,5 %) [1].

В настоящее время для классификации картофеля используется несколько методов (таблица 1).

Каждый метод сортировки картофеля обладает специфическими характеристиками, эффективность которых может варьироваться в зависимости от конкретных условий производства. Сортировка на роликах и ситах после сбора урожая стала стандартной практикой как в отечественном, так и в зарубежном оборудовании для переработки картофеля. Хотя оба метода позволяют калибровать клубни по толщине и ширине, ни один из них не имеет явного преимущества перед другим. Некоторые исследователи рекомендуют использовать сортировку на сите из-за ее способности одновременно сортировать картофель, отделяя сначала крупные фракции и, таким образом, сводя к минимуму порчу продукта [9].

Сортировка клубней картофеля является важнейшим этапом в производстве картофеля, поскольку она напрямую влияет на оптимальное использование собранного

Таблица 1.
Методы сортировки картофеля

Метод	Описание
Ручная сортировка	Отличается простотой и низкой затратой времени. Работники индивидуально отбирают картофель на основе заранее определенных критериев. Ручная сортировка, требующая минимальных затрат на оборудование, требует значительного количества рабочей силы и подвержена человеческим ошибкам.
Механическая сортировка	Использование специализированного оборудования, такого как сортировочные устройства, может значительно ускорить процесс. Механические системы способны классифицировать картофель по размеру и форме, однако их эффективность может снизиться при обнаружении поврежденного или порченого продукта.
Оптическая сортировка	Этот усовершенствованный подход использует камеры и датчики для автоматического определения качества картофеля. Оптические системы могут эффективно выявлять дефекты, связанные с истечением срока годности или механическими повреждениями, что значительно повышает точность сортировки.

урожая [5]. Точное фракционирование гарантирует, что картофель будет классифицирован в соответствии с его размером, качеством и назначением. Это, в свою очередь, влияет на такие ключевые факторы, как качество семенного картофеля, которое впоследствии влияет на урожайность и характеристики хранения. Для повышения эффективности сортировки картофеля можно принять несколько мер:

1. Внедрение автоматизированных линий сортировки повышает скорость обработки и сводит к минимуму человеческие ошибки.
2. Интеграция оптических систем значительно повышает точность сортировки, позволяя проводить точную идентификацию и разделение на основе визуальных характеристик, тем самым сокращая количество отходов.
3. Комплексные программы обучения для сортировщиков повышают их квалификацию и снижают вероятность ошибок.
4. Использование систем мониторинга и анализа данных позволяет оптимизировать процессы сортировки. Эти системы могут выявлять узкие места в производственной цепочке, способствуя целенаправленным улучшениям.

Наиболее перспективным направлением повышения эффективности сортировки картофеля является внедрение оптической системы сортирования клубней с применением технического зрения. Этот подход оптимизирует послеуборочную обработку за счет интеграции различных механических компонентов в единую производственную линию. Примечательно, что в этой системе

используется конвейерный сортировщик, оснащенный системой видеонаблюдения на основе камер, которая охватывает всю рабочую зону двух конвейерных лент. Блок управления обрабатывает визуальные данные и управляет исполнительными механизмами, оснащенными упруго деформируемыми сортировочными механизмами, приводимыми в действие электроприводами [7].

Исследования, проведенные Н.В. Сазоновым, демонстрируют превосходную точность оптической системы сортировки клубней картофеля. Эта система обеспечивает точность сортировки, превышающую 91 %, при скорости конвейера 1,2 метра в секунду, скорости подачи 0,75 килограмма в секунду и времени работы вспомогательного рабочего органа 1,8 секунды. Важно отметить, что этот процесс снижает повреждение клубней всего до 2,3 %, что соответствует строгим агротехническим стандартам послеуборочной обработки. Примечательно, что этот оптический метод приводит к снижению повреждения труб в среднем на 9,8 % по сравнению с традиционными методами механической сортировки, широко используемыми в стране. Внедрение линии послеуборочной обработки картофеля с автоматизированной оптической системой сортировки корнеплодов позволит получить существенные экономические выгоды. По предварительным расчетам, годовой экономический эффект составит 316 011 рублей. Кроме того, прогнозируется ежегодная экономия в размере 20 354 рублей благодаря повышению производительности, точности сортировки и минимизации повреждений картофеля. Короткий срок окупаемости инвестиций — всего четыре месяца — свидетельствует о высокой финансовой эффективности данного проекта [6].

Заключение

Повышение эффективности производства картофеля требует комплексного подхода, основанного на механизации и научных методах выращивания. Это предполагает интеграцию оборудования для выполнения основных и дополнительных задач по всей производственной цепочке, от посадки и сбора урожая до первичной обработки и хранения. Современное картофелеводство ставит во главу угла рентабельность не только за счет повышения урожайности, но и за счет оптимизации методов послеуборочной обработки. К ним относятся передовые технологии обработки и хранения клубней, позволяющие минимизировать потери и максимизировать экономическую отдачу.

Оценка существующих технологий, используемых при послеуборочной переработке картофеля, показывает, что автоматизация систем оптической сортировки представляет собой наиболее эффективную стратегию повышения эффективности. Эти системы могут упростить требования законодательства на целых 70 % при одновременном увеличении производительности до 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Посевные площади РФ в 2024 г. весеннего учета в хозяйствах всех категорий — Росстат. — <https://zerno.ru/node/27070> (дата обращения 02.05.2025)
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.05.2018 № 559 «О внесении изменений в Федеральную научно-техническую программу развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы», Москва. — 61 с.
3. Рынок картофеля: ситуация в России, мировые производители, цены и тенденции — URL: https://dzen.ru/a/Zy81SIUY_nk_bRuQ?ysclid=mben13tj2l449463551
4. Сазонов Н.В. Анализ способов и устройств для сортирования картофеля / В сборнике: Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО2019). Сборник трудов VII // Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ДГТУ (РИСХМ). — 2019. — С. 210–215.
5. Сазонов Н.В. Технологическое и техническое обеспечение производства картофеля в России / Н.В. Сазонов, А.А. Дорохов // Картофель и овощи. — 2019. — № 3. — С. 20–22.
6. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А. Транспортировка и послеуборочная доработка клубней картофеля // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию первого выпуска технологов с.-х. пр-ва. — 2018. — С. 215–221.
7. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А., Аллаяров Ж.Ж. Инновационные технологии послеуборочной доработки клубней картофеля // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: матер. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. — С. 416–420. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А., Аллаяров Ж.Ж. Инновационные технологии послеуборочной доработки клубней картофеля // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: матер. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. — С. 416–420.
8. Ушачев И.Г., Маслова В.В., Колесников А.В. (2022). Нарастивание объемов агропромышленного производства для обеспечения продовольственной безопасности и увеличения экспортного потенциала АПК России. Экономика региона, 18 (4). С. 1178–1193. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-15>.
9. Федоренко В.Ф., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Мишуров Н.П., Щеголихина Т.А., Манохина А.А., Воронов Н.В., Баранов В.В. Инновационные технологии и оборудование для сортировки и хранения картофеля: аналит. обзор. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. — 84 с.
10. Wei Z C Experiment and analysis of potato-soil separation based on impact recording technology / Wei Z C, Li H W, Mao Y J, Sun C Z, Li X Q, Liu W Z, // Int J Agric & Biol Eng. — 2019. — No 12 (5). P. 71–80.

© Карякин Александр Тимофеевич (karyakin2279@mail.ru); Соцков Владимир Алексеевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СТРОГОЕ МНОЖЕСТВО РЕШЕНИЙ ИСЛАУ

A STRICT SOLUTION SET TO ISLAE

F. Kachanov

Summary. The paper presents a new approach to determining the solution of interval systems of linear algebraic equations (ISAs), which differs from the classical set-theoretic interpretations. The concept of a strict solution set is introduced, which is defined as the set of interval vectors $\{X\}$ for which the result of the standard interval multiplication $[A] \cdot \{X\}$ is in the absorption relation with a given right-hand side $\{B\}$. This definition is algebraic and computationally oriented, as it allows direct algorithmic verification taking into account machine error. The article also suggests a method for finding $\{X\}$ and a method for verifying that the resulting solution belongs to a strict set of solutions.

In addition to the formal definition and illustrative example, the article examines the areas of practical application of the approach: from sustainable engineering design and solving interval inverse problems to formal verification of algorithms. The results show that a rigorous set of solutions offers a fundamentally new tool for tasks that require mathematically guaranteed results under conditions of parametric uncertainty.

Keywords: ISLAE, interval analysis, interval arithmetic, solution set, interval matrix, interval vector.

Качанов Федор Константинович

Аспирант,

МИРЭА — Российский технологический университет,

mirea@mirea.ru

Аннотация. В работе представлен новый подход к определению решения интервальных систем линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ), отличный от классических теоретико-множественных трактовок. Вводится понятие строгого множества решений, которое определяется как множество интервальных векторов $\{X\}$, для которых результат стандартного интервального умножения $[A] \cdot \{X\}$ находится в отношении поглощения с заданной правой частью $\{B\}$. Данное определение является алгебраическим и вычислительно ориентированным, так как допускает прямую алгоритмическую проверку с учётом машинной погрешности. Также в статье предлагается метод нахождения $\{X\}$ и метод проверки принадлежности полученного решения строгому множеству решений.

Помимо формального определения и иллюстративного примера, в статье рассматриваются сферы практического применения подхода: от устойчивого инженерного проектирования и решения интервальных обратных задач до формальной верификации алгоритмов. Результаты показывают, что строгое множество решений предлагает принципиально новый инструмент для задач, требующих математически гарантированных результатов в условиях параметрической неопределённости.

Ключевые слова: ИСЛАУ, интервальный анализ, интервальная арифметика, множество решений, интервальная матрица, интервальный вектор.

Введение

Интервальная система линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ) отличается от системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) тем, что она может содержать интервальные числа, т.е. такие числа, которые записываются в виде:

$$\mathbf{x} = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbb{R} | x_{\text{cp}} - \Delta x \leq x \leq x_{\text{cp}} + \Delta x\} \quad (1)$$

где:

\mathbf{x} — интервальное число, которое обычно записывается полужирным шрифтом;

\underline{x} и \bar{x} — нижняя и верхняя границы \mathbf{x} соответственно;

x_{cp} — среднее значение \mathbf{x} ;

Δx — радиус \mathbf{x} [1].

В общей форме ИСЛАУ записывается аналогично СЛАУ:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1m}x_m + b_1 = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2m}x_m + b_2 = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nm}x_m + b_n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где:

a_{ij} и b_i — интервальные коэффициенты с индексами $i \in 1, 2, \dots, n$ и $j \in 1, 2, \dots, m$;

x_j — интервальная неизвестная величина, которую необходимо определить.

В матричной форме ИСЛАУ записывается как равенство:

$$[A] \cdot \{X\} = \{B\} \quad (3)$$

где:

интервальная матрица $[A]$ состоит из интервальных элементов a_{ij} ;

интервальный вектор правой части $\{B\}$ состоит из интервальных элементов b_i ;

интервальный вектор решения $\{X\}$ состоит из интервальных элементов x_j ;

в таком контексте i — номер строки, а j — номер столбца матрицы $[A]$.

В отличие от СЛАУ, для ИСЛАУ существуют различные определения решений, а точнее, множеств решений. На практике их можно упростить в связи с тем, что матрица $[A]$ обычно квадратная, то есть, количество интервальных линейных алгебраических уравнений равно количеству интервальных неизвестных величин и равно n . В данной статье будем рассматривать только такой случай.

1. Обобщёнными множествами решений интервальной системы уравнений называют множества вида:

$$\left\{ \left\{ X \right\} \in R^n \left(Q_1 z_{\pi_1} \in z_{\pi_1} \right) \left(Q_2 z_{\pi_2} \in z_{\pi_2} \right) \dots \right. \\ \left. \left\{ \dots \left(Q_{n^2+n} z_{\pi_{n^2+n}} \in z_{\pi_{n^2+n}} \right) \left([A] \{ X \} = \{ B \} \right) \right\} \right\} \quad (4)$$

где $Q_1, Q_2, \dots, Q_{n^2+n}$ — логические кванторы \forall или \exists ; $(z_1, z_2, \dots, z_{n^2+n}) := (a_1, \dots, a_{n^2}, b_1, \dots, b_n) \in R_n^{n^2+n}$ — агрегированный вектор параметров рассматриваемой системы уравнений; $(z_1, z_2, \dots, z_{n^2+n}) := (a_1, \dots, a_{n^2}, b_1, \dots, b_n) \in IR_n^{n^2+n}$ — агрегированный вектор интервалов возможных значений этих параметров; $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n^2+n})$ — некоторая перестановка натуральных чисел $1, 2, \dots, n^2+n$.

Следующие множества решений являются частными случаями этого

2. Объединённым множеством решений называется множество

$$\left\{ \left\{ X \right\} \in R^n \left(\exists [A] \in [A] \right) \left(\exists \{ B \} \in \{ B \} \right) \left([A] \{ X \} = \{ B \} \right) \right\} \quad (5)$$

Эта означает: «найдутся такие матрица $[A]$ и вектор $\{B\}$, что равенство выполняется».

3. Допустимым множеством решений называется множество

$$\left\{ \left\{ X \right\} \in R^n \left(\forall \{ B \} \in \{ B \} \right) \left(\exists [A] \in [A] \right) \left([A] \{ X \} = \{ B \} \right) \right\} \quad (6)$$

Эта означает: «для любого вектора $\{B\}$ можно найти такую матрицу $[A]$, что равенство выполняется».

4. Контрольным множеством решений называется множество

$$\left\{ \left\{ X \right\} \in R^n \left(\forall [A] \in [A] \right) \left(\exists \{ B \} \in \{ B \} \right) \left([A] \{ X \} = \{ B \} \right) \right\} \quad (7)$$

Эта означает: «для любой матрицы $[A]$ можно найти такой вектор $\{B\}$, что равенство выполняется» [2].

1. Другой подход к определению множества решений

Несмотря на свою фундаментальность, перечисленные множества решений обладают одним общим

свойством: они описывают совокупность точечных решений, так называемую оболочку решений, но не дают единого интервального вектора, который можно было бы формально подставить в исходную систему. Иными словами, для них не выполняется прямое интервальное равенство (3). Это создаёт разрыв между абстрактным описанием решения и возможностью его алгебраической верификации. Для преодоления данного разрыва в данной статье будет рассмотрена концепция строгого множества решений, определяемого именно как множество таких интервальных векторов $\{X\}$, для которых равенство (3) выполняется в смысле стандартных операций интервальной арифметики.

Для начала разберёмся, как это будет работать с линейным уравнением вида:

$$a \cdot x = b \quad (8)$$

Определение 1. Строгое множество решений интервального уравнения — это все значения интервальной неизвестной величины x , при которых равенство выполняется.

То есть, при подстановке этого решения в исходное уравнение должно получиться тождество. Разберём на примере.

Пример 1.

Пусть $a = [17, 18]$, $b = [187, 216]$.

Тогда уравнение (8) можно записать так:

$$[17, 18] \cdot x = [187, 216] \quad (9)$$

Попробуем решить это уравнение классическим способом при помощи интервального деления:

$$x = \frac{[187, 216]}{[17, 18]} = \left[\frac{187}{18}, \frac{216}{17} \right] \approx [10.38, 12.71] \quad (10)$$

Подставим результат в уравнение (9) для проверки:

$$[17, 18] \cdot [10.38, 12.71] = \\ = [17 \cdot 10.38, 18 \cdot 12.71] \approx [176.46, 228.78] \neq [187, 216] \quad (11)$$

Очевидно, тождество не получилось. Тогда попробуем определить, чему должны быть равны нижняя и верхняя границы x , чтобы получилось тождество. Поскольку все границы a и b положительные, можно предположить, что обе границы x тоже положительные. Тогда, зная, что $\underline{x} \leq \bar{x}$, границы b можно определить следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{b} = \min(17\underline{x}, 17\bar{x}, 18\underline{x}, 18\bar{x}) = 17\underline{x} = 187 \\ \bar{b} = \max(17\underline{x}, 17\bar{x}, 18\underline{x}, 18\bar{x}) = 18\bar{x} = 216 \end{cases} \quad (12)$$

Из чего следует:

$$\mathbf{x} = \left[\frac{187}{17}, \frac{216}{18} \right] = [11,12] \quad (13)$$

Подставим результат в уравнение (9) для проверки:

$$[17,18] \cdot [11,12] = [17 \cdot 11, 18 \cdot 12] = [187, 216] \quad (14)$$

Таким образом, множество решений, полученное в (13) является строгим множеством решений.

2. Строгое решение интервальной системы линейных алгебраических уравнений

Интервальное уравнение (8), фактически, является частным случаем (3) с $n = 1$. На практике n может быть очень большим, в связи с чем для решения ИСЛАУ зачастую используются технические средства. Использование технических средств приводит к появлению погрешностей округления. Для интервальной арифметики было определено правило направленного округления в таком случае: нижняя граница интервала округляется всегда вниз, а верхняя — вверх [3]. Это приводит к существенному усложнению нахождения строгого множества решений ИСЛАУ. В данной работе рассмотрим простой случай — уменьшим строгость определения для учёта погрешности округления.

Определение 2. Строгое множество решений интервальной системы линейных алгебраических уравнений — это множество всех интервальных векторов $\{X\}$, для которых вычисленный результат умножения поглощает исходную правую часть $\{B\}$ с точностью до заранее выбранного малого неотрицательного параметра ϵ .

Для пояснения введём вектор $\{E\}$ размером n^2 , у которой каждый элемент является интервалом $[-\epsilon, \epsilon]$. Тогда для строгого множества решений должно быть истиной:

$$(\{A\} \cdot \{X\} \supseteq \{B\}) \cap (\{A\} \cdot \{X\} \subseteq \{B\} + \{E\}) \quad (15)$$

Параметр ϵ должен выбираться исключительно с учётом особенностей округления в процессе определения X .

Простой пример: решим систему из 2 уравнений с 3 значащими цифрами после запятой. Параметр ϵ можно взять на один порядок больше, например, $\epsilon = 0.01$.

Пример 2.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} [3.532, 3.536] & [1.764, 1.767] \\ [1.246, 1.249] & [2.987, 2.991] \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} [x_1, \bar{x}_1] \\ [x_2, \bar{x}_2] \end{array} \right\} = \\ & = \left\{ \begin{array}{c} [14.185, 14.221] \\ [12.401, 12.434] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

Поскольку все значения положительные, можно разделить ИСЛАУ на 2 СЛАУ — по одной на нижнюю и верхнюю границы:

$$\left[\begin{array}{cc} 3.532 & 1.764 \\ 1.246 & 2.987 \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 14.185 \\ 12.401 \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\left[\begin{array}{cc} 3.536 & 1.767 \\ 1.249 & 2.991 \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 14.221 \\ 12.434 \end{array} \right\} \quad (18)$$

Дальше решаем их любым способом и выполняем направленное округление $\mathbf{x}: \underline{x} = (2.453, 3.128)^T, \bar{x} = (2.458, 3.132)^T$.

Теперь сделаем проверку (15):

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} [3.532, 3.536] & [1.764, 1.767] \\ [1.246, 1.249] & [2.987, 2.991] \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} [2.453, 2.458] \\ [3.128, 3.132] \end{array} \right\} = \\ & = \left\{ \begin{array}{c} [14.181, 14.226] \\ [12.399, 12.438] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

Как видно, $\{A\} \cdot \{X\} \supseteq \{B\}$. Теперь добавим $\{E\}$:

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{c} [14.185, 14.221] \\ [12.401, 12.434] \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} [-0.01, 0.01] \\ [-0.01, 0.01] \end{array} \right\} = \\ & = \left\{ \begin{array}{c} [14.175, 14.231] \\ [12.391, 12.444] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом $\{B\} + \{E\} \supseteq \{A\} \cdot \{X\}$.

3. Метод нахождения строгого множества решений

Указанный ранее метод решения ИСЛАУ при помощи разделения его на 2 СЛАУ подходит только при условии знакопостоянства $\{A\}$. Теперь найдём более общий метод и начнём с частного случая (8).

Задача нахождения такого \mathbf{x} , фактически, является задачей восстановления одного множителя по известному второму множителю и произведению, а также, в отличие от интервального деления, является обратной для интервального умножения. Сложность заключается в использовании интервальным умножением необратимых функций «min» и «max».

Первым делом определим в каком случае \mathbf{x} может быть найден, а точнее, могут быть найдены его нижняя и верхняя границы. В этом вопросе следует обратить внимание на знаки \mathbf{a} и \mathbf{x} . Разберём по 3 случая для каждого из них: интервал строго меньше 0, интервал строго больше 0 и интервал содержит 0 и составим таблицу 1.

Первое, на что стоит обратить внимание — это то, что не во всех случаях используются обе границы \mathbf{x} . Это говорит о том, что случай $0 \in \mathbf{a}$ необходимо рассмотреть

Таблица 1.

Результат работы функций «min» и «max»

	$\underline{x} \leq \bar{x} < 0 (x < 0)$	$\underline{x} \leq 0 \leq \bar{x} (x \ni 0)$	$0 < \underline{x} \leq \bar{x} (x > 0)$
$\underline{a} \leq \bar{a} < 0 (a < 0)$	$\underline{b} = \bar{a} \cdot \bar{x}$ $\bar{b} = \underline{a} \cdot \underline{x}$	$\underline{b} = \underline{a} \cdot \bar{x}$ $\bar{b} = \underline{a} \cdot \underline{x}$	$\underline{b} = \underline{a} \cdot \bar{x}$ $\bar{b} = \bar{a} \cdot \underline{x}$
$\underline{a} \leq 0 \leq \bar{a} (a \ni 0)$	$\underline{b} = \bar{a} \cdot \underline{x}$ $\bar{b} = \underline{a} \cdot \underline{x}$	$\underline{b} = \min(\underline{a} \cdot \bar{x}, \bar{a} \cdot \underline{x})$ $\bar{b} = \max(\bar{a} \cdot \bar{x}, \underline{a} \cdot \underline{x})$	$\underline{b} = \underline{a} \cdot \bar{x}$ $\bar{b} = \bar{a} \cdot \bar{x}$
$0 < \underline{a} \leq \bar{a} (a > 0)$	$\underline{b} = \bar{a} \cdot \underline{x}$ $\bar{b} = \underline{a} \cdot \bar{x}$	$\underline{b} = \bar{a} \cdot \underline{x}$ $\bar{b} = \bar{a} \cdot \bar{x}$	$\underline{b} = \underline{a} \cdot \underline{x}$ $\bar{b} = \bar{a} \cdot \bar{x}$

отдельно. Для \mathbf{a} , не содержащих 0, можно вывести простую формулу нахождения \mathbf{x} , уникальную для каждого случая:

$$x = [\underline{b} / \underline{a}, \bar{b} / \bar{a}], \{x > 0, a > 0\} \tag{21}$$

$$x = [\underline{b} / \bar{a}, \bar{b} / \underline{a}], \{x < 0, a < 0\} \tag{22}$$

$$x = [\underline{b} / \bar{a}, \bar{b} / \bar{a}], \{x \ni 0, a > 0\} \tag{23}$$

$$x = [\bar{b} / \bar{a}, \underline{b} / \underline{a}], \{x > 0, a < 0\} \tag{24}$$

$$x = [\bar{b} / \underline{a}, \underline{b} / \bar{a}], \{x < 0, a < 0\} \tag{25}$$

$$x = [\bar{b} / \underline{a}, \underline{b} / \underline{a}], \{x \ni 0, a < 0\} \tag{26}$$

Для понимания проблемы знакопеременного \mathbf{a} используем пример.

Пример 3.

$$[-17, 18] \cdot [11, 12] = [-204, 216] \tag{27}$$

Попробуем восстановить \mathbf{x} из \mathbf{a} и \mathbf{b} , как в примере 1, но с использованием таблицы 1:

$$\begin{cases} \underline{b} = -17\bar{x} = -204 \\ \bar{b} = 18\underline{x} = 216 \end{cases} \tag{28}$$

Из чего следует:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{-204}{-17} = 12 \\ \underline{x} = \frac{216}{18} = 12 \end{cases} \tag{29}$$

Что не даёт никакой информации о \underline{x} . Кроме того, в данной задаче считалось, что мы знаем все знаки, но на практике мы вполне можем не иметь никакой информации о знаках границ \mathbf{x} . Тем не менее, некоторая информация о \underline{x} всё же имеется.

Во-первых, при работе с правильными интервалами $\underline{x} \leq \bar{x}$, т.е. $\underline{x} \leq 12$.

Во-вторых, если $\underline{x} \leq 0$, то поведение функций min и max меняется на другой столбец таблицы 1, то есть, с учётом (28), можно записать:

$$\begin{cases} \underline{b} = \min(-17\bar{x}, 18\underline{x}) = -17\bar{x} = -204 \\ \bar{b} = \max(-17\underline{x}, 18\bar{x}) = 18\bar{x} = 216 \end{cases} \tag{30}$$

Это значит, что:

$$\begin{cases} -17\bar{x} \leq 18\underline{x} \\ -17\underline{x} \leq 18\bar{x} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \underline{x} \geq \frac{-204}{18} \geq -11.334 \\ \underline{x} \geq \frac{216}{-17} \geq -12.706 \end{cases} \tag{31}$$

Таким образом $\underline{x} = [-11.334, 12]$ — нижняя граница множества \mathbf{x} сама является множеством, причём исходное (27) значение 11 тоже в него входит. Тем не менее, наиболее корректным решением будет использование нижней границы этого множества в качестве нижней границы \mathbf{x} . Проверим, что всё правильно подстановкой в (27):

$$[-17, 18] \cdot [-11.334, 12] = [18 \cdot -11.334, 18 \cdot 12] = [-204.012, 216] \tag{32}$$

Разница с (27) появилась в связи с округлением \underline{x} , можно считать, что она не превышает ϵ .

Теперь можно сформулировать решение для такого случая:

$$x = [\min(\underline{b} / \bar{a}, \bar{b} / \underline{a}), \max(\underline{b} / \underline{a}, \bar{b} / \bar{a})], \{x > 0, a \ni 0\} \tag{33}$$

Аналогичным образом выводятся:

$$x = [\min(\underline{b} / \bar{a}, \bar{b} / \underline{a}), \max(\underline{b} / \underline{a}, \bar{b} / \bar{a})], \{x < 0, a \ni 0\} \tag{34}$$

$$x = \left[\min\left(\frac{b}{a}, \frac{\bar{b}}{\bar{a}}\right), \max\left(\frac{b}{\bar{a}}, \frac{\bar{b}}{a}\right) \right], \quad \{x \geq 0, a \geq 0\} \quad (35)$$

На основании таблицы 1, примера 3 и формул (33–35) можно сделать вывод, что при $a \geq 0$ обе границы x могут быть восстановлены только в том случае, когда выполняется следующее условие:

$$\left(\left| \frac{b}{a} \cdot x \right| < \left| \frac{\bar{b}}{\bar{a}} \cdot \bar{x} \right| \right) \cap \left(\left| \frac{b}{\bar{a}} \cdot \bar{x} \right| < \left| \frac{\bar{b}}{a} \cdot x \right| \right) \cup \left(\left| \frac{b}{a} \cdot x \right| > \left| \frac{\bar{b}}{\bar{a}} \cdot \bar{x} \right| \right) \cap \left(\left| \frac{b}{\bar{a}} \cdot \bar{x} \right| > \left| \frac{\bar{b}}{a} \cdot x \right| \right) \quad (36)$$

Однако, для соответствия определению 2 восстанавливать обе границы x не требуется. В таком случае можно объединить формулы (33–35) в одну:

$$x = \left[\min\left(\frac{b}{a}, \frac{\bar{b}}{\bar{a}}\right), \max\left(\frac{b}{\bar{a}}, \frac{\bar{b}}{a}\right) \right], \{a \geq 0\} \quad (37)$$

Как было указано выше, про знак x может не быть никакой информации, в таком случае, при знакопостоянстве a потребуется решить 3 уравнения и проверить соответствия условия для x с его результирующим значением [4].

4. Модификация метода для работы с ИСЛАУ

В отличие от уравнения, в ИСЛАУ значение каждого интервала вектора $\{B\}$ складывается из нескольких пар множителей:

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (38)$$

С одной стороны, это значит, что формулы (21–26) всё ещё актуальны для каждого отдельно взятого слагаемого, но с другой получается, что для вычисления каждого b_i может быть использовано несколько x_j , что делает невозможным проведение проверки (36) через границы b , как это делается в (37).

Это приводит к необходимости решения СЛАУ вида:

$$[A'] \cdot \{X'\} = \{B'\} \quad (39)$$

где матрица $[A']$ будет иметь размер $(2n)^2$ и должна быть невырожденной; векторы $\{X'\}$ и $\{B'\}$ — размер $2n$.

Для записи такой СЛАУ в матричном виде можно записать по очереди все границы интервальных векторов $\{X\}$ и $\{B\}$ таким образом, чтобы сначала шли парой нижняя и верхняя границы одного элемента, потом следующего и т.д. Тогда интервальную матрицу $[A]$ можно будет записать в матрицу $[A']$ по блокам, то есть каждый элемент $[A]$ будет соответствовать блоку размером 2^2 . Блоки можно составить на основе формул (21–26) следующим образом:

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} a_{ij} & 0 \\ 0 & a_{ij} \end{bmatrix}, \{x_j > 0, a_{ij} > 0\} \quad (40)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{ij} & 0 \\ 0 & \bar{a}_{ij} \end{bmatrix}, \{x_j < 0, a_{ij} < 0\} \quad (41)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{ij} & 0 \\ 0 & a_{ij} \end{bmatrix}, \{x_j \geq 0, a_{ij} > 0\} \quad (42)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 \end{bmatrix}, \{x_j > 0, a_{ij} < 0\} \quad (43)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \bar{a}_{ij} \\ \bar{a}_{ij} & 0 \end{bmatrix}, \{x_j < 0, a_{ij} < 0\} \quad (44)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 \end{bmatrix}, \{x_j \geq 0, a_{ij} < 0\} \quad (45)$$

Можно отметить наличие частного случая — наличие одного и того же знака у всех a_{ij} позволяет разделить ИСЛАУ на 2 СЛАУ — одну для нижних границ, а другую — для верхних [4], что было использовано в примере 2. К сожалению, в связи с тем, что для вычисления каждого b_i может быть использовано несколько x_j , с (37) сделать так же не получится. Тем не менее всё ещё можно составить 4 блока, только один из которых позволит получить верное решение. Таким образом каждый случай $a_{ij} \geq 0$ увеличивает количество вычислений в 4 раза. Не обязательно выполнять все вычисления, поскольку чаще всего подходящим является один из блоков (46, 49), который подставляет в ненулевые ячейки наибольшую по модулю границу.

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{ij} & 0 \\ 0 & \bar{a}_{ij} \end{bmatrix}, \{a_{ij} \geq 0\} \quad (46)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{a}_{ij} & \bar{a}_{ij} \end{bmatrix}, \{a_{ij} \geq 0\} \quad (47)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{ij} & a_{ij} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \{a_{ij} \geq 0\} \quad (48)$$

$$a'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & a_{ij} \\ \bar{a}_{ij} & 0 \end{bmatrix}, \{a_{ij} \geq 0\} \quad (49)$$

Осталось проверить этот метод на примере. Попробуем решить популярную интервальную линейную систему [5].

Пример 4.

$$\begin{bmatrix} [2,4] & [-2,1] \\ [-1,2] & [2,4] \end{bmatrix} \cdot \{X\} = \left\{ \begin{bmatrix} [-2,2] \\ [-2,2] \end{bmatrix} \right\} \quad (50)$$

Возьмём $\epsilon = 0.01$. Поскольку знаки x_1 и x_2 неизвестны, а также присутствуют два $a_{ij} \geq 0$, в худшем случае, необходимо решить $3^n \cdot 4^2 = 144$ СЛАУ. Предположим, что

оба интервала содержат 0, а для случаев $a_{12} \ni 0$ и $a_{21} \ni 0$ подставим блоки, соответствующие (49) и (46), поскольку наибольшие модули у границ -2 и 2, соответственно.

Пусть $x_1 \ni 0$ и $x_2 \ni 0$, тогда, используя (42, 45, 46, 49), можно составить СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 4 & -2 & 0 \\ 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 4 \end{bmatrix} \cdot \{X'\} = \begin{Bmatrix} -2 \\ 2 \\ -2 \\ 2 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Решением этой СЛАУ будет $\{X'\} = (-0.334, 0.334, -0.334, 0.334)^T$. Это решение подходит по знакам, теперь проверим выполнение (15).

$$\begin{bmatrix} [2,4] & [-2,1] \\ [-1,2] & [2,4] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} [-0.334, 0.334] \\ [-0.334, 0.334] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [-2.004, 2.004] \\ [-2.004, 2.004] \end{Bmatrix} \quad (52)$$

Как видно, $[A] \cdot \{X\} \ni \{B\}$. Теперь добавим $\{E\}$:

$$\begin{Bmatrix} [-2,2] \\ [-2,2] \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [-0.01, 0.01] \\ [-0.01, 0.01] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [-2.01, 2.01] \\ [-2.01, 2.01] \end{Bmatrix} \quad (53)$$

Таким образом $\{B\} + \{E\} \ni [A] \cdot \{X\}$.

Нам повезло, что решение было найдено с 1 попытки из 144. Но не стоит пугаться, поскольку на практике, например, в математической физике, $\{X\}$ может обозначать такую величину, которая не может быть отрицательной, а $[A]$ редко содержит элементы с разными знаками границ, этого достаточно для решения одной СЛАУ, вместо экспоненциального количества.

5. Сферы применения строгого множества решений

Введение строгого множества решений мотивировано не только теоретическим интересом, но и потребностями прикладных задач, где классические теоретико-множественные определения оказываются недостаточными. Ключевые преимущества подхода, гарантированное выполнение условий для всех возможных реализаций параметров и возможность прямой алгоритмической проверки, делают его незаменимым в следующих областях.

В инженерном проектировании параметры материалов, нагрузок или геометрии часто известны лишь в некоторых пределах (интервалах). Задача устойчивого проектирования состоит в нахождении таких диапазонов управляемых параметров системы, при которых её характеристики гарантированно остаются в заданных допустимых пределах при любых вариациях неконтролируемых факторов.

Строгое множество решений $\{X\}$ является именно таким диапазоном. Если $[A]$ — интервальная матрица влияния, а $\{B\}$ — допустимый интервал выходных характеристик, то любой конкретный вектор $\{X\} \in \{X\}$ гарантированно приведёт систему в состояние $\{B\} \in \{B\}$ для некоторой комбинации параметров $[A] \in [A]$. Это позволяет формально обосновать безопасность и надёжность конструкции.

Интервальные обратные задачи — это один из наиболее важных и естественных контекстов для применения строгого решения. В обратных задачах по наблюдаемым следствиям $\{B\}$ и известной модели взаимосвязи $[A]$ требуется определить такой интервальный вектор входных параметров или воздействий $\{X\}$, который точно и гарантированно объясняет все возможные наблюдения.

Строгое множество решений даёт полное описание всех таких интервальных входов. Например, в геофизике это может быть определение диапазона возможных глубин залегания пласта по интервальным данным сейсмического зондирования [6]. В медицине — оценка интервала концентраций вещества в ткани по результатам томографии с погрешностью [7].

В компьютерных науках, особенно в областях, связанных с безопасностью и надёжностью, существует острая потребность в формальном доказательстве корректности работы систем при всех возможных входах и состояниях. Условия инвариантности или безопасности гибридной системы часто могут быть записаны в виде линейных ограничений с неопределёнными параметрами $[A]$. Доказательство того, что множество достижимых состояний $\{X\}$ удовлетворяет условию безопасности $\{B\}$, сводится к проверке отношения (15). Такую проверку можно полностью автоматизировать с использованием библиотеки гарантированных интервальных вычислений, что критически важно для сертификации критического ПО.

Таким образом, строгое множество решений занимает уникальную нишу, заполняя пробел между чисто теоретическим анализом и потребностями практического инженерного и компьютерного проектирования, где на первом месте стоят гарантии и верифицируемость. Оно смещает фокус с вопроса «что возможно?» на вопрос «что можно гарантировать?», предлагая методологию для нахождения безопасных рабочих диапазонов параметров в условиях неизбежной параметрической неопределённости.

Заключение

В данной работе представлена новая концепция решения интервальных систем линейных алгебраических уравнений — строгое множество решений. В отличие от классических теоретико-множественных подходов,

объединённого, допустимого и контрольного, предлагаемое определение имеет ярко выраженную алгебраическую и вычислительно ориентированную природу. Оно формулируется как множество интервальных векторов $\{X\}$, для которых результат стандартного интервального умножения $[A] \cdot \{X\}$ находится в отношении поглощения ($\{B\} \supseteq [A] \cdot \{X\}$) с заданной правой частью $\{B\}$ при учёте гарантированных границ машинной погрешности.

Для этого было введено и формально определено строгое множество решений, адаптированное для практической верификации на ЭВМ. Ключевым условием выбрано отношение поглощения, а не точное равенство, что позволяет корректно работать в условиях конечной точности вычислений.

Разработан и продемонстрирован на модельном примере метод нахождения $\{X\}$. Он основан на предположении о работе функций «min» и «max». Также был продемонстрирован метод проверки принадлежности полученного решения строгому множеству решений с учётом машинной погрешности и направленного округления.

Выявлены и систематизированы ключевые сферы практического применения нового подхода. Его уни-

кальные преимущества — гарантированность выполнения условий для всех реализаций параметров и алгебраическая проверяемость — делают его особенно востребованным для устойчивого проектирования технических систем, решения интервальных обратных задач и формальной верификации алгоритмов и критических систем.

Таким образом, концепция строгого множества решений заполняет важный пробел между абстрактной теорией интервальных уравнений и потребностями прикладных задач, требующих гарантированных результатов и алгоритмической проверяемости. В отличие от известных «формальных» или «алгебраических» решений, данная концепция изначально учитывает вычислительный контекст.

Перспективы дальнейших исследований видятся в развитии эффективных алгоритмов не только для проверки, но и для прямого нахождения или аппроксимации строгого множества решений для широких классов интервальных матриц, анализе его топологических свойств и связи с другими типами решений, а также в более детальной адаптации метода к конкретным прикладным областям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moore R.E. Interval analysis. Prentice Hall, 1966. — 145 p.
2. Шарый С.П. Оптимальное внешнее оценивание множеств решений интервальных систем уравнений // Журнал «Вычислительные технологии». 2002. — Т. 7, № 6. — С. 90–113.
3. Стандарт IEEE для интервальной арифметики [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1788/4431/> (дата обращения 01.02.2026);
4. Качанов Ф.К. Обратимость интервального матрично-векторного умножения / Ф.К. Качанов // Сборник трудов XIV международной научной конференции «ИТ — Стандарт 2025», Москва, 10–11 декабря 2025 года. — Москва: МИРЭА — Российский Технологический Университет, 2025. — С. 306–313.
5. Шарый С.П. Алгебраический подход к анализу линейных статических систем с интервальной неопределённостью // Известия РАН. Теория и системы управления. — 1997. — № 3. — С. 51–61.
6. Virieux J. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics / Virieux J., Operto S // Geophysics. — 2009. — №6. — P. 127–152.
7. Bertero M., Boccacci P. Introduction to Inverse Problems in Imaging / Bertero M., Boccacci P. — Bristol: Institute of Physics Publishing, 1998. — p. 352.

© Качанов Федор Константинович (mirea@mirea.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

BPMN НОТАЦИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В EDTECH КОМПАНИЯХ

BPMN NOTATION FOR MODELLING BUSINESS PROCESSES IN EDTECH COMPANIES

I. Polonikov

Summary. This article examines current issues related to business process modelling using modern information technologies. The quantitative prerequisites for using formalised process modelling in the activities of digital platforms are highlighted separately. A comparative analysis of various modelling notations is also carried out in terms of their effectiveness and ability to take into account the specific features of organising learning processes in a digital environment. The study presents a process model of an adaptive educational environment developed by the author and designed in BPMN 2.0 notation, which allows for effective management.

Keywords: notation, digital platform, business process, modelling.

Полоников Илья Валерьевич

Аспирант, Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург
i.polonikov@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению актуальных вопросов, связанных с моделированием бизнес-процессов с применением современных информационных технологий. Отдельно выделены количественные предпосылки использования формализованного процессного моделирования в деятельности цифровых платформ. Также проведен сравнительный анализ различных нотаций моделирования, с точки зрения их эффективности и способности учитывать специфические особенности организации процессов обучения в цифровой среде. В процессе исследования представлена разработанная автором процессная модель адаптивной образовательной среды, спроектированная в нотации BPMN 2.0, позволяющая обеспечить эффективный контур управления.

Ключевые слова: нотация, цифровая платформа, бизнес-процесс, моделирование.

В последние годы технологии в сфере образования получили огромное развитие благодаря техническому прогрессу и растущему спросу на доступные, персонализированные и эффективные решения для обучения. Глобальная индустрия образовательных технологий (EdTech) переживает беспрецедентный рост, обусловленный развитием цифровой инфраструктуры, искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, а также меняющейся динамикой трудовых ресурсов. Согласно исследованию HolonIQ, к концу 2026 году расходы правительств, компаний и потребителей на EdTech достигнут 7,3 трлн дол. [1]. Это в свою очередь предопределяет необходимость использования специальных инструментов, позволяющих описывать сложные и крупные системы бизнес-процессов, с помощью специальных нотаций, которые позволяют обеспечить эффективность EdTech компаний.

Международная практика управления организационными системами демонстрирует устойчивый переход от текстовых регламентов к стандартизированным графическим моделям процессов [2]. Применение формальных нотаций дает возможность снизить неопределённость при проектировании, обеспечить сопоставимость процессов между подразделениями и создать основу для дальнейшей автоматизации и оптимизации. Таблица 1 характеризует количественные и отраслевые предпосылки актуальности применения стандартизированных средств моделирования процессов в деятельности цифровых образовательных организаций.

Анализ приведённых данных показывает, что рост сложности процессов высокая изменчивость образовательных продуктов и значительные издержки, связанные с автоматизацией, формируют объективную потребность в формализованном описании бизнес-процессов в EdTech компаниях. Кроме того, количественные оценки демонстрируют, что отсутствие единой процессной модели приводит к увеличению затрат, снижению управляемости и росту рисков на этапе внедрения информационных решений [3].

Таким образом, использование стандартизированных нотаций процессного моделирования выступает инструментально обоснованным подходом к повышению эффективности управления и устойчивости функционирования цифровых организационных систем в сфере образования, что подтверждает актуальность, теоретическую и практическую значимость темы данной статьи.

Несмотря на широкое распространение процессного моделирования в цифровых образовательных организациях, на сегодняшний день сохраняется еще ряд нерешённых методологических и прикладных задач, ограничивающих эффективность его использования в управлении сложными организационно-техническими системами.

Таблица 1.

Количественные предпосылки использования формализованного процессного моделирования в цифровых образовательных платформах¹

Аспект	Наблюдаемая проблема в EdTech	Статистика, подтверждающая актуальность использования специальных нотаций
Рост сложности процессов	Увеличение числа взаимосвязанных процессов (контент, ИТ, маркетинг, поддержка)	В EdTech-платформах среднего масштаба насчитывается 50–150 сквозных бизнес-процессов, из которых до 40 % не формализованы
Масштабирование онлайн-обучения	Быстрое увеличение числа пользователей и курсов	Среднегодовой рост EdTech-рынка составляет 15–20 %, при этом нагрузка на операционные процессы увеличивается пропорционально
Высокие операционные издержки	Неоптимизированные процессы приводят к росту затрат	До 30 % операционных затрат EdTech-компаний связано с ручными или дублирующими операциями
Автоматизация и ИТ-интеграция	Сложность согласования процессов с LMS, CRM, аналитикой	По отраслевым оценкам, 60–70 % ошибок автоматизации связаны с некорректным описанием бизнес-процессов
Управление качеством образовательных услуг	Отсутствие прозрачности процессов обучения	Компании, использующие формализованные модели процессов, демонстрируют снижение числа инцидентов на 20–35 %
Изменяемость образовательных продуктов	Частые обновления курсов и методик	В EdTech продукты обновляются в среднем 2–4 раза в год, что требует оперативного пересмотра процессных моделей
Межфункциональное взаимодействие	Несоответствие между ИТ, методистами и менеджментом	До 25 % задержек проектов вызваны отсутствием единого формального описания процессов
Контроль и мониторинг процессов	Сложность внедрения KPI и метрик эффективности	Нотации позволяют сократить время анализа процессов на 30–50 % по сравнению с текстовыми регламентами
Подготовка к автоматизации и BPMS	Высокая стоимость ошибок на этапе внедрения	Стоимость исправления ошибки на этапе эксплуатации в 5–10 раз выше, чем на этапе моделирования процессов

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении возможностей использования современных нотаций для моделирования бизнес-процессов в EdTech компаниях.

¹ Составлено автором по данным отчетов Object Management Group (OMG), BPTrends Associates, Gartner, McKinsey Global Institute, International Institute of Business Analysis (IIBA)

Итак, прежде всего, необходимо отметить, что нотация для моделирования бизнес-процессов в EdTech компаниях должна позволять назначать каждому пользователю соответствующую задачу в зависимости от его роли в процессе, в нужное время, а также интегрировать различные типы информации, такие как временные события, задачи по проверке, уведомления и оценки [4]. Кроме того, выбирая определенную нотацию, учитывая особенности работы EdTech индустрии и специфику этой сферы, необходимо четко формализовать задачи, которая она призвана решить.

Во-первых, управление курсами должно быть более эффективным и гибким, что позволит сократить затраты времени, необходимого преподавателям для контроля этих задач, а также ускорить и упростить внедрение новых образовательных мероприятий.

Во-вторых, помощь преподавателям визуализировать текущий статус курса и получить доступ к прогрессу каждого студента эффективным и простым способом. Это позволит подключаться вовремя, если студент испытывает замедление или резкое падение продуктивности.

В-третьих, улучшение вовлеченности студентов, что является очевидно ключевой целью, хотя, вероятно, самой сложной для достижения, особенно при большом количестве слушателей на цифровых платформах.

Для обоснования выбора оптимального инструмента моделирования в условиях высокой динамики и технологической сложности, свойственной сфере образовательных технологий, представляется целесообразным провести сопоставление наиболее распространенных стандартов: функционального моделирования (IDEF0), событийных цепочек процесса (EPC) и моделирования бизнес-процессов (BPMN).

В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа.

На основании данных, приведенных в таблице 2, можно сформулировать следующие выводы о преимуществе нотации BPMN перед IDEF0 и EPC для EdTech компаний.

Во-первых, ориентация на автоматизацию. Специфика EdTech-компаний подразумевает высокую степень цифровизации: автоматическое открытие доступов к урокам, проверку домашних заданий, рассылку уведомлений и генерацию сертификатов [5]. BPMN является единственной из рассмотренных нотаций, которая позволяет создать модель, готовую к немедленному исполнению в системах управления бизнес-процессами. IDEF0 и EPC остаются описательными инструментами, требующими дополнительного этапа программирования.

Таблица 2.

Сравнительная характеристика нотаций моделирования бизнес-процессов в EdTech компаниях²

Критерий сравнения	IDEFO	ЕРС / методология ARIS	BPMN
Методологический базис	Функциональная декомпозиция. Процесс рассматривается как соподчиненная иерархия функций.	Событийно-управляемая последовательность. Процесс представлен как цепочка событий и функций.	Потокоориентированное моделирование. Процесс рассматривается как поток работ и обмен сообщениями.
Основной объект моделирования	Функция (действие) и связывающие ее потоки (вход, выход, управление, механизм).	Событие (состояние системы) и функция (действие), изменяющая это состояние.	Поток управления, поток данных и взаимодействие между участниками (дорожки/пулы).
Отражение временной последовательности	Отсутствует. Акцент сделан на логической взаимосвязи и иерархии, а не на хронологии выполнения.	Присутствует. Четкая временная последовательность выполнения операций («сверху вниз»).	Присутствует и детализирована. Возможность моделирования временных таймеров, ожиданий и прерываний.
Логические операторы (ветвление процесса)	Ограничены. Реализуются неявно через разветвление стрелок, что затрудняет чтение сложной логики.	Развиты. Используются операторы «И», «ИЛИ», «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» для управления потоком.	Высоко развиты. Включают шлюзы различных типов (в том числе комплексные, основанные на событиях и данных).
Возможность машинного исполнения (автоматизация)	Низкая. Нотация предназначена для описания регламентов верхнего уровня, а не для настройки программного обеспечения.	Средняя. Требует преобразования (трансляции) моделей в другие форматы для исполнения в информационных системах.	Высокая. Модели могут быть напрямую преобразованы в исполняемый программный код (XML-схемы) для систем управления процессами.
Применимость в сфере образовательных технологий	Описание стратегической архитектуры компании (верхний уровень). Не подходит для операционных процессов обучения.	Описание регламентов работы департаментов продаж и сопровождения клиентов без цели мгновенной автоматизации.	Проектирование автоматизированных воронок продаж, сценариев прохождения онлайн-курсов, интеграции с обучающими платформами.

Во-вторых, обработка событийной природы обучения. Образовательный процесс является нелинейным и зависит от множества событий: «Студент сдал тест», «Истек срок подписки», «Вебинар начался». BPMN располагает широким инструментарием для работы с такими триггерами (события-таймеры, сообщения, ошибки), в то время как IDEF0 полностью игнорирует временной аспект, а ЕРС имеет более громоздкую структуру для описания сложных прерываний.

В-третьих, интероперабельность и интеграция. Современный образовательный продукт — это экосистема, включающая систему управления обучением, систему управления взаимоотношениями с заинтересованными сторонами и платежные инструменты. BPMN позволяет детально описать обмен данными между этими системами (потоки сообщений), что критически важно для проектирования бесшовного пользовательского опыта [6].

Таким образом, в то время как IDEF0 целесообразно использовать исключительно на этапе стратегического планирования архитектуры организации, а ЕРС — для

² Составлено автором на основе анализа технических спецификаций Object Management Group (OMG), стандартов National Institute of Standards and Technology (NIST), методологических материалов Software AG (ARIS) и рекомендаций Association of Business Process Management Professionals (ABPMP)

описания процедур, не требующих автоматизации, нотация BPMN является наиболее релевантным инструментом для EdTech-отрасли. Она обеспечивает баланс между наглядностью для бизнеса и точностью, необходимой для технической реализации цифровых образовательных продуктов.

На рис. 1 представлена разработанная автором процессная модель адаптивной образовательной среды, спроектированная в нотации BPMN 2.0. Данная схема демонстрирует изоморфизм графических элементов нотации и компонентов теории автоматического управления. Представленная BPMN-диаграмма иллюстрирует архитектуру интеллектуальной обучающей системы, функционирующей по принципу двойного контура регулирования. В отличие от нотации IDEF0, которая описывает процессы как статическую иерархию функций, BPMN позволяет визуализировать динамику принятия решений в условиях неопределенности.

Итак, BPMN-модель на рис. 1 представлена в виде единого пула процесса, разделенного на две функциональные дорожки, что позволяет разграничить зоны ответственности между участниками системы.

1. Дорожка «EdTech-система»: представляет оперативный контур управления, реализующий логику

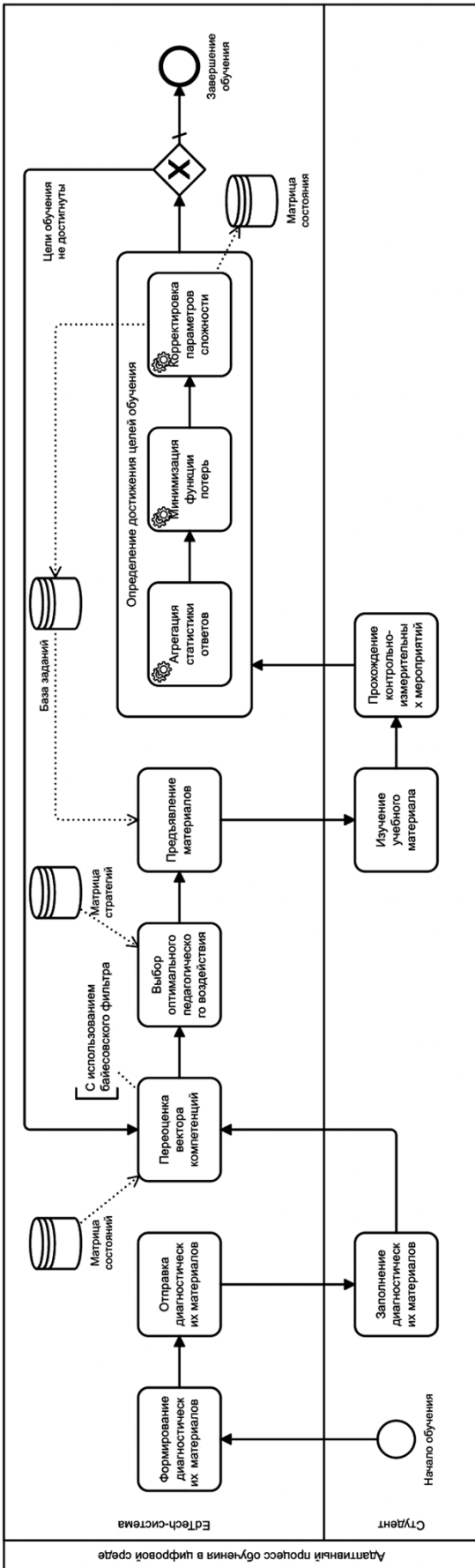


Рис. 1. VRMN-модель адаптивной образовательной среды как системы стохастического управления

адаптации контента и переоценку компетенций в реальном времени.

2. Дорожка «Студент»: отражает последовательность действий обучающегося и его взаимодействие с элементами цифровой среды.
3. Стратегический контур (внешний цикл): реализован через подпроцесс «Определение достижения целей обучения», где данные оперативного взаимодействия используются для калибровки параметров сложности контента.

Для строгого научного обоснования разработанной модели предлагаем ее описать как частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений. Образовательная траектория рассматривается как задача оптимального управления стохастическим объектом с латентными (скрытыми) параметрами.

А. Пространство состояний и модель наблюдения.

Задача «Переоценка вектора компетенций» реализует функцию оценки скрытого состояния знаний обучающегося $\theta_t \in \mathbb{R}^n$ (где n — размерность вектора навыков). Поскольку θ_t недоступно прямому измерению, система оперирует вектором уверенности b_t , который является распределением вероятностей над пространством состояний S :

$$b_t(\theta) = P(\theta_t = \theta \mid z_{1:t}, u_{1:t})$$

где $z_{1:t}$ — история ответов студента, $u_{1:t}$ — история предъявленных учебных материалов.

Б. Уравнение динамики и байесовский фильтр.

Переход между задачами BPMN описывается рекуррентным обновлением вектора уверенности по формуле Байеса:

$$b_{t+1}(\theta') = \eta \cdot P(z_{t+1} \mid \theta', u_t) \int_S P(\theta' \mid \theta, u_t) b_t(\theta) d\theta$$

Здесь $P(\theta' \mid \theta, u_t)$ — матрица перехода, отражающая вероятность прироста знаний после изучения материала u_t .

В. Синтез оптимальной стратегии управления. Задача «Выбор оптимального педагогического воздействия» сводится к решению уравнения Беллмана. Целью системы является поиск стратегии π^* максимизирующей ожидаемую полезность на бесконечном горизонте планирования:

$$V^*(b) = \max_{u \in U} \left[R(b, u) + \gamma \int_Z P(z \mid b, u) V^*(\tau(b, u, z)) dz \right]$$

где: $R(b, u)$ — функция награды; $\gamma \in [0, 1]$ — коэффициент дисконтирования; $\tau(b, u, z)$ — функция обновления состояния (переход к следующему шагу BPMN-схемы).

Г. Калибровка параметров системы (внешний цикл).

Пул «Подсистема калибровки контента» реализует задачу максимизации правдоподобия для уточнения параметров сложности контента β . Целевая функция $L(\beta)$ минимизируется методом градиентного спуска:

$$\beta^{(k+1)} = \beta^{(k)} + \alpha \sum_{j=1}^M (z_j - P(z_j \mid \theta_j, \beta^{(k)}))$$

Подводя итоги, отметим, что проведенное исследование обосновывает преимущество нотации BPMN как эффективного инструмента моделирования бизнес-процессов в EdTech компаниях, обеспечивающего необходимую для автоматизации точность описания реализуемых этапов обучения и межсистемного взаимодействия. Научная новизна работы заключается в разработке формализованной модели адаптивной образовательной среды, устанавливающей изоморфизм между графическими элементами нотации и математическим аппаратом частично наблюдаемых марковских процессов принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович О.В. Цифровизация образования и EdTech как фактор экономического развития в условиях евразийской интеграции // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31. № 1. С. 13–21.
2. Кашкутина Е.Н. Методологии моделирования бизнес-процессов. особенности применения нотаций ARIS // Электронные информационные системы. 2022. № 4 (35). С. 22–28.
3. Патрусова А.М. Функциональное моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN // Труды Братского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2022. Т. 1. С. 103–107.
4. Лапина М.А. Исследование функционального моделирования бизнес-процессов на основе нотаций IDEFO и EEPС // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2023. № 3 (89). С. 65–75.
5. Adrian van Raay, Vanessa Cooper, In Pursuit of Agility: How to Transform Your Organisation’s IT Project Selection Process // Information Systems Journal. 2025. Volume 35, Issue 6. P. 23–29.
6. Yousra Bendaly Hlaoui An Approach to Develop Correct-by-Construction Business Process Models Using a Formal Domain Specific Language // Journal of Software: Evolution and Process. 2025. Vol. 37.

АДАПТИВНЫЙ ГИБРИДНЫЙ МЕТОД МИГРАЦИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ СТРАТЕГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

ADAPTIVE HYBRID METHOD FOR MIGRATING LARGE DATA WITH AUTOMATIC SELECTION OF INFORMATION EXTRACTION AND PROCESSING STRATEGIES

S. Sosenushkin
A. Badanov

Summary. The article discusses the features of big data migration in the context of using heterogeneous storage systems and non-standard information sources. It provides an overview of existing data migration methods and identifies their limitations when working with large amounts of data and various access methods. The article proposes an adaptive hybrid method for big data migration with automated selection of information extraction and processing strategies, based on a combination of screen robots, classical ETL approaches, distributed data processing, and the use of an intermediate storage. It has been shown that the proposed method is a promising approach to organizing large-scale data migration processes and is of interest for further research in the field of building scalable and sustainable migration solutions.

Keywords: big data, data migration, ETL, screen robots, RPA, staging, data transformation.

Сосенушкин Сергей Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
ss@stankin.ru

Баданов Артем Андреевич

ведущий разработчик ООО «Амбердата»;
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
artem_badanov@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности миграции больших данных в условиях использования разнородных хранилищ и нестандартных источников информации. Проведен обзор существующих методов миграции данных и выявлены их ограничения при работе с большими объемами данных и различными способами доступа к источникам. Предложен адаптивный гибридный метод миграции больших данных с автоматизированным выбором стратегии извлечения и обработки информации, основанный на сочетании экранных роботов, классических ETL-подходов, распределенной обработки данных и использования промежуточного хранилища. Показано, что предложенный метод является перспективным подходом к организации процессов миграции больших данных и представляет интерес для дальнейших исследований в области построения масштабируемых и устойчивых миграционных решений.

Ключевые слова: большие данные, миграция данных, ETL, экранные роботы, RPA, промежуточное хранилище, трансформация данных.

Миграция больших данных представляет собой процесс переноса значительных объемов информации между разнородными информационными системами и хранилищами с сохранением корректности, целостности и смысловой интерпретации данных. В условиях современного развития информационных технологий миграция данных становится неотъемлемой частью модернизации инфраструктуры, перехода на новые вычислительные платформы, консолидации источников данных и внедрения аналитических систем нового поколения.

В отличие от классической миграции данных, миграция больших данных характеризуется одновременной обработкой от нескольких десятков до сотен разнородных источников данных, объемами передаваемой информации, достигающими десятков терабайт, а также использованием различных моделей хранения данных, включая реляционные, колоночные и документно-ори-

ентированные хранилища. Процессы миграции при этом должны обеспечивать заданные значения пропускной способности (не менее 10^6 – 10^7 записей в секунду), допустимого времени простоя целевых систем (не более нескольких минут) и уровня отказоустойчивости при сбоях отдельных компонентов. Совокупность указанных факторов обуславливает необходимость применения специализированных методов извлечения, преобразования и загрузки данных и приводит к усложнению архитектуры миграционных решений.

Одними из первых систематизированных подходов к миграции данных стали методы, основанные на концепции ETL (Extract, Transform, Load), активно развиваемые в рамках построения хранилищ данных. Данный подход получил широкое распространение в работах, посвященных архитектуре корпоративных хранилищ данных, в частности в исследованиях Р. Кимбалла, где процессы ETL рассматриваются как ключевой механизм

обеспечения качества, согласованности и интеграции данных [16]. Альтернативный архитектурный подход был предложен Б. Инмоном, который рассматривал миграцию данных в контексте централизованных корпоративных хранилищ и подчёркивал важность формализации структур, метаданных и корпоративных моделей данных [17].

С развитием распределённых вычислений и появлением масштабируемых аналитических платформ получил распространение подход ETL (Extract, Load, Transform), в рамках которого основные операции преобразования данных переносятся на сторону целевого хранилища. Данный метод оказался особенно востребованным в условиях использования колоночных и облачных аналитических систем, обладающих значительными вычислительными ресурсами и возможностями параллельной обработки данных.

В то же время рост объёмов данных, увеличение количества разнородных источников и повышение требований к актуальности информации привели к формированию подходов, выходящих за рамки классических схем ETL и ELT. Одним из таких направлений является **поточковая миграция данных**, при которой перенос и обработка информации выполняются в режиме непрерывного поступления данных из источников. В отличие от ETL, ориентированного преимущественно на пакетную обработку, потоковая миграция позволяет существенно снизить задержки доставки данных в целевую систему, однако усложняет обеспечение согласованности и требует дополнительных механизмов управления состоянием и обработки ошибок.

Другим развитием традиционных методов является **миграция на основе захвата изменений (Change Data Capture, CDC)**, предполагающая передачу в целевую систему только изменений, зафиксированных в журналах транзакций исходных систем. По сравнению с классическим ETL данный подход позволяет сократить объём передаваемых данных и снизить нагрузку на источники, а также обеспечить близкую к реальному времени синхронизацию. Вместе с тем CDC, как правило, применяется в сочетании с ETL— или ELT-процессами и не заменяет их полностью, поскольку не решает задачи первичной загрузки и комплексного преобразования исторических данных.

Отдельную группу методов образуют **подходы логической виртуализации данных**, при которых физическое перемещение данных между системами отсутствует либо сводится к минимуму. В рамках данного подхода создаётся логический слой, обеспечивающий унифицированный доступ к распределённым источникам данных без их предварительной миграции. По сравнению с ETL, логическая виртуализация позволяет сократить время

интеграции новых источников и снизить затраты на хранение дублирующихся данных. Однако данный метод накладывает дополнительные требования к производительности источников и сетевой инфраструктуры, а также ограничивает возможности глубокой оптимизации и долгосрочного хранения данных в целевой системе. В результате логическая виртуализация чаще применяется как временное или вспомогательное решение либо как часть гибридных архитектур миграции.

На практике всё большее распространение получают **гибридные подходы**, сочетающие элементы ETL, ELT, потоковой обработки, CDC и логической виртуализации. В таких архитектурах первичная миграция и историческая загрузка данных могут выполняться по классической ETL-модели, в то время как актуализация данных обеспечивается средствами CDC или потоковой обработки, а доступ к отдельным источникам реализуется через виртуализированный логический слой. По сравнению с традиционным ETL данный подход позволяет повысить масштабируемость и гибкость миграционных процессов, однако существенно усложняет архитектуру и требует развитых средств оркестрации, мониторинга и управления метаданными.

Таким образом, ETL и ELT следует рассматривать как базовые архитектурные модели миграции данных, на основе которых сформировались более сложные и специализированные методы. В условиях миграции больших данных выбор конкретного подхода или их комбинации определяется объёмами информации, требованиями к задержкам обработки, характеристиками источников и целевых платформ, а также допустимым уровнем архитектурной сложности миграционного решения.

Дальнейшее развитие методов миграции больших данных связано с появлением распределённых фреймворков обработки данных, таких как платформы пакетной и потоковой обработки, ориентированные на работу с внутренними структурами данных и масштабируемое выполнение вычислений. Эти подходы позволили вынести ресурсоемкие операции обработки за пределы систем-источников и существенно повысить производительность миграционных процессов.

Несмотря на разнообразие существующих методов миграции данных, большинство из них ориентированы на использование формализованных источников данных и предполагают наличие стандартных интерфейсов доступа, таких как API или прямое подключение к хранилищам. В то же время в реальных условиях миграции больших данных источниками информации нередко выступают нестандартные системы, включая корпоративные порталы и веб-интерфейсы, не предназначенные для автоматизированного извлечения данных. Кроме того, существующие методы, как правило, не предусма-

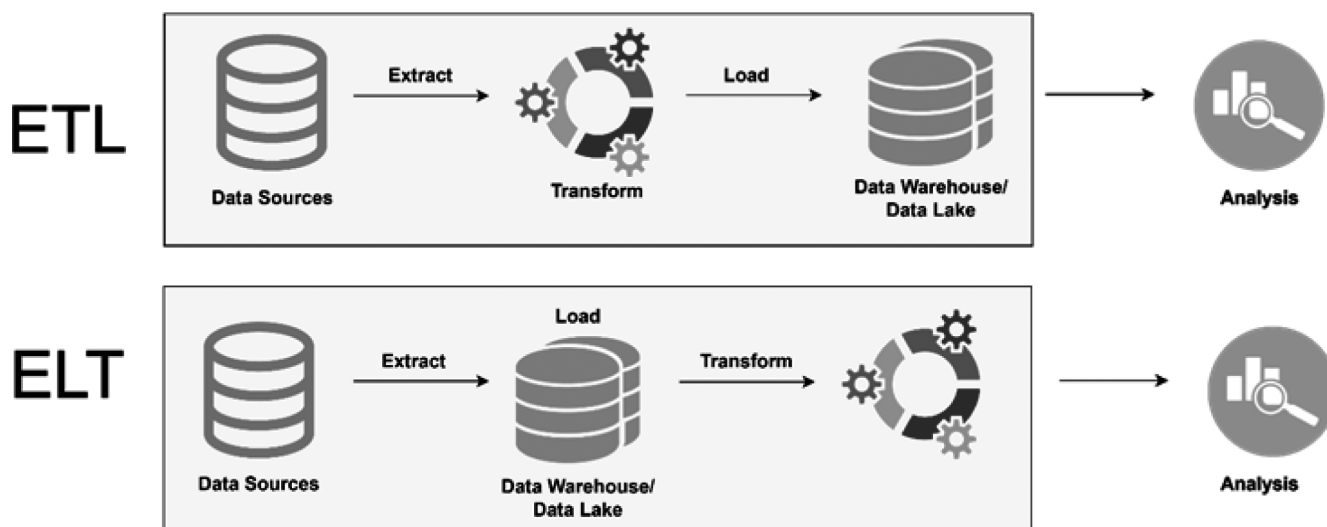


Рис. 1. Визуальный процесс переноса данных в ETL/ELT

тривают адаптивного выбора стратегии миграции в зависимости от характеристик источника и доступных способов извлечения информации.

В связи с этим актуальной является задача разработки адаптивного гибридного метода миграции больших данных, способного автоматически определять оптимальную стратегию извлечения и обработки информации, включая использование как классических ETL/ELT-подходов, так и методов экранного извлечения данных. Решению данной задачи и посвящено дальнейшее изложение.

Прежде чем приступить к рассмотрению предложенного адаптивного гибридного метода миграции больших данных, целесообразно проанализировать особенности применения экранных роботов в контексте извлечения и последующей миграции информации. Данный анализ необходим для корректного понимания ограничений существующих подходов и обоснования необходимости автоматического выбора стратегии извлечения данных.

Экранные роботы представляют собой программные средства, имитирующие действия пользователя при взаимодействии с пользовательским интерфейсом информационной системы. В отличие от классических методов миграции, основанных на использовании формализованных интерфейсов доступа к данным, экранные роботы работают на уровне визуального представления информации и не требуют прямого доступа к внутренним структурам хранилища данных.

В контексте миграции больших данных экранные роботы применяются в тех случаях, когда источник информации не предоставляет API, прямого подключения к базе данных или иных стандартных механизмов извлечения данных. Типичным примером таких источников

являются корпоративные порталы, внутренние информационные системы и веб-приложения, доступ к которым ограничен политиками безопасности и реализован исключительно через веб-интерфейс. В подобных условиях использование экранных роботов является единственным возможным способом автоматизированного извлечения информации.

Процесс извлечения данных с использованием экранных роботов, как правило, включает анализ структуры пользовательского интерфейса, идентификацию элементов, содержащих целевую информацию, и последующий сбор данных с использованием методов парсинга. Полученные данные сохраняются во временном или промежуточном хранилище, после чего могут быть включены в основной процесс миграции, включающий этапы обработки, преобразования и загрузки данных [2, 5, 11].

Несмотря на практическую применимость, использование экранных роботов в задачах миграции больших данных сопровождается рядом ограничений. Во-первых, данный подход обладает низкой устойчивостью к изменениям интерфейса источника данных, так как даже незначительные изменения структуры страниц могут привести к нарушению работы робота. Во-вторых, экранное извлечение, как правило, характеризуется меньшей производительностью по сравнению с использованием формализованных интерфейсов доступа, что ограничивает масштабируемость данного метода при работе с большими объемами данных [6, 7, 14].

Кроме того, экранные роботы не обладают встроенными механизмами семантического анализа данных и, как правило, извлекают информацию в виде слабо структурированных наборов значений. Это приводит к необходимости выполнения дополнительных этапов обработки и преобразования данных перед их включе-

нием в процесс миграции. В условиях больших объемов данных данные этапы могут становиться ресурсозатратными и повышать вероятность возникновения ошибок.

Следует также отметить, что экранные роботы в большинстве случаев используются изолированно от классических методов миграции данных и не интегрированы в единый адаптивный механизм выбора стратегии извлечения информации. Отсутствие автоматизированных гибридных решений, способных динамически определять возможность использования API или необходимость экранного извлечения, существенно ограничивает эффективность существующих подходов к миграции больших данных. [1, 8, 9]

Архитектура экранных роботов, применяемых для извлечения данных из нестандартных источников, как правило, имеет многоуровневую структуру, ориентированную на последовательное взаимодействие с пользовательским интерфейсом системы-источника. В общем случае архитектуру экранного робота можно представить в виде набора функциональных компонентов, каждый из которых выполняет строго определенную роль в процессе извлечения информации.

Ключевым элементом архитектуры является модуль управления пользовательским интерфейсом, отвечающий за навигацию по страницам, взаимодействие с элементами интерфейса и эмуляцию действий пользователя. Данный модуль функционирует в строгой последовательности шагов, так как большинство пользовательских интерфейсов не допускают параллельного выполнения действий. Это обстоятельство накладывает фундаментальное ограничение на степень параллелизма экранного извлечения данных.

Следующим компонентом является модуль анализа структуры интерфейса, предназначенный для идентификации элементов, содержащих целевую информацию. Данный модуль опирается на анализ DOM-структуры, визуальных атрибутов или шаблонов страниц. Его работа тесно связана с текущей реализацией интерфейса источника данных, что делает архитектуру экранных роботов чувствительной к изменениям внешнего вида и логики страниц.

Извлеченные данные передаются в модуль парсинга и первичной структуризации, где информация преобразуется из визуального представления в структурированный или полужормализованный вид. На данном этапе, как правило, отсутствует глубокий семантический анализ, вследствие чего данные требуют дополнительной обработки перед включением в процесс миграции [2, 4].

С точки зрения производительности архитектура экранных роботов обладает выраженной последова-

тельной составляющей, что напрямую связано с ограничениями пользовательского интерфейса. Даже при наличии технической возможности запуска нескольких экземпляров робота, значительная часть операций — таких как загрузка страниц, ожидание отклика интерфейса и переходы между состояниями — выполняется последовательно. Данное обстоятельство позволяет напрямую применить закон Амдала, согласно которому ускорение вычислительного процесса ограничено долей его последовательной части [6, 14].

В контексте экранных роботов это означает, что увеличение числа параллельных исполнителей приводит к ограниченному росту производительности, так как критические участки процесса извлечения данных не поддаются эффективному распараллеливанию. Более того, попытки масштабирования экранного извлечения часто приводят к дополнительным накладным расходам, связанным с конкуренцией за ресурсы интерфейса и ограничениями со стороны системы-источника.

Таким образом, архитектура экранных роботов изначально не предназначена для высокопроизводительной обработки больших объемов данных. Ее сильной стороной является возможность извлечения информации из источников, недоступных для классических методов миграции, однако архитектурные особенности приводят к низкой масштабируемости и ограниченной эффективности при росте объемов данных.

Но, все же вернемся к рассмотрению ограничений, возникших ранее. Следует отметить, что часть ограничений экранного извлечения данных может быть существенно смягчена за счет архитектурных и организационных решений.

Так, для приближения к решению проблемы низкой устойчивости экранных роботов к изменениям пользовательского интерфейса целесообразно предварительно выполнять динамический анализ структуры страницы до начала непосредственного извлечения данных. Такой анализ может осуществляться на основе парсинга HTML-разметки, а также связанных с ней JavaScript- и CSS-компонентов, формирующих итоговую структуру пользовательского интерфейса.

Полученное представление структуры страницы целесообразно сопоставлять с эталонным описанием интерфейса, зафиксированным на этапе разработки или предыдущих успешных запусков миграции. Сравнение текущей структуры с эталонной позволяет выявлять изменения в расположении элементов, их атрибутах и взаимосвязях, которые могут повлиять на корректность работы экранного робота. В случае обнаружения существенных расхождений процесс извлечения данных может быть приостановлен либо переведен в безопасный

режим, что предотвращает выполнение некорректных операций в продуктивной среде.

В качестве одного из возможных вариантов реализации данного подхода может рассматриваться использование компактной модели машинного обучения или интеллектуального модуля анализа, способного автоматически сопоставлять текущую структуру страницы с эталонной и выявлять допустимые и критические изменения. Такой модуль может использоваться для частичной автоматизации корректировки сценариев экранного извлечения или формирования рекомендаций по их адаптации.

Применение динамического анализа структуры страницы в сочетании с эталонным сравнением и интеллектуальными механизмами проверки позволяет существенно повысить устойчивость экранных роботов к изменениям пользовательского интерфейса и снизить вероятность ошибок при извлечении данных в процессе миграции больших данных [1, 8, 9].

Оптимизация производительности экранного извлечения данных может быть достигнута за счет отказа от использования полнофункционального браузера в тех случаях, когда это не является необходимым. Применение облегченных механизмов взаимодействия с веб-страницами, а также минимизация визуальных операций позволяют сократить накладные расходы и частично компенсировать ограничения, связанные с последовательным характером работы экранных роботов.

Ограниченность экранных роботов в части семантического анализа данных не является критической проблемой, а представляет собой архитектурное ограничение, с которым целесообразно работать на последующих этапах миграции. Семантический анализ, очистка и структурирование данных могут быть эффективно выполнены на основном этапе миграции, в рамках операций обработки и преобразования информации. В частности, на этапе ETL данные, извлеченные экранными роботами в сыром виде, могут быть агрегированы, отфильтрованы и приведены к требуемой структуре с использованием более мощных и формализованных инструментов обработки данных.

Таким образом, экранное извлечение данных следует рассматривать как вспомогательный механизм, предназначенный для получения информации из нестандартных источников, тогда как основная логика обработки, агрегации и семантического анализа данных переносится на этапы классической миграции. Такое разделение ответственности позволяет минимизировать влияние ограничений экранных роботов и обеспечить более устойчивую и управляемую миграцию больших данных в рамках гибридного подхода.

Исходя из полученного архитектурного понимания работы экранных роботов, представляется целесообразным интегрировать данный механизм в общий метод «Адаптивный гибридный метод миграции больших данных с автоматическим выбором стратегии извлечения и обработки информации». Ключевой задачей на данном этапе является формализация входных параметров миграции и создание универсального механизма принятия решений о способе извлечения данных.

При выполнении любой миграции больших данных, как правило, формируются конфигурационные файлы (conf), содержащие сведения о доступах к источникам данных, сетевых параметрах, перечне объектов для переноса, а также описания метаданных, подлежащих миграции. Такие конфигурационные файлы могут быть представлены в различных форматах, однако их ключевой особенностью является наличие структурированной информации, достаточной для автоматизированного анализа источника данных [6, 7].

Пример conf файла ниже —

```
{
  «migration_id»: «migration_2026_01»,
  «source»: {
    «engine»: «postgresql»,
    «host»: «source-db.company.local:5432»,
    «db»: «source_db»,
    «user»: «migration_user»,
    «password»: «***»,
    «tables»: [«orders», «customers», «payments»]
  },
  «target»: {
    «engine»: «clickhouse»,
    «host»: «target-ch.company.local:8123»,
    «db»: «analytics»,
    «user»: «ch_user»,
    «password»: «***»
  },
  «intermediate»: {
    «type»: «s3»,
    «endpoint»: «https://s3.internal.company.local»,
    «bucket»: «migration-temp-data»,
    «formats»: [«parquet»]
  },
  «transform»: {
    «enabled»: true,
    «rules»: «git://repo.company.local/migration/transform_
rules»
  },
  «execution»: {
    «strategy»: «adaptive»,
    «screen_allowed»: true,
    «parallelism»: 8
  }
}
```

В представленном примере конфигурационного файла в явном виде описаны параметры источника и приемника данных, способы подключения, перечень объектов для переноса, а также параметры промежуточного хранилища. Наличие раздела, описывающего временное объектное хранилище, позволяет использовать его в качестве универсального промежуточного слоя для хранения результатов преобразования данных и фиксации промежуточных состояний миграции. Для снижения вероятности ошибочного изменения метаданных и упрощения ввода параметров конфигурации целесообразно использовать пользовательский интерфейс, формирующий конфигурационные файлы в автоматическом режиме.

Выбор файлового хранилища в качестве промежуточного обусловлен его универсальностью и независимостью от конкретных моделей хранения данных. Использование объектного или файлового хранилища позволяет сохранять результаты этапа Transform в нейтральном формате и обеспечивает устойчивость процесса миграции к сбоям на последующих этапах. Промежуточный характер данного хранилища заключается в том, что после выполнения операций преобразования данные требуют временного размещения до их успешной загрузки в итоговую систему [13].

В случае прямой загрузки преобразованных данных в целевое хранилище при возникновении ошибки на этапе Load существует риск появления несогласованных данных, что приводит к необходимости повторного выполнения как этапа Transform, так и этапа Load. Использование промежуточного файлового хранилища позволяет избежать данной ситуации, так как при сбоях на этапе загрузки требуется повторное выполнение только операции Load, тогда как результаты преобразования данных сохраняются и не требуют повторной обработки. При этом вероятность возникновения ошибок на этапе Load существенно ниже, поскольку загрузка данных без выполнения преобразований является мало-нагруженной и технологически простой операцией.

Структурированность данной информации делает возможным ее использование в рамках предлагаемого метода за счет создания управляющей подсистемы, реализующей логику адаптивного выбора стратегии миграции. Данная подсистема осуществляет чтение и интерпретацию конфигурационных файлов, извлекая из них сведения о типе источника данных, доступных способах подключения, наличии формализованных интерфейсов доступа и характеристиках передаваемой информации.

Благодаря строго структурированному описанию параметров миграции в конфигурационных файлах обеспечивается возможность формализованного принятия решений без участия оператора. Это позволяет

унифицировать процесс миграции, снизить вероятность ошибок, связанных с ручной настройкой, и обеспечить масштабируемость метода при работе с большим количеством разнородных источников данных.

Однако даже при отсутствии оператора на этапах определения источника данных и выбора стратегии извлечения, участие разработчика остается необходимым на этапе Transform. Это обусловлено тем, что логика преобразования данных, включая правила фильтрации, агрегации и семантической интерпретации информации, напрямую зависит от требований предметной области и особенностей целевого использования данных.

В отличие от этапов извлечения и загрузки данных, которые могут быть формализованы и автоматизированы на основе конфигурационных параметров, этап преобразования данных требует учета бизнес-логики, контекста использования информации и неявных зависимостей, которые, как правило, не отражены в технических описаниях источников данных. Определение корректных правил трансформации данных невозможно без участия разработчика или эксперта предметной области, обладающего знанием о смысловой нагрузке обрабатываемой информации.

При этом следует отметить, что необходимость участия разработчика на этапе Transform возникает не во всех сценариях миграции данных. В случае, если задача сводится к прямому переносу данных из источника А в источник В без изменения структуры, логики обработки и семантического содержания информации, процесс миграции может быть выполнен полностью в автоматическом режиме [2, 15].

В подобных сценариях отсутствует необходимость в разработке сложных правил преобразования данных, а этап Transform либо минимален, либо сводится к базовому приведению форматов и типов данных, которое может быть формализовано в конфигурационных файлах. Благодаря этому адаптивный гибридный метод позволяет выполнять простые миграции данных без привлечения разработчика, используя автоматический выбор стратегии извлечения и стандартные механизмы загрузки данных в систему-приемник.

Для того, чтобы описанный выше пайплайн был более понятен, ниже доступна его визуализация (см. рис. 2).

Важно отметить, что в рамках предлагаемого метода на этапе Transform может применяться использование внешних инструментов параллельной обработки данных, таких как распределенные вычислительные фреймворки. Привлечение подобных инструментов обусловлено необходимостью распараллеливания операций обработки информации и сокращения времени выпол-

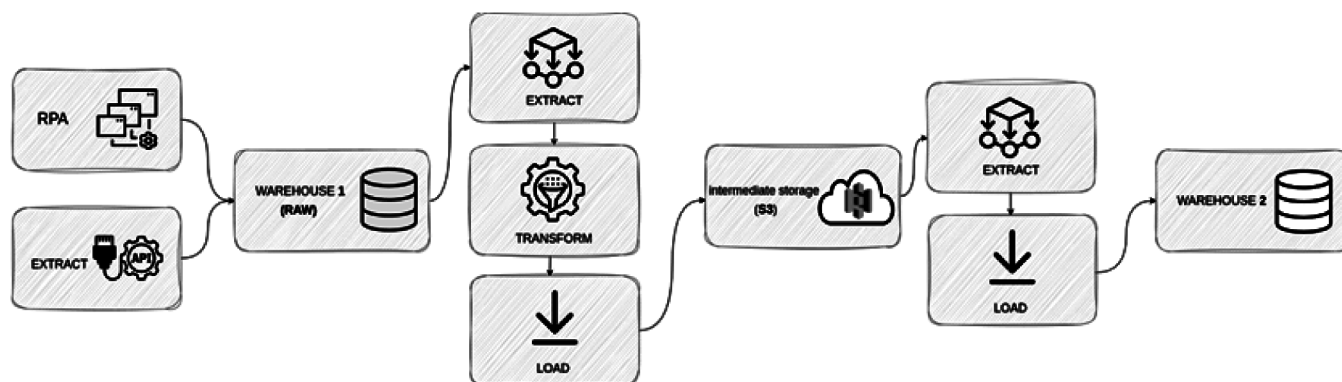


Рис. 2. Визуализация пайплайна миграции больших данных

нения вычислений при работе с большими объемами данных.

Использование параллельной обработки на этапе Transform позволяет вынести ресурсоемкие операции агрегации, фильтрации и преобразования данных за пределы исходного хранилища, снижая нагрузку на его вычислительные ресурсы. Однако применение таких инструментов не является безусловным: в случае отсутствия в используемом фреймворке необходимых методов обработки данных либо при наличии различий в семантике их работы по сравнению с методами исходного хранилища, обработка данных выполняется непосредственно на ресурсах системы-источника.

Решение о применении параллельной обработки принимается автоматически на основе интегрированной библиотеки методов, входящей в состав предлагаемого метода. Данная библиотека осуществляет сопоставление функциональных возможностей инструментов параллельной обработки с методами, используемыми в исходном хранилище, и проверяет эквивалентность их поведения. В случае, если функциональность методов совпадает и не приводит к искажению результатов обработки данных, для выполнения этапа Transform используется внешняя параллельная среда. В противном случае обработка выполняется в исходном хранилище данных.

Дополнительным преимуществом применения параллельных инструментов обработки является возможность динамического управления вычислительными ресурсами. Параметры вычислительной сессии могут адаптивно изменяться в зависимости от объема обрабатываемых данных: при увеличении объема данных ресурсы масштабируются, при снижении — сокращаются. Такой подход позволяет не только эффективно выполнять параллельную обработку данных в рамках одной миграции, но и запускать несколько миграционных процессов одновременно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Использование параллельных инструментов обработки данных в составе адаптивного гибридного метода обеспечивает баланс между производительностью, корректностью обработки информации и рациональным использованием вычислительных ресурсов при миграции больших данных.

В рамках данной статьи был предложен адаптивный гибридный метод миграции больших данных с автоматическим выбором стратегии извлечения и обработки информации, ориентированный на использование в условиях разнородных источников данных, архитектурных ограничений и больших объемов обрабатываемой информации.

Ключевой особенностью предлагаемого метода является интеграция нескольких подходов и инструментов в рамках единой архитектуры. Метод предусматривает использование экранных роботов (RPA) для извлечения данных из нестандартных источников, не предоставляющих формализованных интерфейсов доступа, что позволяет расширить область применимости миграции за пределы традиционных хранилищ данных. Для обеспечения устойчивости и управляемости процесса миграции используется промежуточное хранилище, выступающее в качестве универсального слоя хранения результатов извлечения и преобразования данных и обеспечивающее возможность восстановления процесса миграции в случае сбоев.

Дополнительно в методе используется распределенный фреймворк обработки данных, позволяющий выполнять параллельную обработку информации на этапе Transform и снижать нагрузку на исходные хранилища. Применение данного фреймворка осуществляется адаптивно на основе сопоставления доступных методов обработки и эквивалентности их поведения, что позволяет сохранить корректность обработки данных и повысить производительность вычислений.

Автоматизация ключевых этапов миграции достигается за счет использования структурированных конфи-

гурационных файлов, на основе которых управляющая подсистема метода осуществляет анализ характеристик источников данных и выбирает оптимальную стратегию извлечения и обработки информации. Такой подход снижает зависимость процесса миграции от ручной настройки, минимизирует вероятность ошибок и повышает масштабируемость метода при работе с большим количеством источников данных.

Таким образом, предлагаемый адаптивный гибридный метод может рассматриваться как **перспективный подход** к решению задач миграции больших данных,

поскольку он ориентирован на автоматизированный выбор стратегии извлечения данных, рациональное использование вычислительных ресурсов и интеграцию специализированных инструментов обработки информации.

Полученные результаты носят **предварительный характер** и указывают на целесообразность дальнейших исследований, направленных на количественную оценку эффективности предлагаемого метода в различных сценариях миграции данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Garcia-Molina H., Ullman J.D., Widom J. Database Systems: The Complete Book. 2nd ed. // Pearson, 2008. 1248 p. URL: <https://djvu.online/file/WUTyQnUI8qhKb?ysclid=mkasqdj11p512840887> (дата обращения: 14.01.2025)
- Connolly T.M., Begg C.E. Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. 6th ed. // Pearson, 2014. 1440 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/228831514_Database_systems_A_practical_approach_to_design_implementation_and_management (дата обращения: 14.01.2025)
- Мартиншин С.А., Симонов В.Л., Храпченко М.В. Проектирование и реализация баз данных в СУБД MySQL с использованием MySQL Workbench: Методы и средства проектирования информационных систем и технологий. Инструментальные средства информационных систем. Учебное пособие // ИНФРА-М, 2022. 159 с. URL: https://www.litres.ru/book/vladimir-ivovich-sim/proektirovanie-i-realizaciya-baz-dannyh-v-sudb-mysql-71724910/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=mixed_web_dsa_drr_feed+607619718+%7Cspecial%7C47441382&utm_content=13971846835&utm_term---autotargetingutm_term---autotargeting&etext=&yclid=11982121547679662079&lfrom_processed=607619718 (дата обращения: 14.01.2025)
- Silberschatz A., Korth H.F., Sudarshan S. Database System Concepts. 7th ed. // McGraw-Hill, 2019. 1344 p. URL: <https://www.db-book.com/> (дата обращения: 14.01.2025)
- Лавренчук Е.А. Технологии анализа больших данных: учебное пособие // СПб.: Университет ИТМО, 2019. 96 с. URL: https://books.ifmo.ru/book/1179/tehnologii_analiza_bolshih_dannyh.htm (дата обращения: 14.01.2025)
- Zikopoulos P., deRoos D., Bienko C. et al. Big Data Beyond the Hype: A Guide to Conversations for Today's Data Center // McGraw-Hill, 2015. 256 p. URL https://archive.org/details/bigdatabeyondhyp0000ziko_m1u7 (дата обращения: 14.01.2025)
- Машнин Т. Технология хранения и обработки больших данных Hadoop // ЛитРес 2021 136 с. URL: https://www.litres.ru/book/timur-mashnin-301845/tehnologiya-hraneniya-i-obrabotki-bolshih-dannyh-hado-65077172/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=mixed_web_dsa_drr_feed+607619718+%7Cspecial%7C47441382&utm_content=13971846835&utm_term---autotargetingutm_term---autotargeting&etext=&yclid=9381017690509148159&lfrom_processed=607619718 (дата обращения: 14.01.2025)
- Coronel C., Morris S. Database Systems: Design, Implementation, & Management. 14th ed. // Cengage Learning, 2022. 848 p. URL: <https://www.cengage.com/c/database-systems-design-implementation-management-14e-coronel/9780357673034/> (дата обращения: 14.01.2025)
- Гарсиа-Молина Г., Ульман Д., Уидом Д. Системы баз данных. Полный курс = Database Systems: The Complete Book // М.: Вильямс, 2014. 1088 с. URL: <https://djvu.online/file/WUTyQnUI8qhKb?ysclid=mkat8env1l686620576> (дата обращения: 14.01.2025)
- Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining: Concepts and Techniques. 3rd ed. // Morgan Kaufmann, 2011. 744 p. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/data-mining-concepts/9780123814791/> (дата обращения: 14.01.2025)
- НОУ ИНТУИТ. Основы баз данных : онлайн-курс // intuit.ru . URL: <https://intuit.ru/studies/courses/599/455/lecture/10159> (дата обращения: 14.01.2025)
- Stonebraker M., Hellerstein J. M. What Goes Around Comes Around // Readings in Database Systems. 4th ed. // MIT Press, 2005. P. 2–41. URL: <https://people.csail.mit.edu/tanford/6830papers/stonebraker-what-goes-around.pdf> (дата обращения: 14.01.2025)
- Орлов С.А. Администрирование и оптимизация баз данных. Учебник и практикум для вузов // М.: Юрайт, 2020. 323 с. URL: <https://urait.ru/bcode/449745> (дата обращения: 14.01.2025)
- White T. Hadoop: The Definitive Guide. 4th ed. // O'Reilly Media, 2015. 756 p. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/hadoop-the-definitive/9781491901687/> (дата обращения: 14.01.2025)
- Мейер Д. Теория реляционных баз данных = The Theory of Relational Databases // М.: Мир, 1987. 608 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01001116473> (дата обращения: 14.01.2025)
- Kimball R., Ross M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. 3rd ed. // Wiley, 2013. 600 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/The+Data+Warehouse+Toolkit%2C+3rd+Edition-p-9781118530801> (дата обращения: 23.01.2026)
- Inmon W.H. Building the Data Warehouse. 4th ed. // Wiley, 2005. 576 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Building+the+Data+Warehouse%2C+4th+Edition-p-9780764599446> (дата обращения: 23.01.2026)

© Сосенушкин Сергей Евгеньевич (ss@stankin.ru); Баданов Артем Андреевич (artem_badanov@inbox.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭКСПЕРИМЕНТ ДАННЕНБЕРГА-ЛЬЮИС: КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ И АЛГОРИТМИЧЕСКО-КОМБИНАТОРНАЯ СТРУКТУРА АУДИОДАНЫХ (НАУЧНЫЙ АНАЛИЗ, АУДИОПРОГРАММИРОВАНИЕ, ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ФАКТОРЫ ЕГО УТОЧНЕНИЯ)

Таран Василий Васильевич

кандидат культурологии, заведующий Лабораторией
компьютерного дизайна и прикладной информатики
«SPLASHLab»
allscience@lenta.ru

**DANNENBERG-LEWIS EXPERIMENT:
CELLULAR AUTOMATA
AND ALGORITHMIC-COMBINATORIAL
STRUCTURE OF AUDIO DATA (SCIENTIFIC
ANALYSIS, AUDIO PROGRAMMING,
EXPERIMENT REPRODUCTION,
AND FACTORS OF ITS REFINEMENT)**

V. Taran

Summary. This paper addresses the practical application of the cellular automata principle for the formation of elementary and complex algorithmic-combinatorial structures of audio data. The concept of utilizing the structural-algorithmic functionality of cellular automata is scientifically substantiated and technically justified, implying the direct generation of a multiband spectrum through functional programming. The dialect of LISP—Nyquist—is identified as the primary functional programming tool for experimental capabilities of cellular automata. A scientific and technical analysis of the functioning of cellular automata in the generation of various algorithmic-combinatorial structures of audio data according to Wolfram's rules 30 and 90 is conducted. Characteristics of the topologies of elementary cellular automata behaviors in the context of obtaining new audio materials are provided. The Dannenberg-Lewis experiment is reproduced, illustrating the application of the instrumental base of LISP-oriented programming languages in the context of generating new chaotic and fractal textures of audio materials. Technological factors influencing the reproduction of the experiment are refined considering the accelerated development of computing technology and the rapid growth of the scientific-practical base of audio engineering and computer science. Aspects of implementing the obtained applied results are updated, with a perspective on further advancing scientific knowledge within the scientific-experimental framework of modern audio informatics.

Keywords: Dannenberg-Lewis experiment, cellular automata, algorithmic-combinatorial structures of audio data, audio programming, computer audio synthesis, chaotic behavior, fractal topologies, LISP dialects, LISP-oriented languages, Nyquist programming language, Audacity®, Wolfram's rules, scientific analysis, computer science, audio engineering, audio informatics.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы практического применения принципа клеточных автоматов для формирования элементарных и сложных алгоритмическо-комбинаторных структур аудиоданных. Научно обоснована и технически аргументирована концепция использования структурно-алгоритмического функционала клеточных автоматов, подразумевающая прямую генерацию многочастотного спектра средствами функционального программирования. В качестве основного функционального средства программирования экспериментальных возможностей клеточных автоматов обозначен диалект LISP — Nyquist. Проведён научно-технический анализ функционирования клеточных автоматов при генерации различных алгоритмическо-комбинаторных структур аудиоданных в соответствии с правилами Вольфрама — 30 и 90. Даны характеристики топологий поведения клеток элементарных клеточных автоматов в условиях получения новых аудиоматериалов. Воспроизведён эксперимент Данненберга-Льюис, характеризующий применение инструментальной базы LISP-ориентированных языков программирования в контексте получения новой хаотичной и фрактальной поведенческой фактуры аудиоматериалов. Уточнены технологические факторы воспроизведения эксперимента с учётом ускоренного развития вычислительной техники и стремительного роста научно-практической базы аудиоинженерии и компьютерных наук. Актуализированы аспекты внедрения полученных прикладных результатов с перспективой дальнейшего приращения научных знаний в научно-экспериментальный оборот современной аудиоинформатики.

Ключевые слова: эксперимент Данненберга-Льюис, клеточные автоматы, алгоритмическо-комбинаторные структуры аудиоданных, аудиопрограммирование, компьютерный аудиосинтез, хаотическое поведение, топологии фракталов, диалекты LISP, LISP-ориентированные языки, язык программирования Nyquist, Audacity®, правила Вольфрама, научный анализ, компьютерные науки, аудиоинженерия, аудиоинформатика.

Компьютерный аудиосинтез в системе редактирования цифрового звука (постановка проблемы, научный анализ и актуальность исследования)

Дизайн аудиокomпозиций — это довольно уникальная и сложная область инженерно-технической деятельности, затрагивающая все аспекты совершенствования образа аудиоматериала с целью его адекватного восприятия потенциальными слушателями.

Адекватность восприятия слушателем аудиокomпозиций определяется качеством записи звуковых дорожек¹, спектрографическим анализом многоком-

¹ Прим. автора. Качество записи аудиотреков напрямую влияет на адекватность понимания звуковой панорамы, поскольку *математические* и *спектрометрические* показатели определяют «чёткость»* представления каждого аудиофрагмента, формируемой инженером сведения аудиокomпозиции. *Понятие чёткости в аудиоинформатике имеет особый смысл и подразумевает, прежде всего, «адекватность» восприятия слушателем всех нюансов *психоакустических* свойств аудиоматериала, воспроизводимого цифровым аудиооборудованием. Понятие «адекватность» определяет первоначально закладываемые *технические параметры звучания* аудиоматериала в процессе его создания автором (композитором, саундпродюсером, звукорежиссёром, инженером мастеринга и сведения), говоря иначе, как автор подразумевает восприятие образа своего музыкального произведения, нацеленного на сторонних слушателей и своей потенциальной аудитории. Прежде всего, здесь стоит обратить внимание на массовое тиражирование аудиоматериалов. Потенциально верным считается тот вариант *мастер-трека*, который при условно равных спектроакустических характеристиках будет звучать на различных системах воспроизведения одинаково. То есть *спектроакустическая формула*** аудиоматериала после его инженерного редактирования в редакторах звукозаписи не потеряет своих *спектральных* свойств. Именно для этих целей в прикладной аудиоинформатике предусмотрены следующие понятия: «разрушающее» редактирование (*предполагающее снижение битности и частоты дискретизации проекта в процессе его обработки внутри программы редактирования звука, как правило при манипуляциях с плагинами, имеющими разную разрядность 64-32 бит*) и «неразрушающее» редактирование звуковых данных (*не затрагивающее оригинальные проектные нормы**** структуры аудиоматериала, *когда проектные спектрометрические характеристики по разрядности и < ч/д > совпадают с инструментарием для манипуляции над аудиоданными, например, виртуальный компрессор, поддерживающий обработку данных с глубиной 32 бит, обрабатывающий аудио-проект с теми же характеристиками*). Важно помнить, что термины «разрушающее» и «неразрушающее» редактирование аудиоматериалов также подразумевают, *в первом случае*:

— Обработку звука применительно к оригинальной звуковой форме — редактируемый аудиоматериал преобразуется как «оригинальный» *образ* без создания дополнительной *мастер-копии*. При этом методе редактирования акустические свойства звуковой волны, представленной в виде отсчётов, трансформируются и видоизменяются сразу же после манипуляции заданной оператором (компрессия, эквализация, работа с фазой, панорамирование, изменение громкости и т.д.) и происходит *перво-*

начальное изменение акустических свойств редактируемого аудиоматериала.

Во втором случае:

— Оригинальная звуковая форма и структура волны остаются *неизменными*. Процесс редактирования аудиоматериала строится на концепции предварительного сохранения команд (операций) в неявном виде описываемых программой как сценарии, которые впоследствии будут интерпретированы процессором воспроизведения волновой формы. Например:

в первом случае — применяемые параметры компрессии изменяют спектральную структуру аудиосодержимого. Изменения затрагивают динамический диапазон, квантование амплитуды, дискретизацию во времени;

во втором случае — аналогичная операция выполняется последовательностью команд (характеризуемых техническими операциями), которые представляют собой события в виде сценариев, интерпретируемые алгоритмами программы в структуру звуковой формы. В случае с *компрессией* — события подразумевают описание сценариев по нормировке сигнала, учёта квантования и сжатию динамического диапазона.

****Проектные нормы* являются неотъемлемой частью процедур (*запись, редактирование, сведение, финализация, мастеринг аудиоматериала*) цифровой обработки аудиосигналов. Именно *они* во многом определяют *качество* потенциальной аудиокomпозиции. Сегодня в среде аудиоинженеров условно приняты следующие *математические* и *спектрометрические* показатели проектных норм: $\langle 16 \rangle$, $\langle 24 \rangle$, $\langle 32 \rangle$ — *бит* = $\langle \text{ч/д} \rangle \rightarrow \langle 8000, 11025, 16000, 22050, 44100, 48000, 88200, 96000 \text{ Гц} \dots \rangle$. Оптимальными являются спектрометрические *характеристики* в соотношении: $\langle 16 \rangle = 44100$; $\langle 16 \rangle = 48000$ — $\langle 24 \rangle = 44100$; $\langle 24 \rangle = 48000$. Баланс указанных *характеристик* наиболее предпочтителен для цифровых проектов, создаваемых в различных секвенсорах и программах цифровой обработки звука. Однако, что касается сложных проектов, где требуется идти по пути ступенчатого (обратного) снижения частоты дискретизации (при *неразрушающем* либо *минимально разрушающем* редактировании), предпочтительны: $\langle 32 \rangle$ — *бит* и $\langle 176400, 192000, 352800, 384000 \text{ Гц} \dots \rangle$. В последнем случае высокие *физико-математические* показатели сэмплирования фонограммы позволяют расширить глубину *спектрального* пространства, что, в свою очередь, преобразует *аудиообраз* и делает более разборчивыми различные сегменты сведённой композиции.

** *Спектроакустическая формула аудиоматериала (формула преобразования аудиосигналов) в аудиоинформатике* — обобщённый термин, обозначающий совокупность *физико-математических* характеристик аудиоматериала, выражающихся в виде кластерной структуры, ячейки которой последовательно распределены. Каждая ячейка хранит запись (последовательность блоков, заголовки и т.п.) о фрагменте аудиоматериала. Математические описания, полученные в результате первичного аналого-цифрового преобразования, снабжаются *метками*, участки которых присутствуют в начальных заголовках «сырой» структуры файла (двоичные таблицы, RAW-массивы), такие описания нужны для последующего *внутреннего* прочтения программой редактирования аудиозаписей. На основе подобных описаний строится формула многократных изменений волновой структуры звука в процессе его редактирования, а также ведётся статистический учёт видоизменения спектральных показателей. *Метки* позволяют ориентироваться программе-аудиоредактору при многократных запросах оператора на *кодирование* и *перекодирование*

понентной моно и стерео базы, редактируемой аудиомультисессии², сведением³, грамотным подбором спецэффектов⁴, точной финализацией (премастерингом)⁵ предобработанной аудиоконпозиции.

в соответствующий формат (к примеру, Wave PCM, WMA, MP2, MP3, OGG и т.п., *по определению* автора, Таран В.В., 2026 г.).

² Прим. автора. Спектрографический анализ звука — это важное направление исследований аудиоинформатики, отвечающее за представление звука в виде синхронизированных слоёв, каждый из которых соответствует определённой частоте. Генерируемая аудиоредактором спектрограмма основывается на рядах Фурье, её калькуляция зависит от структуры алгоритма и программного кода используемого редактора, в стандартном виде она имеет следующие функции:

Спектральные характеристики аудиоматериала.

Волновые характеристики аудиоматериала.

³ Прим. автора. Сведение — важный этап на пути создания *оригинальной* аудиоконпозиции. Именно этот процедурный этап обработки аудиоматериала отвечает за качество синхронности воспроизведения формируемой оператором сонограммы.

⁴ Прим. автора. Спецэффекты — неотъемлемая часть формирования психоакустических, аудиальных образов, нацеленная на искусственное воспроизведение физических особенностей звучания различных *органических* и *неорганических*, а также специфических — электромеханических источников, для придания достоверности тому или иному событию и воссоздания у слушателя атмосферы собственного присутствия и эмоциональной аутентичности в контексте прослушиваемого аудиопроизведения.

⁵ Прим. автора. Финализация — предзавершающий аудиосессию процесс обработки аудиоматериала, направленный на усовершенствование звучания его спектральных характеристик для придания универсальности и точности спектро-частотного отображения на различных типах звукового оборудования. В практике аудиорежиссуры финализация является предзавершающим этапом обработки аудиоматериала, предшествующим процедурам мастеринга. Отличие *финализации* от *мастеринга* имеет *тонкую* грань, уходящую корнями в *историю* звукозаписи. Если не вдаваться в *исторические* подробности, то суть отличия этих *взаимосвязанных* процессов можно изложить *следующим образом*:

Финализация (*премастеринг, миксдаун*) — набор технологических процедур, направленный на универсализацию звучания аудиоматериала на различных типах аудиооборудования. Данная процедура базируется на эквализации, компрессии и выравнивании громкости звука. Параметры универсализации будут неконечными, то есть, эквализация и компрессия будут иметь неконечные параметры. Например, порог атаки компрессора будет ниже, чем при мастеринге. Это обуславливается тем, что каналы реализации *мастер-трека (мастер-копии)* могут быть разными. В радиовещании есть свои стандарты, на телевидении свои, у интернет-релизов свои. Поэтому необходимо, чтобы *мастер-трек* можно было гибко перенастроить, без изменения *характера* звучания выполнить *мастеринг (по определению автора, Таран В.В., 2026 г.)*.

Мастеринг — *конечная стадия обработки аудиоматериала*, имеющая *фиксированные* значения приборов его обработки. Вносить изменения в *мастер-трек* после её процедуры не рекомендуется, так как это может считаться *разрушающим* редактированием. Данная процедура характерна для создания полноценных *мастер-треков* различных релизов, а также для записи и тиражирования *мастер-копий* CD и DVD-аудио и проектов, связанных с нарезкой виниловых дисков (*по определению автора, Таран В.В., 2026 г.*).

Дизайн (особенно в сфере цифровой обработки звука) как практико-ориентированный технико-технологический процесс, безусловно, должен включать в себя все *основные* вышеперечисленные *этапы* обработки звука и учитывать *индивидуальные* акустические свойства каждого элемента, присутствующего в общей акустической панораме аудиоматериала.

На сегодняшний день большинство аудиоконпозиций создаются при помощи традиционных компьютерных технологий⁶ и даже в некоторых случаях задействуют информационно-коммуникационные технологии, по средствам телекоммуникационных опций, образуя специальные нейронные вычислительные сети (включая облачные вычисления, обслуживаемые алгоритмами искусственного интеллекта)⁷ для достижения максимальных результатов в сфере композитинга аудиоматериала. Немаловажную роль в подобных процессах играет компьютерный аудиосинтез⁸, способствующий созданию

⁶ Прим. автора. Под традиционными компьютерными технологиями понимаются классические алгоритмы современных программных средств нелинейного редактирования аудиоматериалов.

⁷ Прим. автора. Нейронные сети, облачные технологии и искусственный интеллект в настоящее время открывают широкие возможности для манипуляции звуковыми данными, однако во многих случаях автоматизированная обработка аудиоматериалов не всегда даёт качественные результаты. Особенно это касается аудиоматериалов, имеющих сложную стилистическую направленность и нестандартные спектро-частотные характеристики. Современные нейросетевые средства обработки звука, основывающиеся на передовых алгоритмах искусственного интеллекта, пока не способны в полной мере заменить *человеческий слух*, поскольку многие частотные артефакты носят сугубо индивидуальный характер. Это затрудняет выполнение реструктуризации панорамы частотно-балансного анализа в автоматическом режиме. Уникальность частот аудиоконпозиции зависит от многих факторов: это и тембральность, и насыщенность гармониками, и баланс тоново-*формантных* значений и т.д. Многие из этого перечня обрабатываются именно на слух и зависят от индивидуальных предпочтений инженера сведения. Процесс распознавания частот человеческим слухом в естественной среде существенно отличается от алгоритмов имитации «искусственного прослушивания» и анализа тех или иных акустических аспектов редактируемого звука. В силу вышеперечисленных причин можно утверждать, что оператор звука по-прежнему остаётся ключевым звеном в системе *человеко-машинного* взаимодействия, по крайней мере, до тех пор, пока не будут получены *достоверные* результаты научных исследований о полноте работы человеческого мозга.

* Под нестандартными *спектро-частотными характеристиками* автор имеет в виду аудиоматериал со смешанным содержанием, сведение которого подразумевает от 30 и более звуковых дорожек.

⁸ Прим. автора. Выбор категории компьютерного аудиосинтеза для определённых задач, связанных с комбинаторикой звуковых данных, напрямую зависит от конкретных ситуаций. К примеру, аналоговый аудиосинтез может использоваться при моделировании аналого-электронных цепей для генерации звука и воссоздания классических (аппаратных) синтезаторных звуков — синтезированных музыкальных инструментов, различных

уникальных звуков и мелодий, позволяющих наполнять традиционные звукозаписи новыми композиционными элементами, придающими оригинальность характеру звучания аудиопроизведения.

Аудиосинтез является неотъемлемо важным элементом системы компьютерного дизайна аудиоконпозиций и составления алгоритмическо-комбинаторных волновых структур, поэтому алгоритмы его совершенствования в обозримой перспективе будут оказывать серьёзное влияние на аудиопроизводство. Синтез преобразованных⁹ звуковых волн также существенно расширяет арсенал технических средств, предназначенных для ремастеринга аудиоматериалов¹⁰. Существуют разные методы, позволяющие получить синтезированные звуковые формы (образцы), которые впоследствии можно использовать для формирования электронных аудиоконпозиций. В данной рукописи будет проанализирован один из довольно редких методов¹¹, который позволит

аудиальных эффектов. В то время как *интервальный* (фазовый) аудиосинтез может использоваться для генерации звуковых комбинаций, контролируя фазу и амплитуду аудиосигналов, что позволяет создавать сложные (*неоднородные*) звуковые массивы. Область их применения может быть разной: от создания динамических аудиоподкладов, до формирования целостных полифонико-синтетических аудиопроизведений.

⁹ Прим. автора. Имеется в виду волновая *синтез*-структура, преобразованная в мультичастотный аудиосигнал посредством аналого-цифрового преобразования, АЦП. Сегодня науке известны различные виды компьютерного синтеза для работы с аудиоданными, к примеру, можно выделить следующие категории: аддитивный синтез, субтрактивный синтез, таблично-волновой синтез, гранулярный синтез, спектральный синтез и т.п.

¹⁰ Прим. автора. В последнее время в кругу учёных, занимающихся теоретическими и прикладными проблемами аудиоинформатики, наметилась интересная тенденция, демонстрирующая поиск новых более совершенных методов обработки и представления аудиосигналов. В первую очередь, эта тенденция затрагивает те аспекты аудиоинформатики, которые касаются дизайна звуковых форм. Тенденция во многом сформировалась под влиянием совершенствования различных видов вычислений и введения в практический оборот *полифункциональных* инструментов обработки данных, основывающихся на нейронных технологиях и искусственном интеллекте (более точно — *интеллектуальной автоматизации*). В этой связи все большее число исследователей стали обращать внимание на *альтернативные* способы обработки аудиоданных. Не осталась без внимания и часть аудиоинформатики, отвечающая за прикладные средства обработки звука, такие как: мастеринг, ремастеринг, реконструкция спектроакустических форм аудиоматериалов, спектральная реструктуризация однородной файловой структуры с неоднородным содержанием. На все перечисленные средства в современных условиях влияют технологии звукового синтеза и ресинтеза.

¹¹ Прим. автора. Само понятие *клеточных автоматов, их принцип и структура* известны мировой науке довольно давно. Однако, что касается использования правил клеточных автоматов в качестве инструмента для производства аудиосинтеза, предполагаемого различные комбинации поведения сигналов при формировании *новых* импульсно-волновых структур, а также их физического применения средствами программно-технической

расширить традиционное представление о современном аудиосинтезе. Речь пойдёт о клеточных автоматах¹². Клеточные автоматы (**Cellular Automata**, сокращённое наименование на английском языке и по тексту статьи **CA**)¹³ — это дискретные абстрактно-логические вычис-

реализации (*программирование, разработка функционально-алгоритмической схемотехники*) для аппаратных вычислительных систем (АВС), то в этом аспекте *научный анализ* практически *отсутствует*, за исключением некоторых отдельных работ, находящихся в сфере *корпоративной науки*.

¹² Прим. автора. Как *принцип* (организационная структура, алгоритм, включая правила поведения) — «*клеточные автоматы*», как набор элементарных действий — «*клеточный автомат*».

¹³ *Справочно:*

Первооткрывателем структуры клеточных автоматов принято считать математика Джона фон Неймана (John von Neumann) в своё время (1951 г.) начавшего работать над теорией «самовоспроизведения». Он не оставлял попыток представить научной общественности редукционистскую теорию (упрощённое понимание изучения различных объектов в биологии с точки зрения физико-химических свойств и процессов) биологического развития, которая, по его задумке, должна была воспроизводить точные копии самой себя. Его коллега Станислав Улам (Stanislaw Marcin Ulam) предложил Джону фон Нейману сфокусировать своё внимание на дискретной двумерной системе, которая и привела учёного к открытию клеточных автоматов. Фактически Джону фон Нейману удалось создать первую в истории дискретно-параллельную вычислительную модель, способную эмулировать универсальную машину Алана Тьюринга, которая была призвана производить различные рекурсивные вычисления. Позднее над проблемами клеточных автоматов работали следующие видные исследователи: Эдвард Форрест Мур (Edward Forrest Moore), Джон Р. Майхилл-старший (John R. Myhill Sr), Анил Нерод (Anil Nerode), Густав А. Хедлунд (Gustav Arnold Hedlund), Джон Хортон Конвей (John Horton Conway), Томмазо Тоффоли (Tommaso Toffoli). Работы Стивена Вольфрама (Stephen Wolfram)* в 1980-х годах способствовали тому, что растущее сообщество последователей CA появилось на научной карте. В серии работ Вольфрам подробно исследовал одномерные CA, предоставив первую качественную систематику их поведения и заложив основу для дальнейших исследований. Вольфрам предположил, что конкретное *правило перехода* для одномерного CA, известное как «*правило 110*», является *универсальным*. Через некоторое время после высказывания данной гипотезы Мэтью Кук (Matthew Cook) доказал, что *правило 110* поддаётся *универсальным* вычислениям: см. Cook M. Universality in Elementary Cellular Automata // Complex Systems 15.2004, pp. 1-40. и Wolfram S. A New Kind of Science. — Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. — 1197 p.

* Джон фон Нейман (John von Neumann) — венгерский и американский математик, физик, философ науки и техники. Работы Джона Неймана во многом определили структуру современной науки, поскольку его научно-теоретические изыскания и аргументированные обоснования нашли серьёзное отражение в полидисциплинарных исследованиях нашего времени. Его пионерские работы оказали значительное влияние на такие отрасли науки, как биология (нейробиология — представления о сходстве человеческого мышления и логике компьютерных программ, гипотезы о строении человеческой памяти), физика (алгебраические обоснования квантовой механики), математика (разработка теории алгебр операторов), информатика (участие в разработке компьютеров ENIAC и EDVAC, численные методы) и экономика

лительные системы, которые потенциально полезны как в качестве общих моделей *математической сложности*, так и в качестве более конкретных представлений *нелинейной динамики в различных научных областях*¹⁴.

Во-первых, клеточные автоматы (как правило) пространственно и временно дискретны. Они состоят из конечного или неисчислимого набора однородных простых единиц, *атомов* или *клеток*. В каждой единице времени, ячейки создают один экземпляр из конечного набора состояний. Они развиваются параллельно и выражаются в дискретных временных шагах, следуя функциям обновления состояний или *правилам* динамического перехода¹⁵. Обновление состояния ячеек

(модель общего экономического равновесия).

** Стивен Вольфрам (Stephen Wolfram) — британский учёный, физик-математик, изобретатель, специалист в области теоретической информатики. Стивен Вольфрам конкретизировал многие теоретические наработки Джона фон Неймана и других уважаемых деятелей науки инженерии в области рекурсивных вычислений (*самовычислений*), переведя многие вопросы теоретической математики в русло практической плоскости. Стивен Вольфрам представляет математику как некий метаязык, описывающий и устанавливающий различные физические и метафизические закономерности с помощью определённых алгебраических методов. Его работы в области клеточных автоматов подтверждают вышеуказанную характеристику. Клеточные автоматы одно из направлений, которое активно развивает Стивен Вольфрам. Элементарные клеточные автоматы, особенно правило 30, стали для учёного визитной карточкой в области информатики, поскольку клеточные нейротехнологии хорошо вписываются в современный научно-практический уклад развития киберфизических систем, опорным базисом для которых являются в том числе нейронные клеточные автоматы, представляющие собой гибридные вычислительные модели, в которых каждая ячейка автомата является нейроном и способна изменять своё состояние на основе состояний соседних клеток по определённым правилам.

*** Мэтью Кук (Matthew Cook) — американский логик и математик, специалист в области информатики. Известен своими публикациями по проблемам нейрокомпьютинга, аргументировал гипотезу Стивена Вольфрама о том, что клеточный автомат *правило 110* является полным по А. Тьюрингу.

¹⁴ Прим. автора. Имеется в виду принцип клеточных автоматов в нелинейных динамических системах, где под динамическими системами подразумевается абстрактная структура любой природы: техническая, информационная, физическая, химическая, биологическая, социальная, экономическая и т. п. В качестве описания моделей нелинейной динамики выступают дифференциальные уравнения и дискретные вычисления. В отличие от линейной системы, в которой небольшое изменение одной переменной приводит к небольшому систематическому изменению, нелинейная система демонстрирует чувствительную зависимость от начальных условий — небольшие различия в начальных условиях могут привести к совершенно разным результатам.

¹⁵ Прим. автора. Правило динамического перехода в структуре работы клеточных автоматов представляет собой заранее заданное правило, которое определяет изменение состояния каждой клетки в следующий момент времени в зависимости от локальной клетки и расположения её ближайших соседей. Правила динамического перехода могут быть детерминированными, веро-

исходит с учётом положения ячеек в её *локальной* окрестности (следовательно, никаких действий на расстоянии не предусматривается).

Во-вторых, клеточные автоматы *абстрактны*, они могут быть заданы в чисто математических и символьно-алгебраических выражениях, а физические структуры могут их реализовать.

В-третьих, клеточные автоматы — это вычислительные системы, которые способны находить функции и решать сложные алгоритмические задачи. Клеточные автоматы могут имитировать универсальную машину Алана Тьюринга (Alan Turing)¹⁶. Для этого необходимо подобрать для них наиболее подходящее правило, которое может выполнять *прямое и параллельное* вычисления в соответствии с критерием *тезиса* Чёрча-Тьюринга¹⁷.

ятностными и обобщающими. *Детерминированные* — состояние ячейки в последующий момент времени однозначно определяется состоянием этой ячейки и её ближайших соседей в предыдущий момент времени. *Вероятностные* — задаётся вероятность, что на следующем шаге клетка сменит свой цвет на другой. Обычно правила перехода одинаковы для всех клеток, что обеспечивает однородность системы. *Обобщающие* — правила, зависящие только от общего числа значений соседних ячеек.

¹⁶ Универсальная машина Алана Тьюринга* (universal Turing machine, UTM) — это унифицированная абстрактно-вычислительная машина обработки данных, концептуально предназначенная для калькуляции различных *вычислимых* последовательностей. Гипотетически универсальная машина Алана Тьюринга базируется на постулате о том, что если поставленная оператором задача может быть решена алгоритмическим путём, то такую задачу может решить и универсальная машина Алана Тьюринга, получив сценарий, либо программу, в виде символьно-числовых комбинаций для решения этой задачи в качестве входных (ввод → структура ↔ ввод) данных. Алан Тьюринг предложил концепцию универсальной вычислительной машины в 1936 году, его подход во многом определил и формализовал понятия «алгоритм» и «структура данных», применяемые в современной информатике (и более широко понимании — компьютерных науках). Универсальная машина Алана Тьюринга также объединяет следующие понятия: переменная машина А.Тьюринга, нейронная машина А.Тьюринга, недетерминированная машина А.Тьюринга, квантовая машина А.Тьюринга, вычислительная машина *пост*-Тьюринга, вероятностная машина А.Тьюринга, многодорожечная машина А.Тьюринга, многоленточная машина А.Тьюринга, однозначная машина А.Тьюринга, универсально-вычислительная машина А.Тьюринга, Машина Zeno (ускоренная машина А. Тьюринга).

* Alan Mathison Turing (Алан Мэтисон Тьюринг) — всемирно известный британский учёный, математик, криптоаналитик и логик, кавалер ордена Британской империи. С именем А. Тьюринга связана целая эпоха становления мировой теоретической информатики (компьютерных наук), его работы в области алгоритмизации и криптографии на долгое время определяют вектор развития multifunctionальной вычислительной техники. В честь Алана Тьюринга учреждена *самая престижная* по значимости премия в области информатики (*компьютерных наук*) — премия Тьюринга.

¹⁷ Тезис Чёрча*-Тьюринга (*гипотеза вычислимости*) — фундаментальное логико-математическое утверждение, гипотети-

Это обстоятельство позволит компьютерным аппаратам производить абстрактно-логические вычисления с целью «вычислить — вычислимое»¹⁸. Вычислитель-

чески обуславливающее тождественность между терминами алгоритмическая вычислимость и такими формализованными понятиями, как функция машины А.Тьюринга и частично-рекурсивная механическая функция.

*Алонзо Чёрч (Alonzo Church) — американский учёный-математик и логик, оказавший огромное влияние на развитие функциональной парадигмы программирования благодаря разработке теории *лямбда*-вычислений. Ввёл понятие « β -редукции» (*карирования*) рекурсивных вызовов функций с критериями « α -конверсия» и « η -конверсия», а также доказал неразрешимость проблемы для исчисления предикатов. *Лямбда*-вычисления благодаря операциям *абстракция/апликация* стали основой для развития систем интеллектуальной автоматизации и машинного искусственного интеллекта.

***Каррирование* в информатике — это преобразование *функции с множеством аргументов* в набор *вложенных функций с одним аргументом*.

¹⁸ Прим. автора. Имеется в виду повышение эффективности расчётов с применением ЭВМ (в многозадачном аспекте — компьютера), основанных на передовых математических алгоритмах и символьных операциях, способных значительно снизить обращения к аппаратным ресурсам компьютера в процессе сложных вычислений. Иными словами организовать аппаратно-независимые разветвлённые вычисления, для того чтобы обойти аппаратные ограничения компьютера. Это та самая ситуация, когда грамотно составленный, чётко выстроенный и логически правильно изложенный аппаратно-независимый алгоритм программы (особенно неявного типа) способен продемонстрировать более эффективные результаты по сравнению с аппаратно-зависимыми исчислениями.

¹⁹ В теории информатики (компьютерных наук) особенно в англо-говорящих странах такие алгоритмы принято называть «квалифицированными алгоритмами», в России вместо этого понятия в некоторой научно-технической литературе можно встретить аналогичный термин «экспертные алгоритмы». Для эффективности функционирования таких алгоритмов важны два условия:

1. Алгоритм должен иметь чёткую иерархию и разветвлённо-сноподчинённую структуру.

2. Описание такого алгоритма и его точная интерпретация компьютером должны основываться на продуманном выборе языка программирования с учётом его класса и функциональных возможностей, а также на краткости изложения неявных событий его программного кода. Кстати, здесь уместно вспомнить о знаменитом четырёхтомнике (фактически пятитомнике 4А, 4В) Д.Кнута (Donald Ervin Knuth) «Искусство компьютерного программирования» «The Art of Computer Programming». В русскоязычном официальном переводе «Искусство программирования», который сегодня явно недооценивают многие современные IT-специалисты, высказывая критику, что данная рукопись очень запутана и не даёт читателю представления о современном программировании. Можно много дискутировать на эту тему, но факт есть факт, что основной посыл данной книги — это искусство грамотного изложения кода в соответствии с семиотической топологией, логикой и алгебраическими представлениями. Также профессор Д.Кнут уделяет особое внимание анализу кода перед его дальнейшей *компиляцией*, считая эту процедуру наиболее важной для эффективной интерпретации алгоритма и раскрытия всего его *функционального* потенциала.

ные возможности клеточных автоматов имеют большой потенциал в сфере экспериментальной информатики. Они функционально обогащают сразу несколько её базовых разделов — *алгоритмизацию структур данных, объектную символьно-числовую комбинаторику, топологию структурных ветвлений*, выводя область *профессионального программирования* на более *продвинутый уровень*. Важно обратить внимание также на то, что принцип клеточных автоматов является устойчивым мостиком, соединяющим две дисциплины: *информатику и математику*, открывая дальнейшие перспективы по приращению полидисциплинарных научных знаний в таких областях исследований, как алгебраическая комбинаторика и логика, теория множеств и математическая лингвистика.

Оригинальный принцип клеточных автоматов заключается в том, что они демонстрируют сложное эмерджентное¹⁹ поведение, начиная с *простых* автоматов, подчиняясь *простым* локальным правилам (правилам перехода)²⁰. Именно поэтому СА привлекают все большее число исследователей, занимающихся *когнитивными, техническими и естественнонаучными* дисциплинами, желающих изучать формирование различных топологий структур во всей их сложности в чисто абстрактной атмосфере.

Клеточные автоматы и аудиоинформатика: пути взаимодействия и современное состояние практик СА-программирования

В *аудиоинформатике* клеточные автоматы рассматриваются как *отдельный вид аудиосинтеза*, с помощью которого можно создавать новые *органические*²¹ и *неор-*

¹⁹ Прим. автора. Эмерджентность — качество, свойства системы, которые не присущи её элементам в отдельности, а возникающие благодаря объединению этих элементов в совокупную, целостную систему.

²⁰ Прим. автора. Простые локальные правила (*правила перехода*) — это алгоритмические схемы, которые идентифицируют обновлённое состояние ячейки (клетки) в следующий момент времени в зависимости от состояния ячейки и окружающих её ближайших соседей. Такие правила обычно описываются специальной картой* переходов, на которой клетка определяет свою новую локацию на каждом минимальном отрезке времени, основываясь на своем местоположении и состоянии положения соседей. Карта переходов содержит информацию о функциях перехода клеточного автомата, в соответствии с которыми клетка имеет возможность вычислить своё новое состояние, основываясь на собственной топологии перемещения и состоянии соседних клеток.

²¹ В аудиоинформатике (*технический аспект*) и теории компьютерной музыки *органические* звуки — это отдельные акустические импульсы либо сигнально-ритмические комбинации естественного происхождения. Примечательно, что источником звука может выступать любой биологический организм или любой объект естественной природной среды, окружающей его. Интересно, что к числу таких звуков относятся практически любые ана-

*ганические*²² звуки и даже целые оригинальные электронные аудиоконструкции. Переходя от *общего к частному*, следует отметить, что применение *принципа* клеточных автоматов очень многогранно, и оно отнюдь не очерчивается профилем *естественных и технических наук*, клеточные автоматы можно и нужно изучать с *мультидисциплинарной* точки зрения. Важность изучения клеточных автоматов диктуется и современной технологической повесткой, которая предполагает перевод теоретических наработок из сферы информационно-кибернетических нейровзаимосвязей в *практическую область* их применения компьютерными системами обработки данных. В нашем случае практическая плоскость, предусмотренная подобным подходом, ограничивается *инструментальными средствами информатики*, а именно *языками программирования*. Полноценной описательной практики *СА-программирования*²³ на сегодняшний день крайне мало, практического её при-

логовые электромагнитные колебания в естественном виде (т.е. не прошедшие процедуры цифро-аналогового преобразования). Таким образом, к органическим звукам можно отнести не только шум дождя, пение птиц и т.д., но и традиционные музыкальные инструменты: духовые, клавишные, струнные и т.п.

²² Прим. автора. К *неорганическим* звукам (*технический аспект*) относятся звуки искусственного (неживого) происхождения. Как правило, это синтетические звуки, получаемые в результате компьютерного синтеза, либо образцы для такого синтеза, прошедшие процедуры аналого-цифрового преобразования. К таким звукам можно отнести генеративные музыкальные импульсы синтезатора (на аналоговой и цифровой схемотехнике), фоновые шумы компьютерной схемотехники, различные механические звуки нерукотворного происхождения. Примечательно, что любые шумы стационарного и нестационарного типа могут быть как *органическими*, так и *неорганическими*. В теории музыки иногда такие звуки называются *натуральными* и *ненатуральными*.

²³ Как и в любом разделе информатики (*компьютерных наук*), область которого выходит за рамки фундаментальных теоретических исследований и логических обоснований предусмотрена некая *инструментальная база*, являющаяся ответвлением от *классических* представлений о закономерностях обработки информации. Как правило, это прикладные разработки и практико-ориентированные исследования. Эти сферы всегда имеют определённую специфику, выражающуюся в конкретном предназначении разрабатываемых исследователем объектов, впоследствии существенно влияющих на развитие и приращение знаний в предметной области. В информатике такой базой служат *языки программирования*, они играют роль *посредника* в технической коммуникации между машиной и оператором, позволяя эффективно решать поставленные задачи. Инструментальная база разделов информатики (*информатика по отраслям деятельности*) также имеет свою внутреннюю специфику, подразумевающую определённый характер действий с оттенком на предметные задачи. Аудиоинформатика как раздел информатики (*компьютерных наук*), а по логике автора уже давно претендующая на научно-отраслевую автономию, здесь не исключение. Традиционно виды алгоритмов, используемых для обработки данных, имеют разные ответвления, поэтому отдельные широкопрофильные технико-прикладные практики программирования обычно именуются базовым алгоритмом. В нашем случае это клеточные автоматы (*cellular automata, CA*), поэтому *СА-программирование*.

менения в области *аудиоинформатики* ещё меньше. Размышляя о причинах такого неудовлетворительного положения дел в сфере *СА-программирования* как в России, так и за рубежом, автор настоящей рукописи полагает, что причины могут здесь крыться в *следующем*:

- В отсутствии научных школ в области информатики (компьютерных наук — *computer science*), формирующих практико-ориентированные представления о программировании как в искусстве составления высокоэффективных компьютерных программ. Такие школы, безусловно, обеспечат вертикальную преемственность при смене поколений исследователей и инженеров-программистов, формирующих фундаментальные теоретико-прикладные основы новейших (уникальных) знаний в таких разделах информатики, как общая алгоритмизация и алгоритмические структуры данных, принципы построения логико-вычислительных систем, разработка программных структур на основе строковых и графовых алгоритмов с применением динамического программирования.
- В крайне невысокой степени взаимоинтеграции исследовательской базы корпоративной науки (корпоративной информатики) и информатики общего профиля (гражданские научно-технические разработки и исследования).
- В интеллектуальном разрыве и искусственной демаркации научного потенциала между информатикой и кибернетикой, а также WEB-наукой. Бессистемным и хаотичным обменом исследовательского опыта теории и практики в междисциплинарных разделах данных наук.
- В исключительности и оригинальности характера исследований в области прикладной информатики (компьютерных наук), инструментально-вычислительных наук, заключающейся в особой сложности, которая выражается в уникальной специфике работы с аналоговыми и цифровыми данными.
- В закрытости подходов в области коммерческого программирования (компьютерная тайна), а также передовых техник составления сложно-структурированных алгоритмов.

Вышеперечисленные проблемы и низкая степень интеграции различных научных дисциплин в информатику (компьютерные науки) делают заявленную автором тему *особо актуальной*.

Клеточные автоматы как вид экспериментального аудиосинтеза, методы реализации и определение инструментальных средств составления программы

Область авторского исследования — компьютерная аудиоинженерия и аудиоинформатика. Они, безусловно,

являются наглядными примерами разветвлённых²⁴ полидисциплинарных исследований.

Компьютерный синтез аудиоматериала целиком зависит от различных методов и алгоритмов, применяемых для его создания, клеточные автоматы могут быть органично встроены в его структуру. В теоретическом плане имеется достаточное количество научных работ, посвящённых данному направлению. Что же касается практики, то здесь дела обстоят хуже. Теоретические наработки в области СА требуют тщательного подбора программно-инструментальных средств, которые, в свою очередь, должны сочетаться с алгебраической комбинаторикой, что в настоящее время является редкостью. Изобрести механизм *трудно*, заставить его работать *ещё труднее*. Исходя из этой *формулы*, автор настоящего исследования сосредоточил своё внимание *исключительно* на работах, описывающих организационно-функциональную структуру клеточных автоматов. К сожалению, таких работ *крайне мало*, несмотря на то, что подобные исследования *существенно обогащают прикладную информатику*²⁵. Одним из пионеров СА-программирования в области аудиоданных, успешно реализовавших подобный метод синтеза аудиоматериала на практике, является Энн Льюис²⁶ (Ann Lewis). Она одна из немногих экспериментаторов, кто в 2002 году под руководством профес-

²⁴ Прим. автора. Под разветвлёнными полидисциплинарными исследованиями подразумевается анализ, основанный на широком спектре научных дисциплин, тематически связанных между собой. Разветвлённые полидисциплинарные исследования характеризуются предметными связями трёх и более дисциплин различной классификации. Установка взаимозависимости дисциплин формируется под воздействием тематики исследования. Хотелось отметить, что ключевым отличием полидисциплинарных (в некоторых случаях трансдисциплинарных научных исследований) от разветвлённых полидисциплинарных исследований является взаимоинтеграция гуманитарных (общественных), естественнонаучных и технических дисциплин. В то время как традиционные полидисциплинарные исследования классификационно привержены к близким по профилю дисциплинам. В мировой научной периодике такой научно-исследовательский подход именуется как «интегративный». Хорошим примером здесь служит аудиоинформатика, которая, в прикладном понимании зиждется на точных и технических науках, но в теоретическом плане черпает знания также из естественнонаучных и гуманитарных направлений.

²⁵ Прим. автора. Речь идёт об исследованиях в области информатики, раскрывающих принципы работы того или иного интеллектуального механизма с расшифровкой функциональных операций, характеризующих структуру программного кода.

²⁶ Прим. автора. Энн Льюис (Ann L. Lewis) — преподаватель школы-факультета компьютерных наук университета Карнеги-Меллон. Энн Льюис начала свои научные изыскания как студентка факультета компьютерных наук университета Карнеги-Меллон, одновременно получая знания в области музыки при школе музыки Карнеги-Меллон (School of Music — Carnegie Mellon University). Круг её научных интересов очерчивается знаниями в области создания синтезированных ритмических аудиопартий, обработки звука, преобразования текстовых массивов в синтезированную речь. Принимала активное участие в различных конференциях по компьютерной обработке звука. Совместно с Роджером Данненбергом являлась участницей конференции по международной компьютерной музыке (International Computer Music Conference, ICMA — 2002).

сора Р. Данненберга²⁷ (Roger B. Dannenberg) в школе компьютерных наук (School of Computer Science) университета Карнеги-Меллон (Carnegie Mellon University, CMU/USA) поставила компьютерный эксперимент и применила LISP-модель, описывающую метод клеточных автоматов для производства новой фактуры аудиоматериала. Этот практический эксперимент очень важен для развития прикладной аудиоинформатики, поскольку он даёт возможность формировать новые уникальные аудиоструктуры.



Рис. 1. Логотип частного американского университета Карнеги-Меллон, в котором работает одна из сильнейших мировых школ в области компьютерных наук²⁸

Источник: Коллаж составлен автором на основе оригинального логотипа*, Таран В.В. — 2026 г.

*Логотип является собственностью университета Карнеги-Меллон.

²⁷ Прим. автора. Роджер Данненберг (Roger B. Dannenberg) — американский учёный и преподаватель в области компьютерных наук (информатики), занимающийся разработкой перспективных направлений в сфере обработки звука программно-техническими средствами на базе школы-факультета (School of Computer Science — Computer Science Department) компьютерных наук университета Карнеги-Меллон (Carnegie Mellon University). Роджер Данненберг специализируется на разработке алгоритмов распознавания различных сигнальных комбинаций, включая человеческую речь, музыкальные партии, звуки различной природы. Отдельное внимание учёный уделяет системам обработки аудиоданных, в частности, языкам программирования. Является идейным вдохновителем и создателем языка программирования Nyquist, одним из проектировщиков знаменитого аудиоредактора Audacity*, участвует в различных проектах по созданию компьютерной музыки. Имеет учёную степень PhD в области компьютерных наук (информатики). Является членом института инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), ассоциации вычислительной техники (Association for Computing Machinery, ACM), международной ассоциации компьютерной музыки (International Computer Music Association, ICMA).

²⁸ Прим. автора. Под технико-манипулятивными проектами в аудиоинформатике понимаются те проекты, при обработке которых необходимо динамически изменять структуры аудиосигнала. Это проекты, на обработку которых требуются значительные ресурсы с точки зрения техник составления алгоритмов, динамически обрабатывающих аудиосигнал. К примеру, таким проектом может служить аудиоморфинг, когда одна часть аудиосигнала постепенно видоизменяется, превращаясь в другую по спектрально-частотным характеристикам, но при этом не затрагивает величину сдвига фазы сигнала, девиация фазы, то количество радиан, которое является оптимальным для общего аудиосигнала в не зависимости от участка перехода. Интерполяция параметров такого проекта основывается на трёх манипуляционных техниках: синусоидальное моделирование, оконное преобразование Фурье и кодирование с линейным предсказанием.

Применение данного метода убедительно показало насколько оригинальной и полифоничной может быть фактура мелодии, получаемая в результате соединения фрактальных структур.

Энн Льюис реализовала синтез фрактальных структур как учебный проект на языке программирования Nyquist. И тому есть несколько причин:

1) Nyquist является специализированным языком аудиoprogrammирования, позволяющим реализовывать сложно-функциональные высоконагруженные технико-манипулятивные проекты в области звука²⁹.

2) Nyquist успешно применим в качестве демонстрационного языка программирования.

3) Nyquist обладает развитым техническим потенциалом и использует мощный арсенал операционных средств и технологий, унаследованных от его функциональных прародителей, прежде всего, Arctic³⁰, Canon³¹,

²⁹ Прим. автора. Единственным ограничением Nyquist является его работа с нагруженными алгоритмами обработки звука в реальном времени. Обусловлено это тем, что архитектура языка программирования Nyquist разрабатывалась для обработки аудиоматериалов в офлайн режиме, не стоит забывать, что Nyquist это диалект LISP, поэтому интерпретация фрагментов его кода в режиме настоящего времени вносит задержки, которые могут сказываться на характере обработки сигнала. Задержки могут быть связаны с длительностью интерпретации выражений, а также непредсказуемости времени, затрачиваемого на обработку аудиоматериала из-за сборки мусора и динамической типизации. Этот язык ориентирован на пост обработку аудиоданных и силён именно в инженерных практиках анализа, синтеза сведения и мастеринга аудиотреков. К сожалению, в Audacity* для Nyquist отсутствует низкоуровневый доступ к аудиопотоку, в результате чего язык не имеет доступа к буферу обрабатываемого трека, что, в свою очередь, затрудняет поддержку *callback*-процессинга для фрагментарной обработки сигнала. Однако эту проблему можно обойти с помощью ограничения инженерных сценариев простыми операциями (фильтрация, работа с огибающими) и использовать буферы малого размера. Эта тема будет обязательно раскрыта в следующих публикациях автора.

³⁰ Прим. автора. Arctic — это специализированный, декларативный язык программирования, разработанный в Университете Карнеги-Меллона (США) для описания систем реального времени с параллельными процессами. Язык разработан Дином Рубином (Dean Rubine) и Роджером Данненбергом (Roger B. Dannenberg). Целевое назначение языка — это управление звуковым синтезом (генерация музыки), сетевое синхронное создание звуков тревоги и оповещения на различных промышленных объектах, в том числе атомных электростанциях, синхронизации звука по времени в климатических системах и станциях слежения за погодой. Сейчас по факту является историческим языком программирования, давшим питательную почву для различных узкоспециализированных языков программирования обработки аудиоматериалов.

³¹ Прим. автора. Canon — это полноценный Lisp-ориентированный, абстрактно-декларативный, специализированный язык программирования и одновременно нотация для музыкальных партитур. Язык изначально создавался как инстру-

Fugue³², LISP³³/XLISP³⁴ и SAL³⁵. Вспомогательной исполни-

мент музыкального программирования для экспериментов и обучения студентов, однако впоследствии зарекомендовал себя как мощное средство по управлению данными сигнальных массивов в аппаратных синтезаторах и вокодерах, а также для работы в MIDI-секвенсорах для создания и корректировки партитур, управляемых MIDI-сигналами. Язык не имеет отдельного интерпретатора, а партитуры оцениваются в *окружении*, которое влияет на ноты и может изменяться преобразованиями. Для этого используются глобальные переменные для имитации динамической области видимости *окружения* (например, *time*, *dur*, *velocity*).
³² Прим. автора. Fugue — специализированный функциональный Lisp-ориентированный язык программирования для формирования состава музыкальной композиции, синтеза и управления звуком. Язык позволяет описывать алгоритмы обработки сигналов, музыкальные партитуры и высокоуровневые музыкальные процедуры в едином составе. Поддерживает поведенческую абстракцию, выражающуюся в управлении сложными музыкальными структурами. Реализован на комбинации C и XLisp для Unix-рабочих станций. Необходим для описания сложных музыкальных структур и алгоритмов синтеза звука, а также создания и манипулирования звуковыми объектами как абстрактными, неизменяемыми сущностями.

³³ Прим. автора. LISP (LISt Processing language, LISP, Lisp) — легендарный (один из старейших языков программирования широкого профиля, унаследовавших IPL*-структуру) язык программирования, основанный на принципе обработки списков. На языке LISP программы, сценарии, а также данные представляются как списки, состоящие из элементов любой сущности. LISP базируется на *лямбда*-исчислении А.Черча соответственно функции — это полноправные объекты этого языка. LISP поддерживает макросистему, что позволяет вводить нестандартные синтаксические конструкции и манипулировать символьными комбинациями, а также создавать программы, которые неявно пишут другие программы. LISP *гомоиконичен*, тождественен представлению кода и данным его программы в виде *s*-выражений (символьных выражений), позволяет модифицировать код как данные. Сегодня LISP это целое семейство языков программирования, видоизменяющихся в соответствии со временем, породившее большое количество диалектов, предназначенных для различных специальных нужд.

* IPL (Information Processing Language) — один из первых высокоуровневых языков программирования, разработанный в конце 1950-х — начале 1960-х годов прошлого века специально для задач искусственного интеллекта (ИИ). Язык проектировался для обработки символьных нечисловых данных, а также для операций со сложными структурами данных (списки, деревья). IPL — пионер в области языков для ИИ. Его идеи (списки, рекурсия, символьная обработка, интерпретируемость, динамическое управление памятью) стали фундаментом для современных технологий, хотя сам язык сегодня не используется в продуктивной разработке.

³⁴ Прим. автора. XLISP — это специализированный язык процедурно-функционального программирования, созданный с целью экспериментов с объектно-ориентированными событиями на компьютерах с ограниченными ресурсами (малой памятью и производительностью). XLISP является диалектом LISP, и имеет различные усовершенствованные варианты такие как: XLISP-PLUS, XLISP-STAT. Реализации XLISP могут функционировать практически на всех известных операционных системах, что позволяет говорить о его кроссплатформенности.

³⁵ Прим. автора. SAL (Simple Algorithmic Language) — это специальный алгоритмический язык программирования для со-

тельной средой служат языки C³⁶ и Java³⁷.

Аргументом *первой причины* служит тот факт, что Nyquist — это универсально-экспериментальное средство программирования, удовлетворяющее все миро-

ставления компьютерных композиций, разработанный для эффективного взаимодействия со средой Common Music (CM). Common Music (CM) это объектно-ориентированная среда для составления алгоритмической музыкальной композиции, разработанная Генрихом Таубе (Heinrich Taube), почётным профессором композиции и теории музыки в Школе музыки Университета Иллинойса США (University of Illinois School of Music at Urbana-Champaign, USA). Фактически SAL это язык для композиторов, пишущих электронную музыку. Он позволяет создавать сложные алгоритмические музыкальные произведения и описывать нестандартные музыкальные структуры через операционный код. Интегрирован в систему Common Music, а также в редактор Audacity* (составление синтаксических конструкций) через приглашение языка Nyquist.

* Официально «Simple Algorithmic Language» — (простой алгоритмический язык), есть и другое неофициальное название «Secretly Another Lisp» — (тайно ещё один LISP, секрет ещё одного LISP). Вообще название языка происходит от имени Sal (Salvatore) и является данью уважения к композитору Sal Martirano**, профессору музыкальной школы UIUC. Не путать с названием другого средства программирования SAL (Source-Annotation Language), являющегося системой аннотаций для кода на «C/C++», разработанной корпорацией Microsoft.

** Сальваторе Джованни Мартирано (Salvatore Giovanni Martirano) — американский композитор, автор современной классической музыки. В 1969 году Мартирано вместе с группой инженеров и музыкантов из Университета Иллинойса (University of Illinois) начал разработку электронного музыкального инструмента SAL-MAR Construction. Это гибридная система, в которой логические схемы TTL (Transistor-Transistor Logic) управляют аналоговыми модулями (генераторами, усилителями и фильтрами). Исполнитель взаимодействует с инструментом через горизонтальную панель из 291 светового сенсорного переключателя, что позволяет гибко управлять макро- и микропараметрами звучания.

³⁶ Прим. автора. Си (C) — многофункциональный, процедурный, статически-типизированный язык универсального назначения. Язык Си настолько хорош и универсален, что тут трудно что-либо выделить, отметим только ряд его ограничений (о возможностях всем специалистам известно). Отсутствие автоматического управления памятью, риск ошибок сегментации — необходимость вручную контролировать границы массивов. Последнее ограничение чаще всего возникает при попытке доступа к памяти, которая не выделена процессу или к которой у программы нет прав на доступ. Операционная система принудительно завершает программу, чтобы предотвратить повреждение данных или системы.

³⁷ Прим. автора. Java — это объектно-ориентированный, кроссплатформенный язык программирования общего назначения, разработанный компанией Sun Microsystems (позже приобретённой Oracle). Компилятор преобразует сценарии программы в *байт*-код, затем виртуальная машина (Java Virtual Machine, JVM), являющаяся частью исполняющей системы (Java Runtime Environment, JRE), воспроизводит *байт*-код, транслируя его в машинные инструкции для конкретной платформы. Язык имеет большое количество библиотек, что говорит о его развитости в области проектирования высокой сложности. Язык имеет чёткий синтаксис, что делает его удобным в обращении для людей, изучающих азы профессионального программирования.

вые стандарты и современные технологические практики в сфере аудиоинженерии, а также редактирования цифрового звука [1].

Аргументом *второй причины* является возможность языка Nyquist интегрировать свои командные функции и микросценарии в один из наиболее известных компьютерных редакторов аудиоматериала — Audacity* [2,3]. Это позволяет задействовать сценарно-программные механизмы, составленные на данном языке, одновременно с интерфейсно-ориентированными опциями данного редактора.

К примеру, процесс демонстрации синтезируемых комбинаций, создаваемых с помощью фрактальных структур, можно визуализировать через оконный интерфейс редактора Audacity* [4]. Это дает возможность в аудиторных условиях эффективнее воспроизводить подобные процессы, наглядно показывая правила и алгоритмы исполнения нотаций инструкций.

В пользу *третьего аргумента* говорит устойчивая взаимосвязь языка Nyquist с одним из самых *мощных* и *высокоразвитых* языков программирования современности — LISP [5]. Язык программирования LISP уникален прежде всего потому, что он создавался как язык, способный производить *интеллектуальные операции над программируемыми массивами данных*, а также *включать* такие *операции*³⁸ в структуру собственного кода [6]. Помимо прочего, языки Arctic, Canon и Fugue в сочетании с языком SAL и кроссплатформенностью дают Nyquist неоспоримые *ультраспециализированные* преимущества, выражающиеся в специфике описания *мультиблоковой* нотации опциональных алгоритмов работы с аудиоданными, составлением сценариев для аудиоэффектов и композиций через комбинации функций [7]. Инкорпорирование в операционный пакет Nyquist таких LISP-диалектов как XLISP делают данный язык лидером в области статистической обработки аудиосигналов.

Nyquist в этом смысле является специализированным декларативным языком программирования, который фактически сочетает в себе все функции, которые могли бы быть использованы в обработке аудиоданных на LISP с особыми предписаниями языка SAL.

Поддержка Nyquist-программирования в Audacity*, реализованная через специальное приглашение, делает данный язык мощнейшим средством, способным превратить компьютер *средней мощности* в полноценную *лабораторию по работе со звуком*³⁹.

³⁸ Прим. автора. Чаще всего *неявно* (программа — в программе).

³⁹ Прим. автора. Одним из принципиальных отличий связки NyquistIDE и Audacity* от других программных и программно-ап-

Инструментально-техническая и аппаратная компьютерная база, используемая автором исследования для воспроизведения и совершенствования эксперимента сигнально-комбинаторной обработки аудиоматериала (клеточные автоматы)

Для достижения целей эксперимента использовалась следующая инструментально-техническая база (рис. 2).

честве моделирования графических плашек), язык программирования Python™ (для компиляции графических композиций клеточных автоматов).

Аппаратная база для вычислений: ноутбук ASUS ROG G615JH-RV045, процессор (частота 2,4 ГГц): Intel Core i5-13450HX (десять ядер), SSD: 512, оперативная память (DDR5): 16 ГБ.

Разобравшись с причинами использования языка Nyquist для целей дизайна, синтеза и ресинтеза аудио-



Рис. 2. Языки программирования, программы и компьютерные технологии, используемые автором для воспроизведения эксперимента и подготовки данной статьи

Для обработки аудиосигнала использовались языки программирования: LISP (XLISP, Nyquist), SAL. Инженерный процессинг осуществлялся в интерфейсе прикладного программирования NyquistIDE с выводом сигнала в Audacity*. Для моделирования правил клеточных автоматов использовался пакет Wolfram Mathematica® v.10.2, язык Wolfram (в качестве описания сценариев построения), среда трёхмерного проектирования Blender® (в ка-

паратных аналогов в аспекте инженерных практик редактирования звука (помимо открытой лицензии) является чёткая продуманность изложения базисных инструкций, сценариев и прочих элементов кода в отношении вычислительных возможностей данного программного комплекса, формирующих полифункциональную автономную архитектуру для решения конкретных утилитарно-технических задач. Иными словами, это тот самый случай, когда ядро программного комплекса выполнено на высоком уровне, а его вычислительные возможности настолько широки, что местами опережают аппаратные возможности ЭВМ, реализуя символично-алгебраические операции в обход ограничений периферийной технической зоны. Эффект действительно очень мощный, поскольку, к примеру, мультичастотное исправление спектроакустических параметров сонограммы, которое обычно излишне нагружает, а в некоторых случаях физически перегружает центральный процессор, в данном программном комплексе позволяет получить оперативный и качественный результат при минимальной нагрузке на аппаратную оснастку компьютера.

данных приступим к сути изложения эксперимента, поставленного Энн Льюис.

Экспериментальная программная модель Данненберга-Льюис. Компьютерный эксперимент: проверка воспроизводимости, уточнение параметров, элементы моделирования и практика использования клеточных автоматов в сфере аудиопроизводства

Эксперимент Энн Льюис и её научного руководителя Роджера Данненберга заключался в возможности использования клеточных автоматов для генерации полноценной алгоритмической аудиокomпозиции⁴⁰[8]. Клеточные автоматы (СА-генерацию)⁴¹ с одинаковой эффективностью можно применять как к предзаписан-

⁴⁰ Прим. автора. Практика показала, что в зависимости от правил, клеточные автоматы могут генерировать не просто примитивные декларативно-стилевые композиции, но и формировать сложную алгоритмическую структуру звука за счёт мультиагентного пересчёта сигналов, характеризующихся экземплярами наборов состояний (atoms→cells).

⁴¹ Прим. автора. СА-генерация — альтернативное название «клеточных автоматов», характеризующее структуру, принцип и работу различных топологий ячеек в соответствии с установленными правилами логики математических операций.

ному аудиоматериалу⁴², так и к *форм-оболочкам*⁴³, формирующим базовые элементы для полноценных звукоописательных структур⁴⁴ таблично-волнового синтеза. Клеточный автомат состоит из массива ячеек, где каждая ячейка инициализируется либо чёрным, либо белым цветом (вкл./выкл., 1/0) [9].

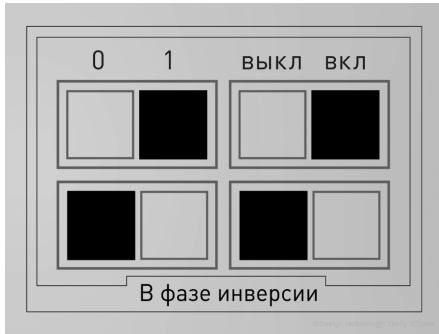


Рис. 3. Ячейки клеточных автоматов, характеризующие кластерно-бинарную систему хранения данных. Рисунок демонстрирует унарное обращение к бинарным сотам

⁴² Прим. автора. Генеративные возможности клеточных автоматов позволяют воспроизводить новые оригинальные композиции, используя в качестве ресурсной базы любой органический аудиоматериал. Это может быть как простая аудиодорожка с предзаписанными живыми звуками любых музыкальных инструментов, включая вокальные партии, так и *midi*-нотации с предзагруженной звуковой формой, предполагающей пустой заголовок.

⁴³ Прим. автора. Клеточные автоматы имеют возможность работать напрямую с *форм-оболочками*. Для этого необходимо использование алгоритмов алгебраично-функционального и таблично-волнового синтеза. Алгоритмические принципы работы данных видов синтеза должны быть изложены в специальных программах-инструкциях и локализованы в виде файлов с расширением того языка программирования, на котором предполагается производить операционные действия по манипуляции с аудиоданными. В нашем случае это язык программирования Nyquist и его прародитель LISP. В некоторых случаях это может быть SAL.

*Алгебраично-функциональный аудиосинтез — это вид синтеза, основанный на принципах физического моделирования, использующий математические функции в качестве опорных констант для получения оригинальных образцов различных волнообразных звуковых форм. Профиль волны из данного вида синтеза обычно получается при манипулятивном сочетании нескольких параметров, таких как синус, косинус, парабола, а также рекурсивных математических формул, нотированных под применяемый аудиоинженером язык программирования. Это один из немногих видов аудиосинтеза, позволяющий моделировать аналоговое звучание различных музыкальных инструментов и вокала в автономном режиме.

**Таблично-волновой аудиосинтез — это модель звукового синтеза, использующая отдельные блоки фрагментов аудиоматериала для их постепенной последовательной динамической смены между собой с целью получения различных тембральных оттенков звучания.

⁴⁴ Прим. автора. Под звукоописательными структурами понимаются ресурсы (звуковые массивы), представленные в виде семиотической структуры, топология символов которой управляется математическими функциями, в свою очередь, логика которых описана в символично-знаковой системе конкретного языка программирования, например Nyquist, SAL или Python™.

На каждом шаге следующая строка/генерация (представленная визуально — рисунок №3, как показано ниже предыдущего массива — фаза инверсии) вычисляется из первого массива с использованием правила обновления для каждого элемента массива [10]. Правило обновления (которое определяет сам автомат) — это просто функция от родительского элемента массива и его левого и правого соседей [11].

Классически клеточный автомат строится по координатной сетке и имеет две фазы перехода [12]. Первая фаза (по умолчанию не активно) — ячейки пустые = «0». Вторая фаза (по умолчанию активно) — ячейки заполненные = «1». Параметры моделирования могут быть разными. Правило обновления — это чётко выстроенный алгоритм, который на каждом шаге эволюции задаёт новое состояние (положение) каждой из ячеек сетки, руководствуясь текущим состоянием самой ячейки и текущим положением соседних ячеек в рамках заданной окрестности [13]. Допустим, задаётся начальное состояние сетки $t = 0$ (означает, что активность распределения фрагментов сигнала 0). Для каждого шага $t \rightarrow t + 1$, далее «→»:

- 1) → для каждой ячейки анализируется её текущее состояние и состояния соседей;
- 2) → по правилу обновления вычисляется новое состояние ячейки;
- 3) → все ячейки переходят в новые состояния одновременно.

Процесс повторяется на заданное число шагов или до достижения устойчивого состояния. Приведём в пример элементарный одномерный клеточный автомат в двух состояниях (0/1) по правилу 30. Определим положение ячеек (таблица №1):

Таблица 1.

Динамика состояний клеток (ячеек) по правилу 30

Текущее состояние трёх соседних клеток	Новое состояние центральной клетки
111	0
110	0
101	0
100	1
011	1
010	1
001	1
000	0

Перечислим все возможные конфигурации первых трёх соседних клеток:

111, 110, 101, 100, 011, 010, 001, 000

Для каждой конфигурации укажем новое состояние центральной клетки (*правило 30*):

0, 0, 0, 1, 1, 1, 0

Составим двоичное число из выходных значений (слева направо):

00011110

Переведём двоичное число в десятичную систему:

$$00011110_2 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 16 + 8 + 4 + 2 = 30_{10}$$

Таблица пара «вход → выход»

Таблица 2.

Таблица состояний аудиофрагментов по семафорно-векторной карте перехода (унарный оператор «→» показывает направление перехода в соответствии с состоянием аудиофрагмента)⁴⁵

Вход	Унарный оператор «→»	Выход	Состояние аудиофрагмента по семафорно-векторной карте перехода ⁴⁵	
1.	111	→	0	3
2.	110	→	0	2
3.	101	→	0	2
4.	100	→	1	2
5.	011	→	1	3
6.	010	→	1	2
7.	001	→	1	2
8.	000	→	0	0

Представим элементы вычисления как начальный блок-массив:

⁴⁵ Прим. автора. Семафорно-векторная карта перехода (в клеточных автоматах) — это верхняя часть (плашка) графической идентификации, характеризующая начальные состояния побитовых массивов на входе в систему, *фактически декларация начального набора значений*, например, начального состояния клетки или набора битов. С точки зрения физической обработки информации такая карта показывает нам состояние переходов (преобразований) различных мультимедийных данных в виде сигналов. В нашем случае карта показывает поэтапное преобразование фрагментированных массивов аудиоданных. Восьмиблочная плашка часто представляет собой 8-битное число, которое может задавать стартовое состояние системы, параметры или конфигурацию. Например:

— В двоичной системе — это 8 битов, где каждый блок — это *бит, включён или выключен*.

— В некоторых случаях она может обозначать контрольные или идентификационные данные.

A1 A2 A3 ... (B1 B2 B3 ...).

Пусть B2 — элемент, значение которого вычисляется. Таким образом, B2 зависит только от значений A1, A2 и A3. Примером правила обновления может быть:

если A1 = A3 и A2 = 1, то B2 = 1, иначе B2 = 0

Существуют два возможных значения для каждого из A1, A2 и A3, а это означает, что существуют $2^3 = 8$ возможных конфигураций. И есть $2^8 (2^8 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2) = 256$ возможных функций от A1, A2 и A3 до B2. Таким образом, существуют только 256 возможных правил обновления⁴⁶. Обратите внимание, что количество возможных правил обновления не зависит от количества элементов в массиве. Правила могут быть пронумерованы от 0 до 256⁴⁷. В этом виде синтеза используются два основных правила Вольфрама (Wolfram rules) см. рисунок № 4.

- 1) Хаотическое правило — (30)
- 2) Фрактальное правило — (90)

На рисунке ниже *правило 30* (слева) используется для создания ряда строк, начиная с первой «единицы» в первой строке.

Рисунок демонстрирует классическое построение клеточных автоматов по правилам, *слева* — 30, *справа* — 90. Ветвление сигнала по правилу 30 будет выглядеть следующим образом:

$$B = 0 \rightarrow F = 0 \rightarrow A = 1 \rightarrow H = 0 \rightarrow Y = 0 \rightarrow U = 1 \rightarrow R = 0 \rightarrow Q = 1$$

Замыкание строки

$$Y = 0 \rightarrow U = 1 \rightarrow R = 0 \rightarrow Q = 1 \rightarrow B = 0 \rightarrow F = 0 \rightarrow A = 1 \rightarrow H = 0$$

Вычисление вероятности состояния центральной ячейки

$$\text{new_state} = \text{left} \oplus (\text{center} \vee \text{right})$$

где: \oplus — операция XOR (*исключающее «ИЛИ»*), \vee — операция OR (*«ИЛИ»*).

- 1) Сначала вычисляется centerVright (логическое «ИЛИ» центра и права).
- 2) Затем результат XOR сопоставляется с left (левым соседом).
- 3) Полученное значение становится новым состоянием центральной ячейки.

⁴⁶ Прим. автора. Обратите внимание, что количество возможных правил обновления не зависит от количества элементов в массиве.

⁴⁷ Прим. автора. Таким образом, существуют только 256 возможных правил обновления.

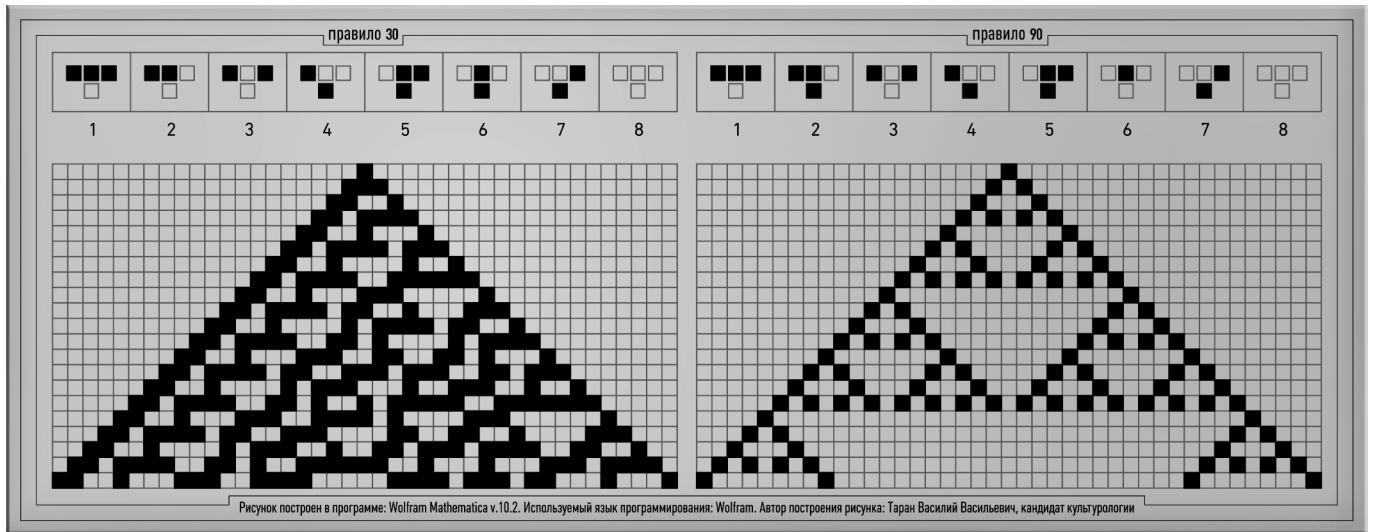


Рис. 4. Демонстрация построения клеточных автоматов: слева — правило 30, справа — правило 90

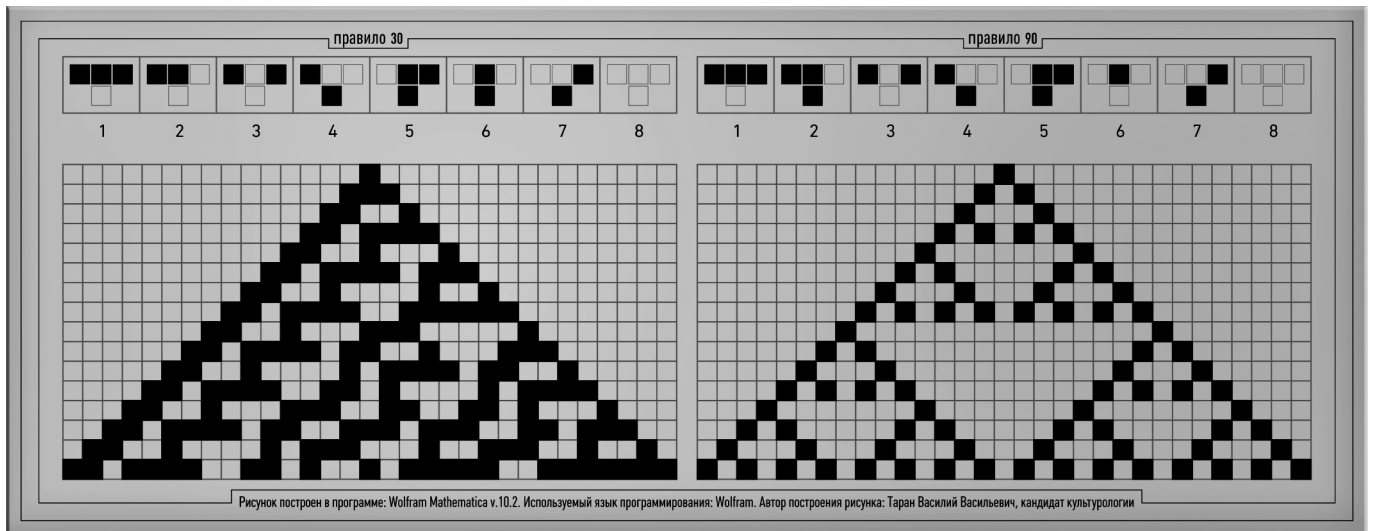


Рис. 5. Пример топологии построения клеточных автоматов по правилам 30 и 90 (шаг 1 к 15)

Ветвление сигнала — это особый элемент в структуре СА-программирования, позволяющий разделить один входной сигнал на несколько независимых выходных потоков, направляемых в разные части решётчатой структуры. Это ключевой элемент для построения сложных вычислительных схем (аналогов логических вентилях, маршрутизаторов, процессоров) в дискретных пространственно-распределённых системах. Замыкание строки в клеточных автоматах — это способ обработки граничных условий, при котором крайние ячейки строки «соединяются», образуя замкнутую структуру (аналог кольца или тора в одномерном случае). Это устраняет «крайние эффекты» и позволяет сигналу циркулировать бесконечно. Ниже приведён пример топологии правил по шагу 1 к 15.

В одномерных клеточных автоматах с диапазоном равным (=1) и только двумя состояниями имеются восемь соседствующих объектов, которые сопоставляются со значениями (1,0), что в общей сложности предполагает

256 возможных правил (чёрное = 1, белое = 0). Эволюция 256 элементарных правил закономерна коду Вольфрама⁴⁸, когда для любого клеточного автомата в момент t_0 чёрной является только средняя ячейка. Важно отметить, что даже если правило относится к классу 4, это не даёт основание, что оно будет вызывать сложное поведение, начиная с любой возможной конфигурации, здесь уместно вспомнить про правило 54⁴⁹. Принцип работы:

⁴⁸ Прим. автора. Код Вольфрама — это инструкция, которая присваивает каждой клетке идентификационный номер, например белое поле «0», чёрное поле «1», при этом нижняя строка читается как двоичное число «01011010», для его преобразования в десятичную систему необходимо воспользоваться одним из порядковых названий правил, которое применяется для синтеза, всего их 256.

⁴⁹ Прим. автора. Правило 54 — это одно из правил классических одномерных клеточных автоматов, оно относится к семейству правил, которые были классифицированы в рамках системы Конвея* — таблицы правил для одномерных автоматов с двоичным состоянием. Эти правила характеризуют изменение состоя-

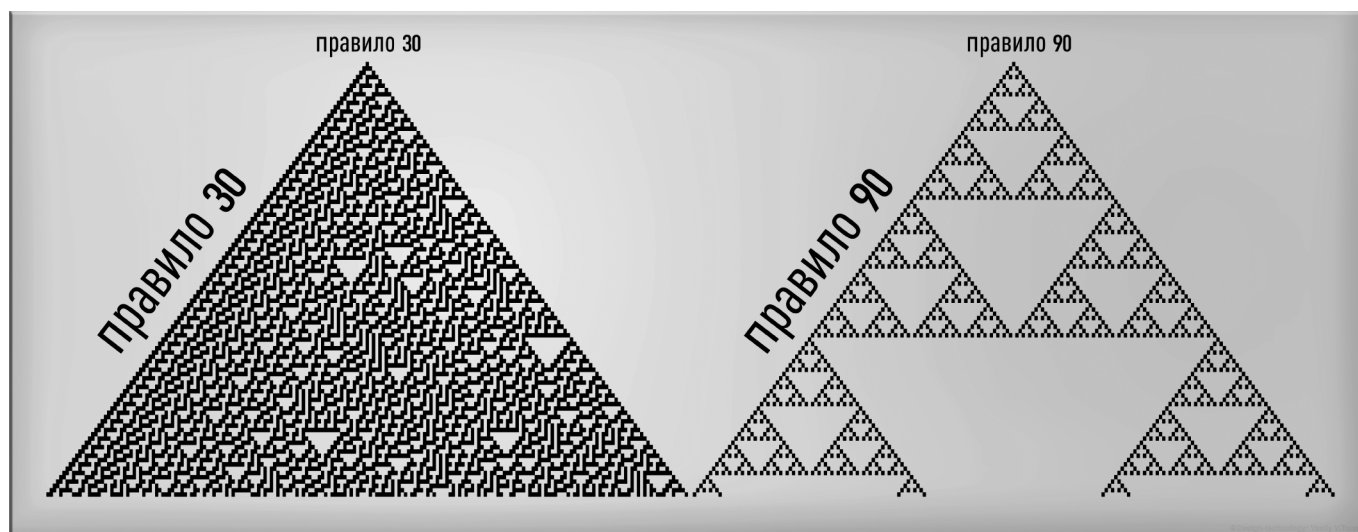


Рис. 6. Демонстрация построения клеточного автомата по правилам 30 и 90, (Шаг 100)

$new_state = (left \wedge center \wedge \neg right) \vee (\neg left \wedge center) \vee (center \wedge \neg right) \vee (\neg left \wedge \neg center \wedge right)$.

- 1) left — состояние левой соседней ячейки.
 - 2) center — текущее состояние центральной ячейки.
 - 3) right — состояние правой соседней ячейки.
- 1) $\downarrow \rightarrow$ 2) $\downarrow \rightarrow$ 3) \downarrow —
- 1) \neg — отрицание (NOT).
 - 2) \wedge — логическое «И» (AND).
 - 3) \vee — логическое «ИЛИ» (OR).

Первая часть $(left \wedge center \wedge \neg right)$ даёт 1, если left = 1, center = 1, right = 0.

Вторая часть $(\neg left \wedge center)$ даёт 1, если left = 0, center = 1 (независимо от right).

Третья часть $(center \wedge \neg right)$ даёт 1, если center = 1, right = 0 (независимо от left).

Четвёртая часть $(\neg left \wedge \neg center \wedge right)$ даёт 1, если left = 0, center = 0, right = 1.

Общее выражение истинно (*результат* = 1), если истинна, хотя бы одна из частей.

ния ячейки в зависимости от её текущего положения и локализации соседей.

* John Horton Conway — британско-американский математик, внёсший весомый вклад в различные области математики, включая теорию групп, теорию чисел, комбинаторную теорию игр и клеточные автоматы. Широкую известность получил как создатель Игры Жизни (англ. Game of Life) — *клеточного автомата*, моделирующего развитие шаблонов на сетке по простым правилам, которая стала классическим примером в изучении сложности, эмерджентности и возникающего поведения. Он предложил систему классификации правил для одномерных клеточных автоматов, которая получила название системы Конвея, она помогает охарактеризовать поведение различных клеточных автоматов. Его исследования оказали значительное влияние на теорию сложности, моделирование самоорганизации и другие области математики и компьютерных наук (информатики).

Чуть выше (рисунок № 6) можно увидеть построение одномерного клеточного автомата по правилу 30 и 90 (Шаг 100).

Построение рисунков (клеточных автоматов) осуществлялось автором в программе Wolfram Mathematica, на языке Wolfram. Координаты построения были следующие⁵⁰:

Таблица 3.

Координаты вариативного построения клеточных автоматов по указанным в таблице правилам

Правило 30	Правило 90
Алгебраическая форма конструкции	
$(p, q, r) \mapsto (p + q + r + q r) \bmod 2$	$(p, q, r) \mapsto (p + r) \bmod 2$
Форма булевых значений	
$(p, q, r) \mapsto p \text{ XOR } (q \text{ OR } r)$	$(p, q, r) \mapsto p \text{ XOR } r$
Текстовая форма	
$(p, q, r) \mapsto p \underline{\vee} (q \vee r)$	$(p, q, r) \mapsto p \underline{\vee} r$

Правило 30 представляет особый интерес, поскольку оно хаотично. Это правило любопытно тем, что оно взято за основу в качестве генератора случайных чисел, используемого для больших целых чисел в Wolfram Mathematica*. Ниже представлен рисунок № 7, на котором проиллюстрирован характер действий⁵¹ и аргументов состояний с примером определения функции перехода по правилу 30.

⁵⁰ Прим. автора. Для точности воспроизведения эксперимента приводим три формы ключей построения: простая алгебраическая форма, форма записи булевых значений, текстовая форма.

⁵¹ Прим. автора. Код на языке программирования Nuquist, предложенный Энн Льюис.

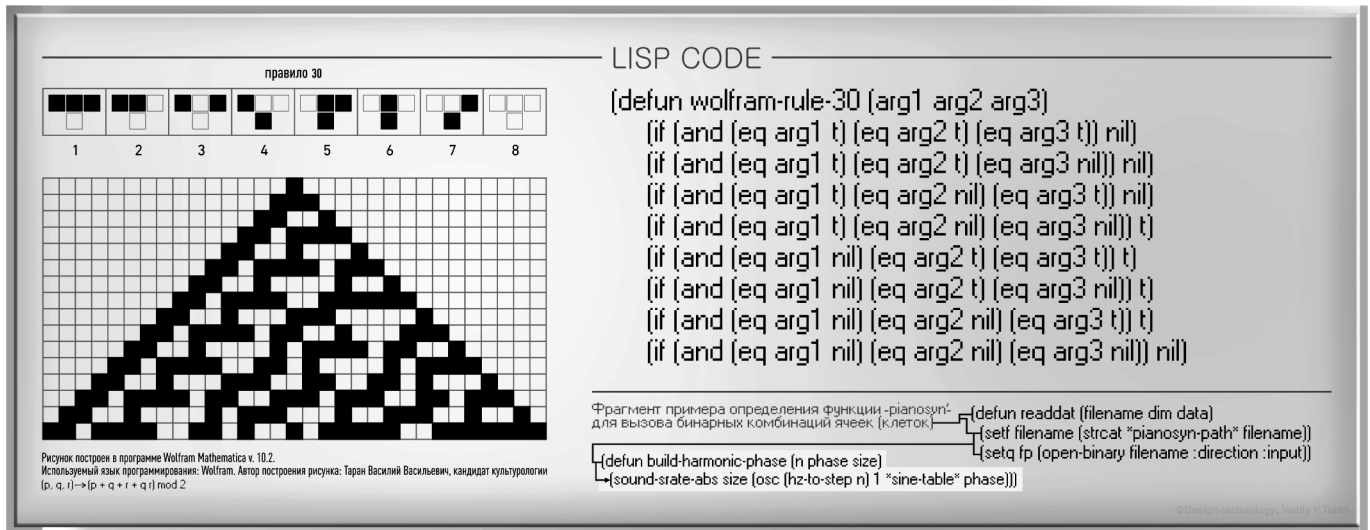


Рис. 7. Характер действий ячеек клеточного автомата по правилу 30 с фрагментом определения функции «pianosyn»

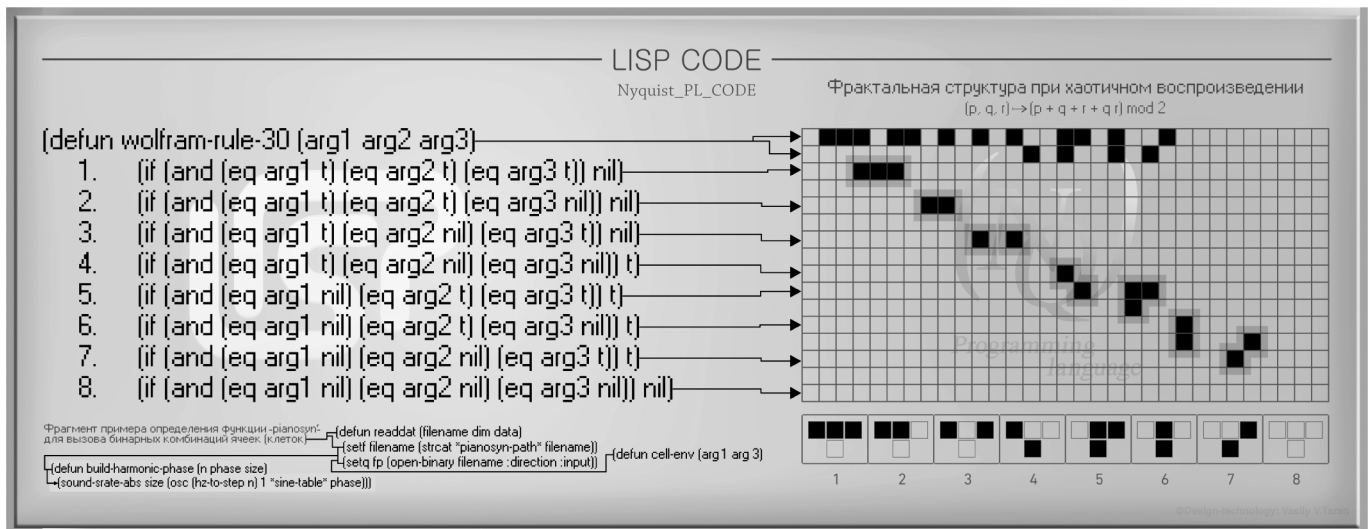


Рис. 8. Строковые параметры положения ячеек с тремя аргументами в условиях одномерности переходов из одного состояния в другое в границах локального цикла итерации

На рисунке № 7 показана универсальная форма программного кода, реализующая базовые переходы элементов на сетке по правилу 30. Такая форма успешно применима и в Nyquist-программировании и в традиционном LISP. Код реализует правило для клеточного автомата, известное как *правило* Вольфрама 30 (Rule 30). Он принимает три аргумента (arg1, arg2, arg3), каждый из которых представляет состояние соседних клеток (например, в предыдущем шаге), где t означает «истина» (или «заполнена», «активна»), а nil — «ложь» (или «пустая», «не активна»). Код проверяет все возможные комбинации состояний трёх соседних клеток и возвращает t или nil, основываясь на регламентах правила 30. Если все три клетки активны (t t t), возвращается nil. Если активны две клетки и третья — nil, возвращается nil. Если первая активна, а остальные — nil, возвращается t. Если первая — nil, вторая — активна, третья — активна, возвращается t. Если первая — nil, вторая — активна, тре-

тья — nil, возвращается t. Если первая — nil, вторая — nil, третья — активна, возвращается t. Если все три — nil, возвращается nil.

Таблица 4.

Сопоставление состояний ячеек в период перехода

Предыдущие три соседние ячейки	Новое состояние ячеек
1. t t t	nil
2. t t nil	nil
3. t nil t	nil
4. t nil nil	t
5. nil t t	t
6. nil t nil	t
7. nil nil t	t
8. nil nil nil	nil

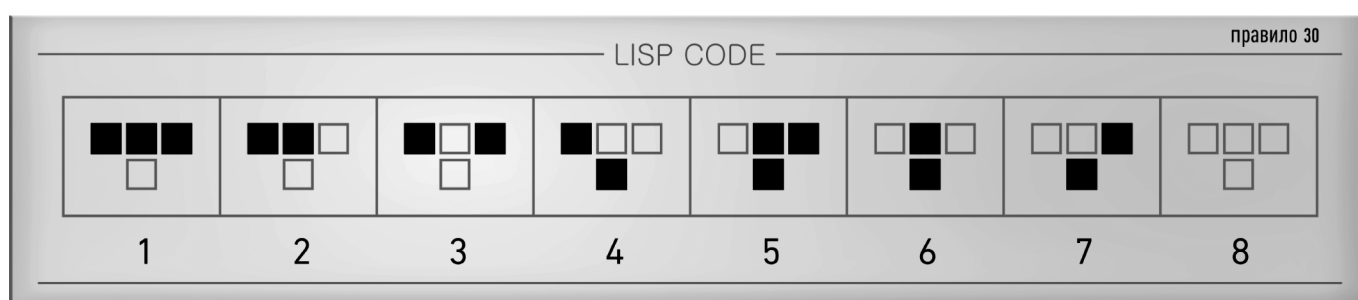
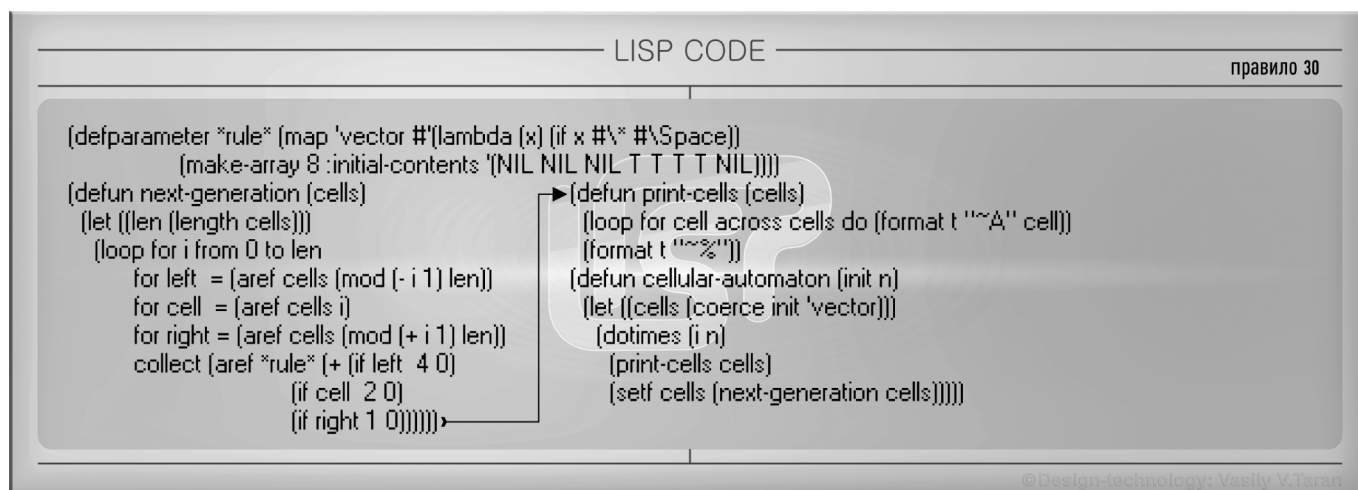


Рис. 9. Структура кода, демонстрирующая полноценную работу клеточного автомата

На предыдущей странице следует более детальный векторный разбор функционирования клеточного автомата (строковые параметры) по правилу 30 в условиях одномерности переходов из одного состояния в другое в рамках *локального* цикла итерации⁵² (рис. 8).

Выше показана генеративная⁵³ структура кода, формирующая полноценный одномерный клеточный автомат по правилу 30 (рисунок № 9).

Это одномерный клеточный автомат⁵⁴, основанный на правилах, заданных в виде массива и функции для эволюции и отображения его состояния.

⁵² Прим. автора. В информатике (теории компьютерных наук) под локальным циклом итерации понимают конструкцию цикла, которая позволяет выполнять блок кода многократно, пока выполняется определённое условие или процесс обучения нейросети, состоящий из множества повторений.

⁵³ Прим. автора. Под генеративной структурой кода понимается набор символично-арифметических логических инструкций, формирующих тело клеточного автомата. Тело клеточного автомата, функционирующее по правилу 30, показанное на рисунке №8, исполнено на языке LISP, однако эта структура также хорошо интерпретируема одним из его расширенных диалектов Nyquist.

⁵⁴ Прим. автора. Этот код реализует одномерный автомат по правилам, заданным в **rule**, и отображает его эволюцию на экране. Если хотите запустить автомат, нужно передать начальную строку из символов *#** и *#\Space*, например: `(cellular-automaton «# * * * #» 10)`, где начальное состояние — строка из звездочек и пробелов, и автомат будет эволюционировать 10 шагов.

Переменная rule:*

```

(defparameter *rule* (map 'vector #'(lambda (x) (if x #\* #\Space))
  (make-array 8 :initial-contents '(NIL NIL NIL T T T T NIL))))
  
```

Создает вектор **rule**, длиной 8, где каждая позиция соответствует одному из возможных трёхбитных сочетаний соседних клеток. Вектор содержит символы: *#** (звёздочка) и *#\Space* (пробел). Начальное содержимое — (NIL NIL NIL T T T T NIL). Функция *map* применяет *лямбда-функцию* к каждому элементу массива, заменяя NIL на пробел, T на звездочку, таким образом, создавая визуальные символы для отображения.

Функция next-generation:

```

(defun next-generation (cells)
  (let ((len (length cells)))
    (loop for i from 0 to len55
      for left = (aref cells (mod (- i 1) len))
      for cell = (aref cells i)
      for right = (aref cells (mod (+ i 1) len))
      collect (aref *rule* (+ (if left 4 0)
        (if cell 2 0)
        (if right 1 0))))))
  )
  
```

⁵⁵ Прим. автора. Обратите внимание, что цикл идёт от 0 до len, что создает len+1 элементов, возможно, это ошибка, обычно цикл идет до len-1. Но в данном случае, так как используются циклические соседние элементы, это не критично, однако, лучше было бы использовать 0 to (1 - len).

Принимает текущий массив `cells`. Для каждого элемента по индексу `i` берет значение текущей клетки, её левого и правого соседа (по модулю для цикличности). Определяет индекс правила, суммируя значения: `left` (умноженное на 4), `cell` (на 2) и `right` (на 1). Находит новое состояние клетки из `*rule*` по полученному индексу.

```
Функция print-cells:
(defun print-cells (cells)
(loop for cell across cells do (format t «~A» cell))
(format t «~%»))
```

Выводит текущие состояния клеток в виде последовательности символов (звездочек и пробелов).

```
Функция cellular-automaton:
(defun cellular-automaton (init n)
(let ((cells (coerce init 'vector)))
(dotimes (i n)
(print-cells cells)
(setf cells (next-generation cells))))))
```

Инициализирует автомат начальным состоянием `init` (строкой или списком символов), преобразуя его в вектор. Выполняет `n` итераций: выводит состояние и вычисляет ближайший вектор дальнейшего перемещения.

Правило 90, иллюстрируемое рисунком №3 (справа), также представляет интерес, поскольку именно оно генерирует фрактальные структуры. Логика этого правила такова — вычисление вероятности состояния центральной ячейки:

$$\text{new_state} = \text{left} \oplus \text{right}$$

где: `left` — состояние левой соседней ячейки, `right` — состояние правой соседней ячейки, \oplus — операция XOR (результат равен 1, если входы различаются; 0 — если одинаковы).

- 1) Берём состояния левого и правого соседей.
- 2) Применяем XOR: если соседи разные (0 и 1 или 1 и 0), результат = 1; если одинаковые (0 и 0 или 1 и 1), результат = 0.
- 3) Полученное значение становится новым состоянием центральной ячейки.

Для генерации фрактала (треугольник Серпинского)⁵⁶ можно применить следующий код:

⁵⁶ Прим. автора. Данный код на языке LISP реализует построение координат треугольников для фрактала Серпинского. Он принимает начальные координаты треугольника (`x1, y1`), (`x2, y2`), (`x3, y3`), глубину рекурсии (`depth`) и список результатов (`result`). На каждом шаге, если глубина равна нулю, он добавляет текущий треугольник в результат. Иначе он делит текущий треугольник на 3 меньших, вычисляя середины сторон, и рекурсивно вызывает себя для каждого из них, уменьшая глубину на 1. Чтобы построить треугольник Серпинского по этому коду, нужно вызвать функцию с начальными координатами большого треугольника и нужной глубиной рекурсии. Например: `(serpinski-coords 0 0 100 0 50 86.6 4 '0)`. Где (0,0), (100,0), (50,86.6) — вершины равностороннего треугольника. Глубина 4 даст достаточно подробную фигуру.

```
(defun sierpinski-coords (x1 y1 x2 y2 x3 y3 depth result)
;; Возвращение списка координат треугольников
(if (zerop depth)
(push (list x1 y1 x2 y2 x3 y3) result)
(let* ((mid1x (/ (+ x1 x2) 2.0))
(mid1y (/ (+ y1 y2) 2.0))
(mid2x (/ (+ x2 x3) 2.0))
(mid2y (/ (+ y2 y3) 2.0))
(mid3x (/ (+ x3 x1) 2.0))
(mid3y (/ (+ y3 y1) 2.0)))
(sierpinski-coords x1 y1 mid1x mid1y mid3x mid3y (1—
depth) result)
(sierpinski-coords mid1x mid1y x2 y2 mid2x mid2y (1—
depth) result)
(sierpinski-coords mid3x mid3y mid2x mid2y x3 y3 (1—
depth) result)))
```

```
;; Пример вызова
(let ((triangles (sierpinski-coords 100 100 300 100 200
300 4 nil)))
(format t «Сгенерировано ~d треугольников~%»
(length triangles)))
```

После данной процедуры звук будет выглядеть как набор фракталов с топологией структуры по треугольнику Серпинского. Ниже на рисунке № 10 представлена топология распределения звуковых данных по треугольнику Серпинского (*фрактальная структура*).

*Базовые операции в структуре программного кода (схематично)*⁵⁷:

`Defparametr`⁵⁸ — объявляет и инициализирует динамическую переменную на верхней строке (заголовка) программы. `Map` — функция применения заданной операции ко всем элементам коллекции (обычно списка), с получением новой коллекции результатов. `Vector` — создаёт одномерный массив. `Lambda` — это специаль-

⁵⁷ Прим. автора. Функции, операторы и другие *составные части программного кода* (вне кодовой нотации) по статье пишутся с *заглавных букв*, в коде (язык LISP) используется строго строчный регистр (за исключением правил оговоренных в прологе программы). Непечатные *кавычки* используются только в параметрах программного кода. Расширения файлов и *логические взаимосвязи* указаны курсивом.

⁵⁸ Прим. автора. `Nyquist` реализует лишь подмножество LISP с акцентом на аудиообработку. В `Nyquist` для объявления глобальных переменных используются: `defvar` — объявляет глобальную переменную и инициализирует её, если она ещё не определена. Например, для установления частоты дискретизации в аудиопотоке конструкция будет выглядеть следующим образом: `(defvar *sample-rate* 44100 «Частота дискретизации по умолчанию»)`. Аналогично возможна операция присваивания через `setf`. Можно объявить глобальную переменную напрямую (но без защиты от повторного определения): `(setf *gain* 0.8)`. В сценариях для `Audacity` глобальные переменные сохраняются между вызовами.



Рис. 10. Топология распределения звуковых данных по треугольнику Серпинского (фрактальная структура)

ный оператор для создания безымянных (анонимных) функций. Он основан на *лямбда*-исчислении Чёрча и позволяет определять функции прямо в месте их использования, без присвоения имени. `Defun` — определяет новую функцию. `Let` — используется для создания локальных переменных и присвоения им значений в рамках определенного блока кода. `Loop` — задаёт организацию циклов и повторяющихся операций. Это ключевой параметр (keyword argument) функции `make-array`, который позволяет задать начальное содержимое создаваемого массива. При вызове `make-array` параметр `:initial-contents` принимает в качестве значения список (или вложенные списки), которые определяют начальные элементы массива. Структура передаваемого списка должна соответствовать размерности создаваемого массива. В языке программирования Nyquist параметр `:initial-contents` используется в функции `make-array` для задания начальных значений элементов создаваемого массива. Далее построение массивов:

Двумерный массив (2×2):

```
(setf matrix (make-array '(2 2)
:initial-contents '((1 2) (3 4))))
;; Результат: #2A((1 2) (3 4))
```

Одномерный массив:

```
setf arr (make-array 4 :initial-contents '(10 20 30 40))
;; Результат: #(10 20 30 40)
```

Трёхмерный массив (2×2×2):

```
(setf cube (make-array '(2 2 2)
:initial-contents '(((1 2) (3 4))
((5 6) (7 8)))))
;; Результат: #3A(((1 2) (3 4)) ((5 6) (7 8)))
```

`Collect` — на языке LISP (в контексте макроса `iterate` или аналогичных расширений) — это специальная конструкция для накопления элементов в коллекцию (обычно в список) во время итерации. `Collect` позволяет в цикле собирать результаты вычислений в список: на каждой итерации значение выражения добавляется в результирующий список, который возвращается после

завершения цикла. Ниже приведена программная структура клеточного автомата по правилу 90 (рисунок №11).

В графическом виде эволюции развития клеточных автоматов по правилам 30 и 90 будут выглядеть следующим образом (рисунок № 12), синтезируемая волновая структура будет развиваться в зависимости от представленной на этом рисунке топологии, конечная волновая форма (см. рисунок №14).

Вместо `B1 = 1`, указывающего на то, что ячейка должна быть окрашена в черный цвет и `B1 = 0`, указывающего на то, что ячейка должна быть окрашена в белый цвет, в музыкальной модели это будет соответствовать *включению и выключению* определенных звуковых объектов. Например, мы имеем массив осцилляторов⁵⁹:

Osc 60 — Osc 65 — Osc 67 — Osc 70 — Osc 75 —
 Osc 76 — Osc 79

Если «включены» только 1-й и 3-й элементы, это приведет к аккорду (сумма (Osc 60) (Osc 67)). Таким образом, каждый массив или уровень автоматов будет соответствовать аккорду, и последовательность аккордов будет меняться с течением времени по мере развития автоматов. Эта функция весьма универсальна, поэтому пользователь может указать базовый звуковой массив⁶⁰,

⁵⁹ Прим. автора. Вызываем одномерный массив состояний, каждое из которых может быть либо 0, либо 1. Музыкальная аналогия для этой идеи такова — вместо ряда состояний у нас есть массив звуков. Если состояние имеет значение 1, то этот звук «включён», если 0 — то он «выключен». Кроме того, предположим, что вы выбрали какой-то метод, с помощью которого можете комбинировать включённые звуки. Примером будет являться тот же массив осцилляторов: Osc 60 — Osc 65 — Osc 67 — Osc 70 — Osc 75 — Osc 76 — Osc 79. В данном случае, мы имеем элементарный набор звуков. В этой музыкальной структуре клеточных автоматов мы выбираем комбинирующую функцию, чтобы было SUM, ради простоты. Теперь, если включить состояния 2,3 и 6, мы получим звук Nyquist (sum (sc 65) (sc 67) (sc 76)), который является всего лишь простым аккордом. Эволюция этого автомата будет представлять собой последовательное развитие аккордов.

⁶⁰ Звуковые массивы — это просто массивы осцилляторов. В выборках используется фрактальное правило Вольфрама (90)

```

LISP CODE
правило 90

(defparameter *cells* '(0 0 0 1 0 0 0))
(defun rule-90 (left center right)
  (if (eql (logxor left right) 1) 1 0))
(defun next-gen (cells)
  (let ((extended-cells (append '(0) cells '(0))))
    (map 'list (function rule-90)
         (butlast extended-cells)
         (cdr (butlast extended-cells))
         (caddr extended-cells))))
(defun cellular-automaton-90 (num-generations)
  (let ((cells *cells*))
    (dotimes (i num-generations)
      (setq cells (next-gen cells)))
    (print (cellular-automaton-90 5))
  )
)
    
```

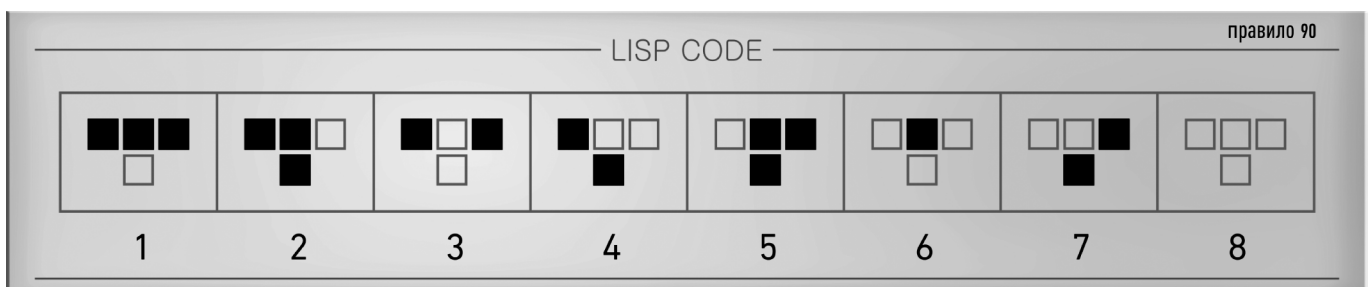


Рис. 11. Структура программного кода по клеточному автомату в соответствии с *правилом 90*

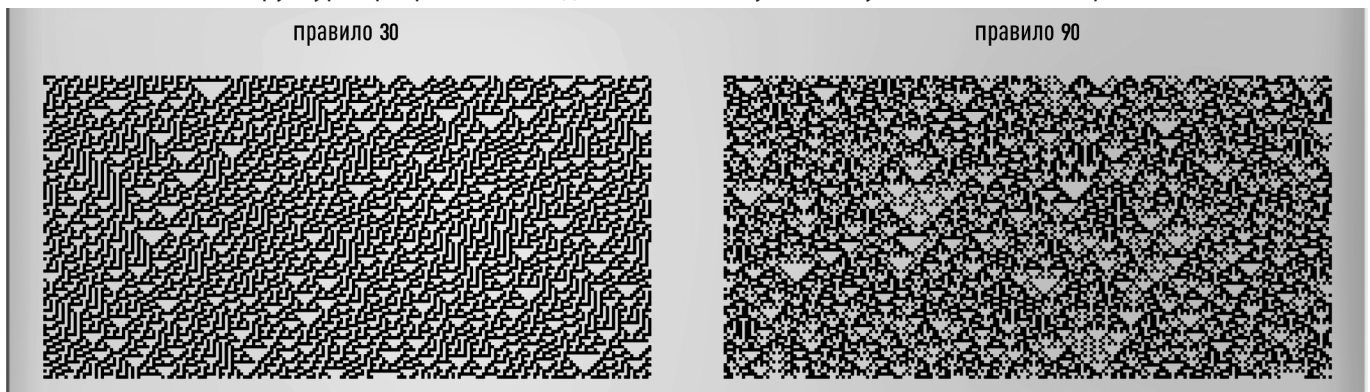


Рис. 12. Эволюция развития клеточного автомата слева по *правилу 30*, справа по *правилу 90*

продолжительность каждого шага, а также какую комбинирующую функцию необходимо использовать для объединения активированных звуков вместе. Эта схема позволяет пользователю применить любое выражение для создания звуков. На примере, указанном выше (рисунок № 8) реализована модель одномерного (элементарного) клеточного автомата⁶¹ (работающего по правилу 30) ко-

и хаотическое правило Вольфрама (30). Объединяющая функция — это просто SUM.

⁶¹ Прим. автора. Элементарные клеточные автоматы — это простейший класс одномерных клеточных автоматов. Элементарные клеточные автоматы имеют два возможных значения для каждой ячейки (0 или 1) и правила, зависящие только от родительских и соседних родительских значений. Эволюция элементарного клеточного автомата может быть полностью описана двумерной таблицей, где запись (i, j) соответствует состоянию j в поколении i. Так как есть $2 \times 2 = 2^2 = 4$ возможных бинарных состояний для

который может быть привязан к любому массиву звуков, использующему любую комбинирующую функцию на активированных звуках. Для этого используется функция cell-aut (cell-aut.lsp), которая включает набор следующих параметров:

- 1) Массив звуковых объектов, задаваемых с помощью вычисляемых выражений.
- 2) Длительность каждого временного шага (также длительность вычисления звуковых объектов).
- 3) Правило обновления для использования при эволюции массива, заданное числом (0 — 255).
- 4) Число итераций/поколений автоматов должно позволять себе расти.

трёх ячеек, соседних с данной ячейкой, имеется в общей сложности $2^3 = 8$ элементарных клеточных автоматов.

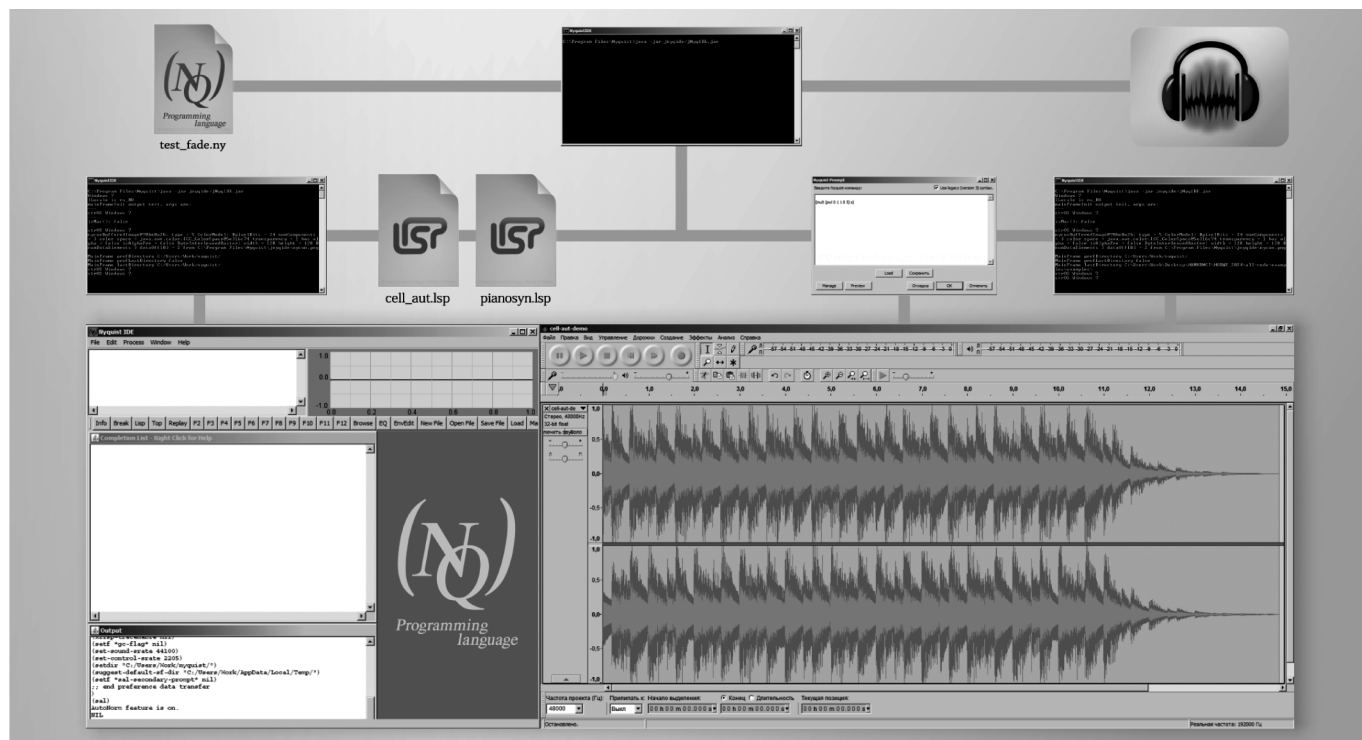


Рис. 13. Схема функционирования программного комплекса Audacity® с возможностью имитации клеточных автоматов для работы со звуком

Пример комбинирующей функции

(cell-aut <num iterations> <combining function>
<sound list> <update rule>)

Расширения cell-aut.lsp и pianosyn.lsp подключаются к NyquistIDE и взаимодействуют с редактором Audacity®, это открывает большие возможности для интерфейсно-ориентированного редактирования синтезированного аудиоматериала и позволяет на уровне отдельных программных фрагментов кода манипулировать сигналом внутри аудиоредактора посредством приглашения NyquistPrompt.

Расширение cell-aut.lsp включает в себя функцию cell-aut-demo для проверки алгоритма элементарного клеточного автомата с возможностью захвата простого сигнала из pianosyn.lsp⁶², она определяется следующим образом:

```
(defun cell-aut-demo ()
  (play (scale 0.5 (cell-aut (cell-aut-major-scale) 0.2 30 80))))
```

⁶² Прим. автора. Демонстрация работы алгоритма элементарного клеточного автомата в качестве представления синтеза в виде звуков фортепьяно. pianosyn.lsp — подключаемая библиотека, входящая в пакет Nyquist, содержащая нотации звуков фортепьяно, а также некоторые алгоритмические функции, описанные на языке LISP и адаптированные под функциональный стиль Nyquist.

Выполнение данной функции обеспечит вывод аудиосигнала и даст возможность прослушать результат образца функции автоморфизма ячейки. Эксперимент показал, что выбранное правило CA — 30 успешно производит хаотичный синтез парных слоёв (eq arg1 t) (eq arg2 t), нотированных расширением pianosyn.lsp, физическим результатом эксперимента служит короткий отрывок аудиокomпозиции с эмуляцией клавиш фортепьяно выведенных для дальнейшего волнового и спектрально-редактирования в редактор Audacity®.

Поскольку автоматы различаются по своей эволюции или правилам обновления строк, вы можете указать автомат, который хотите использовать, просто указав правило обновления.

Правило обновления (<update rule>) — это просто функция, которая принимает 3 (t/nil) значения и возвращает t или nil. Три входных значения будут факторами зависимости ячейки, а выходные — положением текущей ячейки. Пример подобной записи с аргументами представлен на рисунке № 7.

Разобравшись с итерацией, комбинирующей функцией и правилами обновления можно подытожить всё вышеизложенное следующим мультиблоковым алгоритмом, демонстрирующим общую работу клеточных автоматов в Nyquist-программе (рисунок №14). Фактически, это финальная универсальная схема базового алгоритма клеточных автоматов вне зависимости от вариатив-

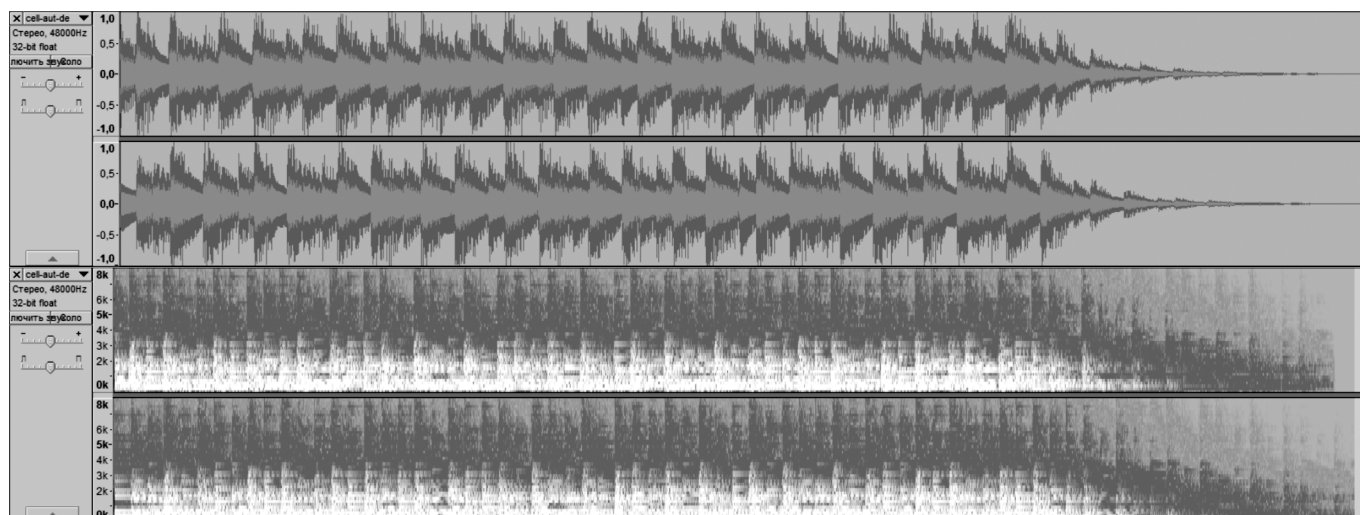


Рис. 14. Результат воспроизведения эксперимента Данненберга-Льюис*. *Звуковая форма в волновом и спектральном представлении, отображаемая в Audacity® и характеризующая звучание фортепианных клавиш через призму *правила 30* клеточных автоматов

ности правил и используемых языков программирования, которая может использоваться в качестве полезной модели для реализации мультитональных вариаций аудиальных структур на основе инвариантного синтеза в соответствии с использованием выбранных оператором правил.

Блок-схема иллюстрирует функциональную работу (*унификация/обработка*) элементарных клеточных автоматов применительно к аудиосигналу. Цикл *ввода/вывода* звука осуществляется через NyquistIDE с экспортом в Audacity® и возможностью дальнейшей коррекции звуковой формы непосредственно в редакторе через приглашение языка Nyquist. Тема *связки* библиотечных расширений «cell-aut.lsp» и «pianosyn.lsp» с целью воспроизведения алогитмически-комбинаторных аудиосигналов будет рассматриваться автором в дальнейших публикациях.

Заключение

Итак, мы рассмотрели с позиций научного анализа практическую возможность реализации алгоритма работы элементарных клеточных автоматов в соответствии с использованием *вариативных* правил перехода, характеризующих *состояние* и *поведение* клеток на сетчатом холсте для производства новых синтетических звуков и синтезированных аудиопартий однородного и неоднородного типа.

Эксперимент Данненберга-Льюис оказался успешно воспроизводим, а некоторые авторские уточнения и комментарии, соответствующие настоящему времени, позволяют расширить представления о методе синтеза, осно-

ванного на переменности правил клеточных автоматов.

Принцип работы клеточных автоматов можно успешно использовать в качестве метода генерации различной музыкальной фактуры, такой как алгоритмическая текстура, атональные мелодии, синтетические фонограммы, мультитональные симфонии.

В аудиоинформатике клеточные автоматы следует рассматривать как вид универсального синтеза, позволяющий получить оригинальные результаты за относительно короткий промежуток времени. Аппаратная независимость клеточных автоматов позволяет использовать их в качестве мобильного синтез-генератора в любой вычислительной системе. Эффективность её работы будет определяться не физическими параметрами технической оснастки компьютера, а оригинальными решениями в области подходов к составлению формульных описаний, выраженных в виде точных конструкций с грамотно изложенным синтаксисом, представляющим программно-кодovые предписания для быстрой интерпретации процессором.

Квинтэссенция вышеизложенных положений настоящего заключения позволяет сделать вывод о том, что клеточные автоматы для *аудиоинформатики* и *аудиоинженерии* соответственно, представляют собой питательную почву для научных исследований и прикладных экспериментов, которые, несомненно, в обозримой перспективе будут способствовать многовекторному приращению научных знаний не только в области компьютерных наук (информатики), но и в других точных, а также естественнонаучных дисциплинах.

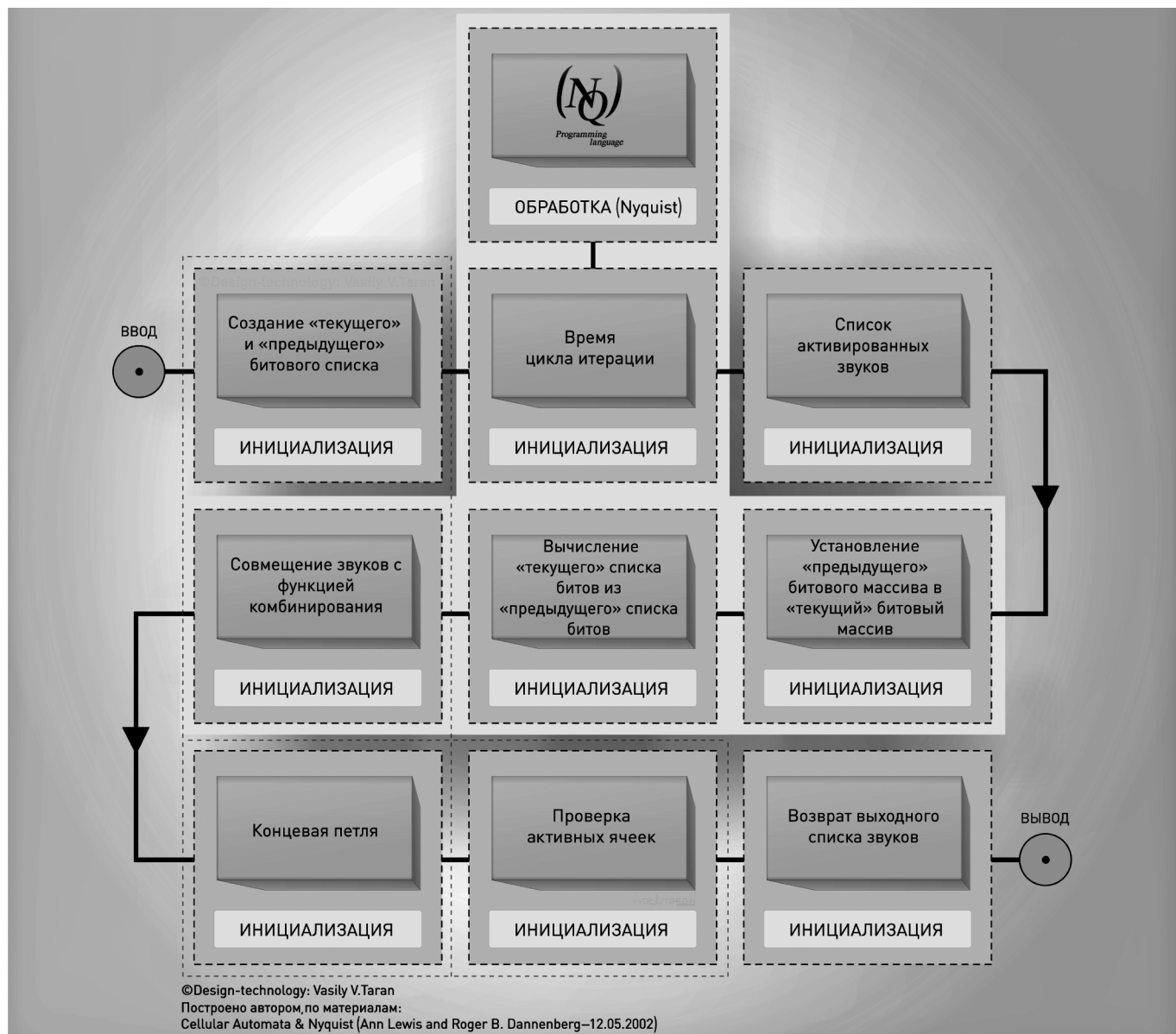


Рис. 15. Универсальная алгоритмическая блок-схема общей Nyquist-программы, иллюстрирующая общие принципы функционирования клеточных автоматов

ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерная программа Nyquist IDE v.3.15 / Файл директории (C:\Users\Name\nyquist) // OS: MS Windows, GNU Linux /// Полная реализация — Jesse Clark, David Hovard, David Movatt, David Deangelis, Roger B. Dannenberg. — 2002–2018. [Электронный источник, автономная компьютерная программа].
2. Компьютерная программа Audacity® v.2.1.3 / Файл директории (C:\Program Files (x86)\Audacity) // OS: MS Windows, GNU Linux /// Полная реализация — Gale Andrews, Arturo «Buanzo», James Crook, Roger B. Dannenberg, Steve Daulton, Vaughan Johnson, Greg Kozikowski, Paul Licameli, Peter Sampson, Martyn Shaw, Bill Wharrie. — 1999–2017. [Электронный источник, автономная компьютерная программа].
3. Официальный сайт редактора Audacity® — [Электронный WEB-ресурс, дата обращения к источнику: 25.01.2026].
4. Таран В.В. Компьютерный аудиосинтез штатными средствами Audacity® с возможностью имитационного дизайн-моделирования на языке Nyquist/ В.В. Таран// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки — 2020. — №1. — С.115–129. [ISSN 2223-2966].
5. Таран В.В. Язык программирования Nyquist: настоящее время и перспективы его развития в области компьютерной аудиоинженерии и аудиоинформатики / В.В. Таран// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки — 2020. — №4. — С.135–153. [ISSN 2223-2966]. (DOI 10.37882/2223–2966.2020.04.37).

⁶³ Прим. автора. Вместо языка программирования Nyquist (LISP) можно использовать любой другой язык программирования для реализации подобных экспериментов. Использование именно языка Nyquist обуславливается его практической ориентированностью на выполнение операций именно с аудиоданными. Об этом много сказано в начале статьи.

6. Touretzky, David S. Common LISP: a gentle introduction to symbolic computation /Carnegie Mellon University///Copyright (c) 1990 by Symbolic Technology, Ltd.//// Published by The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. — 587 p. (ISBN0-8053-0492-4).
7. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 3.24 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science / Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 05.03. 2025, 289 p.
8. Electronic repository of projects in the Nyquist programming language at Carnegie Mellon University. — Cellular Automata, 12.05.2002. (электронный WEB-ресурс: <https://www.cs.cmu.edu/~music/nyquist/extensions/cellautomata/cellularautomata.html>; дата обращения к ресурсу: 25.01.2026)
9. Wolfram, S. A New Kind of Science. — Champaign: Wolfram Media, 2002. — 1197 p.
10. Von Neumann, J., Burks, A.W. Theory of Self-Reproducing Automata. — Urbana and London: University of Illinois Press, 1966. — 388 p.
11. Toffoli, T., Margolus, N. Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling. — Cambridge: MIT Press, 1987. — 259 p.
12. Kari, J. Theory of Cellular Automata: A Survey // Theoretical Computer Science. — 2005. — Vol. 334, № 1-3. — P. 3–33.
13. Gardner, M. The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game «Life» / M. Gardner // Scientific American. — 1970. — Vol. 223, № 4. — P. 120–123.

© Таран Василий Васильевич (allscience@lenta.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ

RESOURCE MANAGEMENT IN FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS BASED ON A DIGITAL BUSINESS PROCESS MANAGEMENT PLATFORM

A. Trishin

Summary. The paper considers resource management mechanisms for flexible manufacturing systems based on a corporate digital business process management platform. It is shown how task management, workflow automation, notification mechanisms, and application programming interfaces can be used to support dispatching, monitor resource availability, and collect actual execution data. Requirements for data and interfaces within the «ERP/MES — dispatching layer — corporate platform» framework are analyzed. Recommendations for the formation of key performance indicators, visualization, and escalation procedures are provided, and implementation limitations and risks are discussed.

Keywords: flexible manufacturing systems, resource management, dispatching, digital platform, business process management, KPI, integration, API.

Тришин Антон Константинович

Аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»
Anton.trishin.98@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены механизмы управления ресурсами гибких производственных систем на основе корпоративной цифровой платформы управления бизнес-процессами. Показано, каким образом инструменты задач, бизнес-процессов, уведомлений и программных интерфейсов могут использоваться для поддержки диспетчеризации, контроля доступности ресурсов и сбора фактических данных исполнения. Проанализированы требования к данным и интерфейсам в контуре «ERP/MES — контур диспетчеризации — корпоративная платформа». Приведены рекомендации по формированию ключевых показателей эффективности, визуализации и регламентов эскалации, а также обсуждены ограничения и риски внедрения.

Ключевые слова: гибкие производственные системы, управление ресурсами, диспетчеризация, цифровая платформа, управление бизнес-процессами, KPI, интеграция, API.

В условиях цифровой трансформации промышленности корпоративные цифровые платформы управления бизнес-процессами рассматриваются как универсальный инструмент организационного и информационного сопровождения управления предприятиями и производственными системами. Это обуславливает актуальность анализа механизмов управления ресурсами гибких производственных систем с использованием таких платформ, позволяющих увязать планирование, фактическое исполнение и управленческие реакции в едином информационном контуре. Для промышленного предприятия гибкость производства означает способность оперативно перераспределять мощности, персонал и вспомогательные ресурсы при изменении ассортимента, сроков и приоритетов заказов. Реализация данной способности невозможна без прозрачной картины доступности ресурсов и своевременных управленческих воздействий на уровне смены и производственного участка [1–3]. Существенная практическая проблема заключается в том, что информация о состоянии ресурсов часто распределена по разроз-

ненным информационным системам и неформальным каналам, что снижает качество диспетчеризации и повышает риск простоев и срывов сроков [4–7].

Современные цифровые платформы управления бизнес-процессами предоставляют инструменты для централизованного управления задачами, регламентами и взаимодействиями, что позволяет использовать их в качестве связующего звена между системами планирования и системами исполнения. Такие платформы обеспечивают формирование и сопровождение производственных заданий, контроль сроков и ответственности, а также сбор фактических данных, необходимых для анализа эффективности использования ресурсов.

Под ресурсом в гибкой производственной системе целесообразно понимать любой ограниченный фактор, необходимый для выполнения операции, включая оборудование и производственные ячейки, инструмент и оснастку, квалифицированный персонал, измерительные средства, транспортно-складскую инфраструктуру,

а также информационные объекты, такие как управляющие программы и технологические данные [1, 2]. Классические задачи производственного расписания формулируются с учетом ресурсных ограничений и технологических предшествований, однако в условиях гибких систем дополнительно учитываются альтернативные маршруты, ограничения на переналадку, группирование операций и стохастические возмущения, связанные с отказами оборудования и дефицитом материалов [4–6].

С практической точки зрения принципиально важно различать плановую и фактическую доступность ресурсов. Плановая доступность определяется календарями, графиками сменности и нормативами, тогда как фактическая доступность формируется под влиянием простоев, аварийных ситуаций и отсутствия персонала. Несовпадение между этими уровнями является основной причиной отклонений, требующих оперативного вмешательства диспетчерской службы. Организационный аспект управления ресурсами связан с закреплением ответственности за подтверждение доступности, фиксацию фактов и принятие решений о перепланировании, что требует формализованных регламентов и цифровой фиксации управленческих действий.

Диспетчеризация и перепланирование в гибких производственных системах (ГПС) отличаются от статического календарного планирования тем, что решения принимаются в условиях неполной информации и динамически изменяющихся ограничений. В исследованиях по динамическому расписанию выделяются событийно-ориентированные стратегии перепланирования, при которых пересчет выполняется при наступлении значимых событий, таких как аварии оборудования, задержки поставок или изменение приоритетов заказов [7]. При этом подчеркивается необходимость сочетания оптимизационных моделей и эвристических методов, поскольку полная оптимизация при каждом событии часто является вычислительно неэффективной для реальных производственных масштабов [3–6].

Эффективность использования ресурсов оценивается на основе системы ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI), включая коэффициенты загрузки оборудования, общую эффективность оборудования (Overall Equipment Effectiveness, OEE), долю простоев по причинам, соблюдение сроков выполнения заказов и показатели производительности труда [9, 14, 15]. Стандарт ISO 22400 задает общую рамку определения таких показателей, обеспечивая унификацию терминологии и сопоставимость данных [9]. Качество первичных данных является критическим фактором достоверности ключевых показателей эффективности, поэтому система управления ресурсами должна включать процессы оперативного сбора фактов, контроля полноты данных и распределения ответственности за их корректность.

Целью настоящей работы является разработка управленческого механизма, обеспечивающего единый реестр ресурсов и их атрибутов, контроль доступности и конфликтов, выпуск и сопровождение производственных заданий, сбор фактических данных исполнения, расчет и визуализацию KPI, а также регламент эскалаций и перепланирования. Информационная реализация такого механизма предполагает интеграцию с источниками мастер-данных, системами управления ресурсами предприятия (Enterprise Resource Planning, ERP) и управления производственными процессами, поддержку событийных уведомлений, хранение истории изменений и наличие программного интерфейса приложения (Application Programming Interface, API) для обмена данными с внешними системами планирования и оптимизации [8, 18]. Методологической основой интеграции служит модель ISA-95, разделяющая уровни планирования, управления операциями и контроля оборудования [8].

В предлагаемой архитектуре корпоративная цифровая платформа управления бизнес-процессами используется как инструмент организационного сопровождения, обеспечивающий координацию участников, фиксацию договоренностей и контроль исполнения регламентов. При этом предполагается, что производственное расписание и технологические расчеты выполняются во внешнем контуре, включающем ERP, систему управления производственными процессами (Manufacturing Execution System, MES), систему синхронного планирования производства (Advanced Planning and Scheduling, APS), а цифровая платформа обеспечивает коммуникацию, эскалации и актуализацию статусов. Такая роль соответствует распространенной практике использования корпоративных платформ для согласований, мониторинга отклонений и взаимодействия между производственными подразделениями и службами управления.

Для управления ресурсами предлагается концепция данных, включающая сущности «Ресурс», «Операция», «Задание», «Смена/календарь», «Событие отклонения», «Простой», «Причина» и «KPI-период». Ресурс характеризуется типом, идентификатором, набором параметров, состоянием доступности и историей состояний. Задание связывает операцию, ресурс и временной интервал и содержит атрибуты приоритета, заказа и контрольных сроков. События отклонений фиксируются как отдельные записи, инициирующие регламент эскалации и возможное перепланирование.

Интеграционное взаимодействие между системами реализуется через программные интерфейсы приложений с использованием архитектурного подхода на ресурсно-ориентированной архитектуре (REST), что обеспечивает двусторонний обмен плановыми и фактическими данными. Для повышения устойчивости реко-

мендуется использование промежуточного интеграционного слоя, отвечающего за трансформацию данных, управление очередями сообщений и журналирование операций [16, 17].

Приоритизация заданий рассматривается как стратегический инструмент управления ресурсами, направленный на максимизацию результата при ограниченных возможностях производства. Выпуск заданий целесообразно организовывать по принципу ограниченного горизонта, что снижает операционную нагрузку и повышает управляемость. Контроль конфликтов ресурсов осуществляется путем сопоставления назначений на пересекающиеся временные интервалы и анализа состояния ресурсов, а при обнаружении конфликтов запускаются регламентированные процедуры согласования и перепланирования.

Сбор фактических данных осуществляется на уровне задач и событий и включает фиксацию состояний выполнения, причин простоев и результатов контроля качества. Расчет KPI выполняется путем сопоставления плановых и фактических показателей с последующей агрегацией по заданным периодам и визуализацией в отчетах и панелях управления. При формировании системы показателей рекомендуется ориентироваться на требования ISO 22400 и практику применения OEE [9, 14, 15].

Ожидаемый эффект от внедрения предлагаемого подхода заключается в снижении времени реакции

на отклонения, уменьшении доли простоев по организационным причинам и повышении дисциплины исполнения регламентов, что на уровне управленческих показателей может проявляться ростом эффективности использования оборудования и увеличением доли заданий, выполненных в срок. К ограничениям подхода относятся зависимость от качества исходных данных, необходимость обучения персонала и то, что цифровая платформа управления бизнес-процессами не заменяет специализированные системы оптимизации расписаний, а выполняет функцию координации и контроля.

В заключение отметим, что предложенный подход позволяет рассматривать управление ресурсами гибких производственных систем (ГПС) как совокупность взаимосвязанных процессов, поддержанных корпоративной цифровой платформой, обеспечивающей интеграцию управленческих и операционных контуров. Научная новизна работы заключается в формализации роли корпоративной цифровой платформы управления бизнес-процессами как самостоятельного инструмента организационно-управленческого уровня в контуре управления ГПС, дополняющего классическую связку ERP/MES/APS. В отличие от известных подходов, акцент сделан не на оптимизационных алгоритмах расписаний, а на регламентированном механизме координации, эскалаций и фиксации управленческих решений, обеспечивающем воспроизводимость и аналитическую интерпретируемость процессов управления ресурсами

ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов В.И. Организационно-технические основы гибкого автоматизированного производства. [Электронный документ]. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/5430/Organizacionno_tekhnicheskie_osnovy.pdf (дата обращения: 04.02.2026).
2. Артамонов В.Д. Технология автоматизированного производства. Тула: ТулГУ, 2012. 312 с. / 6.3 Основные понятия и определения, относящиеся к гибкому производству [Электронный документ]. — URL: <https://studfile.net/preview/12132030/page:28/> (дата обращения: 03.02.2026).
3. Chinnusamy T.R., Karthikeyan T, et al., A Comprehensive Survey of Flexible Manufacturing System Scheduling Using Petri Nets [Электронный документ]. — URL: https://www.researchgate.net/profile/Karthikeyan-t-6/publication/269361603_A_Comprehensive_Survey_of_Flexible_Manufacturing_System_Scheduling_Using_Petri_Nets/links/58876347aca272b7b4522a85/A-Comprehensive-Survey-of-Flexible-Manufacturing-System-Scheduling-Using-Petri-Nets.pdf (дата обращения: 01.02.2026).
4. Basnet C. Scheduling and control of flexible manufacturing systems // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 1994. Vol. 7, No. 5. P. 340–353. [Электронный документ]. — URL: https://archive.org/details/sim_international-journal-computer-integrated-manufacturing_1994_7_contents (дата обращения: 01.02.2026).
5. Novas J. M., Henning G. P. Integrated scheduling of resource-constrained flexible manufacturing systems // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41, Iss. 5. P. 2286–2299. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.026.
6. Błażewicz J., Ecker K.H., Pesch E., Schmidt G., Weglarz J. Scheduling in computer and manufacturing systems. Berlin; Heidelberg: Springer, 1993. 481 p.
7. Ouelhadj D., Petrovic S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems // Journal of Scheduling. 2009. Vol. 12. P. 417–431. [Электронный документ] — URL: <https://akturk.bilkent.edu.tr/ie573/Petrovic.pdf> (дата обращения: 17.12.2025).
8. ANSI/ISA-95.00.03-2005. Enterprise-Control System Integration. Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management. [Электронный документ]. — URL: https://ipc01.sciarium.net/0953/09533366_42D20E90/ansiisa9500032005_enterprisecontrol_system_integration_part.pdf (дата обращения: 03.02.2026).
9. ГОСТ Р ИСО 22400-2–2019. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPI) для управления производственными операциями. Ч. 2. Определения и описания. [Электронный документ]. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725864.pdf> (дата обращения: 01.02.2026).
10. Репин В.В., Елиферов В.Г. Бизнес-процессы: моделирование, анализ, регламентация. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. — 544 с.
11. Кулябов Д.С. Анализ процессов на основе журналов событий. — М.: МАКС Пресс, 2018. — 216 с.

12. Мишин В.М. Процессный подход к управлению организацией. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. — 415 с.
13. Фатхутдинов Р. А. Управленческие решения. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 352 с.
14. Zhu L., Johnsson C., Andersson C. Key performance indicators for manufacturing operations management: gap analysis between industrial needs and ISO 22400 // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 25. P. 82–88. [Электронный документ]. — URL: https://www.academia.edu/attachments/110950992/download_file (дата обращения: 02.02.2026).
15. Алгоритм расчета ОЕЕ как самого универсального и современного показателя эффективности оборудования в мире [Электронный документ]. — URL: <https://up-pro.ru/library/repair/tpm/algorithm-rascheta-oee/> (дата обращения: 04.02.2026).
16. Липаев В.В. Проектирование программных систем. — М.: Радио и связь, 1986. — 296 с.
17. Pautasso C., Zimmermann O., Leymann F. RESTful web services vs. big web services: making the right architectural decision // Proceedings of the 17th International World Wide Web Conference. 2008. P. 805–814. [Электронный документ]. — URL: <https://www.conference.org/wp-content/uploads/2025/01/p805-pautassoA.pdf> (дата обращения: 04.02.2026).
18. 1С: ERP. Управление предприятием [Электронный документ]. — URL: <https://v8.1c.ru/erp/production/> (дата обращения: 18.12.2025).

© Тришин Антон Константинович (Anton.trishin.98@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

METHODS OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND SYSTEM ANALYSIS FOR IMPROVING QUALITY OF PRODUCTION PROCESS MANAGEMENT

S. Tyryshkin
E. Sharlaev

Summary. Combinatorial optimization is universal due to the indivisibility of resources and a limited number of possible solutions. However, its tasks are characterized by high computational complexity and often belong to the class of NP-hard problems. Optimal control of technological processes requires taking into account specifics of information flows and structural features of production systems. Exact methods are often impractical because of exponential growth in computational effort. The study proposes a hybrid approach combining systematic analysis of technological processes with heuristics for searching acceptable solutions within reduced solution spaces. This method enhances management efficiency while maintaining a balance between solution quality and resource consumption.

Keywords: technological process, information, management, combinatorial optimization, solution search, computational complexity.

Тырышкин Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический
университет имени И.И. Ползунова, г. Барнаул
Service.vip-spe@yandex.ru

Шарлаев Евгений Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический
университет имени И.И. Ползунова, г. Барнаул
sharlaev@mail.ru

Аннотация. Комбинаторная оптимизация универсальна благодаря неделимости ресурсов и ограниченному числу возможных решений, однако её задачи характеризуются высокой вычислительной сложностью и часто относятся к классу NP-сложности. Оптимальное управление технологическими процессами требует учета специфики информационных потоков и структурных особенностей производства. Точные методы зачастую неприменимы из-за экспоненциального роста сложности вычислений. Исследование предлагает гибридный подход — сочетание системного анализа технологических процессов и эвристик для поиска приемлемых решений в сокращенном пространстве состояний. Такой метод позволяет повысить эффективность управления производственными системами, сохраняя баланс между качеством решений и ресурсоемкостью вычислений.

Ключевые слова: технологический процесс, информация, управление, комбинаторная оптимизация, поиск решения, вычислительная сложность.

Введение

В последние годы, с быстрым развитием цифровых инноваций, таких как искусственный интеллект, большие данные и Интернет вещей, наступила эра интеллектуальных технологий. Эта эра характеризуется огромным ростом объема данных, значительным увеличением вычислительной мощности и широким применением аналитических платформ [1, 2]. На этом фоне комбинаторные оптимизационные задачи, являющиеся ключевыми вопросами во многих областях, приобретают все большее значение [3].

Существующие методы решения комбинаторных задач оптимизации, такие как симуляционно-оптимизационный подход или метаэвристические алгоритмы, включающие выборку по методу Монте-Карло, значительно увеличивают вычислительную сложность и без того дорогостоящих подходов [4]. Кроме того, они адаптированы к конкретным случаям использования и целям, что

ограничивает их потенциал для внедрения. В реальной производственной практике количество операций, подлежащих обработке, может достигать десятков тысяч, что превышает возможности точной оптимизации даже самых современных решателей. В связи с этим возникает необходимость проведения системного анализа входных информационных потоков для выявления ограничений, накладываемых на математический аппарат принятия решений. Ключевой проблемой в данном случае является несоответствие вычислительных возможностей классических детерминированных алгоритмов стохастической природе и объемам поступающей изменительной информации [5]. Результаты сравнительного анализа факторов, препятствующих прямому применению традиционных методов управления, и количественная оценка параметров информационного обмена представлены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, свидетельствует о наличии критического противоречия между

Таблица 1.

Системный анализ характеристик информационных потоков в процессах комбинаторной оптимизации (составлено автором)

Аспект системного анализа процесса	Характеристика входной информации	Влияние на подсистему обработки информации	Последствия для задачи комбинаторной оптимизации
Стохастичность и зашумленность данных	Отношение сигнал/шум $SNR < 10$ дБ. Доля аномальных выбросов: 5...15 % выборки.	Невозможность прямой подачи «сырых» данных. Требуется фильтрация, снижающая размерность выборки в 10...100 раз.	Точные методы оптимизации расходятся или дают ошибку решения $\delta > 20$ % из-за недовольности входных коэффициентов.
Размерность пространства состояний	Число контролируемых параметров $n \in [103; 105]$. Количество связей между параметрами: $m \approx n^2/2$.	Экспоненциальный рост объема памяти для хранения матрицы состояний (более 16 Гб/с накопленных данных).	Задача переходит в класс NP-трудных. Время поиска глобального экстремума перебором $T \rightarrow \infty$.
Динамика поступления данных	Период дискретизации $\Delta t \leq 10$ мс. Скорость потока событий: > 1000 событий/с.	Дефицит времени на обработку. Допустимая задержка в контуре управления $T_{delay} \leq 50$ мс.	Алгоритм оптимизации должен сходиться за фиксированное число итераций ($k \leq 1000$), иначе решение устаревает до его применения.
Многокритериальность управления	Вектор целевых функций $F = \{f_1, \dots, f_s\}$. Конфликтность критериев (например, энергоёмкость/качество).	Необходимость нормировки разнородных шкал измерения информации перед сверткой.	Поиск не одной точки, а множества Парето (мощность множества 10...50 альтернатив), чтократно увеличивает вычислительную нагрузку.

требованиями к качеству управления и характеристиками входной информации.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к системному анализу, которые позволили бы интегрировать процедуры фильтрации, сжатия и кластеризации информации непосредственно в контур комбинаторной оптимизации.

Анализ публикаций по теме исследования

Перспективы использования машинного обучения для достижения лучшего компромисса между качеством решения и временем выполнения в задачах комбинаторной оптимизации при управлении технологическими процессами рассматривают в своих трудах Xu Guo, Xiaoyu Song, Jian-tao Zhou [6], Кулиев Э.В., Котельва А.В., Семенова М.М., Игнатъева С.В., Кухаренко А.П. [7], Wei-qi Zou, Chao-yang Niu, Wei Liu, Yan-yun Wang, Jia-qí Zhan [8].

Над разработкой стратегии декомпозиции решений на основе скользящего горизонта или операций-узких мест с целью разбиения крупномасштабных задач на более управляемые подзадачи, где ни одна стратегия не доминирует в минимизации опозданий по отношению к срокам, трудятся Адонин Л.С., Владыко А.Г. [9], Elsayed Elsedimy, Fahad Algarni [10], Кобак В.Г., Рязанов А.А. [11], Закирзянов Р.М. [12].

Вопросы, связанные с обоснованием критериев выбора адекватной комбинации взаимодополняющих

алгоритмических концепций, которые могут стать ключом к достижению наилучших результатов при решении многих сложных задач комбинаторной оптимизации, входят в круг научных интересов Hyeongwook Kim [13], Jannis Rose, Patrick Forman, David Stieler, Achim Menges, Peter Mark [14], Полупановой Е.Е., Рыбалко А.А. [15].

Нерешенные части общей проблемы

Высоко оценивая имеющиеся труды и наработки, следует отметить, что некоторые вопросы в данной предметной области остаются дискуссионными и требуют более детальной проработки. Также остаётся нерешённой проблема интеграция системного анализа с гибридными эвристическими подходами, позволяющая одновременно учитывать сложные технологические и эксплуатационные ограничения при минимизации времени отклика и потерь ресурсов. Кроме того, недостаточно исследованы механизмы взаимодействия программных и аппаратных компонентов ускорителей, влияющие на стабильность и предсказуемость работы замкнутых контуров управления.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей и подходов к системному анализу и обработке информации в процессах комбинаторной оптимизации при управлении технологическими процессами.

Результаты

Прежде всего, следует отметить, что сложность решения комбинаторных оптимизационных задач возникнет

Таблица 2.

Сравнительная оценка методов комбинаторной оптимизации по критериям эффективности обработки информации в управлении технологическими процессами

Метод комбинаторной оптимизации	Способность к обработке неполной информации	Вычислительная сложность	Точность решения (относительная погрешность ϵ)	Применимость для системного анализа в реальном времени
Детерминированные методы (линейное программирование, ветви и границы)	Низкая. Требуют 100 % достоверности данных. Любой сбой датчика блокирует расчет.	Экспоненциальная: $O(2^n)$. При $n=100$ время расчета превышает 1015 лет.	Идеальная: $\epsilon=0$ % (глобальный оптимум).	Неприменимы для оперативного управления из-за «проклятия размерности». Только для статических задач ($n < 50$).
Локальные эвристики (градиентный спуск, жадные алгоритмы)	Средняя. Чувствительны к локальным искажениям информационного поля.	Полиномиальная: $O(n^2)$. Быстрая сходимость (доли секунды).	Низкая: $\epsilon \approx 10 \dots 20$ %. Высокий риск локального экстремума.	Ограниченно применимы. Подходят для экспресс-оценки, но не гарантируют качество управления.
Бионические метаэвристики (генетические, муравьиные алгоритмы)	Высокая. Реализуют параллельную обработку информации, устойчивы к шуму до 30 %.	Управляемая: $O(I \cdot P \cdot n)$. Зависит от выделенного ресурса времени.	Приемлемая: $\epsilon \approx 1 \dots 3$ %. Решение достаточно для технологии.	Применимы с ограничениями. Требуют настройки 5–10 гиперпараметров под конкретный процесс.
Гибридный подход (системный анализ + эвристика)	Максимальная. Включает блок предварительной кластеризации и адаптивной фильтрации.	Сниженная: $O(n \log n)$ за счет декомпозиции задачи.	Высокая: $\epsilon < 1$ %. Адаптация к дрейфу параметров.	Рекомендованы. Обеспечивают баланс между точностью обработки информации и скоростью принятия решений.

кает из-за того, что, в отличие от линейного программирования, область допустимых решений не является выпуклой множеством. Таким образом, для поиска оптимального решения необходимо искать решетку допустимых точек или, в случае смешанных целых чисел, множество непересекающихся полупрямых или отрезков прямых [16]. В линейном программировании, благодаря выпуклости задачи, можно использовать тот факт, что любое локальное решение является глобальным оптимумом. В целочисленном программировании задачи имеют много локальных оптимумов, и для нахождения глобального оптимума следует доказать, что конкретное решение доминирует над всеми допустимыми точками с помощью аргументов, отличных от тех, которые основаны на исчислении подходов к выпуклому программированию [17].

С учетом стремительно возросшего потока данных, которые генерируются промышленными системами, интеллектуальными устройствами, встроенными системами мониторинга и диагностики, и которые необходимо учитывать для принятия оптимального решения в контексте управления технологическими процессами, представляется, что выбор конкретного математического аппарата должен базироваться на компромиссе между вычислительной сложностью и точностью получаемого результата. В табл. 2 представлен сравнительный анализ основных методов комбинаторной оптимизации, оценивающий их применимость для обработки больших массивов данных в режиме реального времени.

Результаты сравнительной оценки, приведенные в табл. 2, позволяют сделать следующие выводы.

Применение точных методов (ветвей и границ, линейного программирования) в контурах оперативного управления технологически неоправданно ввиду их экспоненциальной вычислительной сложности. Несмотря на гарантию нахождения глобального оптимума, требования данных методов к абсолютной точности входной информации вступают в конфликт с реальными условиями эксплуатации, характеризующимися наличием помех и изменением параметров работы технологических линий. С другой стороны, простейшие эвристики, обладая высоким быстродействием, не обеспечивают требуемой точности решения, допуская отклонения более 10–20 %.

Наиболее перспективным направлением, согласно проведенному исследованию, является применение гибридных подходов, сочетающих элементы системного анализа (для предварительной обработки и снижения размерности информационного пространства) и метаэвристических алгоритмов.

В частности, для управления технологическими процессами при неполноте и динамической изменчивости информации предлагаем объединить системный анализ структуры технологического процесса с эвристическим поиском в редуцированном пространстве решений. По мнению автора, это позволит существенно снизить вычислительную сложность без потери требуемой точности управления. Ожидается, что использование струк-

турно-информационной декомпозиции задачи будет способно обеспечить асимптотическое снижение трудоёмкости до уровня, совместимого с требованиями реального времени.

Подводя итоги, можно сделать такие выводы. Сложные комбинаторные оптимизационные задачи встречаются сегодня во множестве реальных приложений. Учитывая значительные объёмы информации и сложность технологических процессов, которыми необходимо управлять, для решения задач комбинаторной оптимизации разрабатываются и совершенствуются

интеллектуальные методы анализа, кооперативные подходы, стратегии кластеризации и т.д. По мнению автора, значительный потенциал имеет гибридный подход, объединяющий возможности метаэвристических алгоритмов и точных методов, который способен выступать не как вспомогательный инструмент оптимизации, а как полноценный элемент замкнутого контура управления технологическим процессом, обеспечивающий устойчивость и эффективность функционирования АСУ ТП в условиях неопределённости и высокой информационной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гушанский С.М., Божич В.И., Потапов В.С. Исследование и разработка схем с оптимизацией по глубине в алгоритме квантовой приближенной оптимизации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 5 (235). С. 6–16. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-5-6-16.
2. Тырышкин С.Ю. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации в контексте классических и квантовых вычислительных моделей // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 9. С. 144–151. DOI: 10.17513/snt.40499.
3. Тырышкин С.Ю. Комбинаторная оптимизация процессов распределения ресурсов организационных систем на основе нейронных сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 4. С. 113–121. DOI: 10.24143/2072-9502-2025-4-113-121.
4. Зиновьев Л.Д., Каледа Р.А. Применение логического программирования с ограничениями для задач оптимизации и планирования // Вестник Пензенского государственного университета. 2024. № 4 (48). С. 43–45.
5. A review on learning to solve combinatorial optimisation problems in manufacturing / Cong Zhang, Yaoxin Wu, Yining Ma et al. // IET Collaborative Intelligent Manufacturing. 2023. Vol. 5, iss. 1. e12072. DOI: 10.1049/cim2.12072.
6. Xu Guo, Xiaoyu Song, Jian-tao Zhou. A synergic quantum particle swarm optimisation for constrained combinatorial test generation // IET Software. 2022. Vol. 16, iss. 3. P. 279–300. DOI: 10.1049/sfw2.12054.
7. Интеллектуальный анализ данных в управлении предприятием на основе алгоритма имитации отжига / Кулиев Э.В., Котельва А.В., Семенова М. М. и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4 (228). С. 29–39. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-4-29-39.
8. Combination search strategy-based improved particle swarm optimisation for resource allocation of multiple jammers for jamming netted radar system / Wei-qi Zou, Chao-yang Niu, Wei Liu et al. // IET Signal Processing. 2023. Vol. 17, iss. 4. e12198. DOI: 10.1049/sil2.12198.
9. Адонин Л.С., Владыко А.Г. Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 3. С. 7–24. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24.
10. Elsedimy Elsayed, Algarni Fahad. MOTS-ACO: An improved ant colony optimiser for multi-objective task scheduling optimisation problem in cloud data centres // IET Networks. 2022. Vol. 11, iss. 2. P. 43–57. DOI: 10.1049/ntw2.12033.
11. Кобак В.Г., Рязанов А.А. Сравнение различных кроссоверов при решении задачи коммивояжера генетическим алгоритмом с путевым представлением // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 2 (41). С. 33–40. URL: https://mid-journal.ru/upload/mid/iblock/f18/7_1685-ryazanov_33_40.pdf (дата обращения: 02.02.2026г.).
12. Закирьянов Р.М. Применение метаэвристических алгоритмов для оптимизации структуры промышленной системы управления // VI Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2025): сб. докл. конф. (26–28 сент. 2025 г.). Санкт-Петербург. 2025. С. 35–37.
13. Organic Memristor-Based Flexible Neural Networks with Bio-Realistic Synaptic Plasticity for Complex Combinatorial Optimization / Hyeonwook Kim, Miseong Kim, Aejin Lee et al. // Advanced Science. 2023. Vol. 10, iss. 19. 2300659. DOI: 10.1002/adv.202300659.
14. Combinatorial optimization approach for the efficient reuse of RC components / Jannis Rose, Patrick Forman, David Stieler et al. // Structural Concrete. 2025. Vol. 26, iss. 6. P. 7180–7203. DOI: 10.1002/suco.70126.
15. Полупанова Е.Е., Рыбалко А.А. Алгоритм последовательной гибридизации для решения задачи коммивояжера // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 3 (233). С. 108–118. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-108-118.
16. Решение обратной задачи спектральной теории графов при отсутствии наблюдаемых переменных / Целых А.Н., Васильев В.С., Целых Л.А., Барковский С.А. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 4 (246). С. 163–173. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-4-163-173.
17. Ising Hamiltonians for Constrained Combinatorial Optimization Problems and the Metropolis-Hastings Warm-Starting Algorithm / Hui-Min Li, Jin-Min Liang, Zhi-Xi Wang, Shao-Ming Fei // Advanced Quantum Technologies. 2023. Vol. 6, iss. 9. 2300101. DOI: 10.48550/arXiv.2307.08980.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (Service.vip-spe@yandex.ru); Шарлаев Евгений Владимирович (sharlaev@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ В ОРГАНИЗАЦИЯХ

MODELING OF AN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM FOR PERSONAL DATA MANAGEMENT IN ORGANIZATIONS

A. Filatov

Summary. The relevance of the study is driven by increasing demands for personal data protection in the digital age. The paper proposes a practical model of an intelligent information system (IIS) designed to automate personal data management processes. Functional requirements for the IIS are presented, including data classification and masking, development of identification rules, and metadata management. Special attention is given to the system architecture, which leverages open-source technologies such as Apache Airflow. The study explores the potential of semantic models and theories, such as Markov processes and fuzzy sets, to optimize the data annotation process.

Keywords: personal data, intelligent information system, data annotation, semantic models, data management.

Филатов Александр Сергеевич

Аспирант, МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)
shzgudzh@gmail.com

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена ростом требований к защите персональных данных в условиях цифровизации. В статье предлагается практическая модель интеллектуальной информационной системы (ИИС), предназначенной для автоматизации процессов управления персональными данными. Представлены функциональные требования к ИИС, включая классификацию и маскирование данных, разработку правил идентификации и управление метаданными. Особое внимание уделено архитектуре системы, которая базируется на использовании технологий с открытым исходным кодом, таких как Apache Airflow. Рассмотрены перспективы применения семантических моделей и теорий, таких как теория Марковских процессов и нечетких множеств, для оптимизации процесса разметки данных.

Ключевые слова: персональные данные, интеллектуальная информационная система, разметка данных, семантические модели, управление данными.

Актуальность проблемы управления персональными данными обусловлена ужесточением требований к защите информации в связи с цифровизацией общества, развитием цифровых сервисов и экосистем. Возрастающие риски утечек, кибератак и неправомерного использования персональных данных ужесточают требования регуляторов. В законе «О персональных данных» (ФЗ-152) установлены несколько ключевых технических требований для компаний, которые обрабатывают персональные данные. *Системы защиты персональных данных:* компании обязаны внедрить системы защиты персональных данных, которые соответствуют угрозам безопасности и защищают данные от несанкционированного доступа, утраты или изменения. *Аудит и мониторинг:* обязателен регулярный контроль за соблюдением требований безопасности, включая внутренний аудит информационных систем.

Для соблюдения требований регуляторов в организациях создаются специализированные департаменты по управлению персональными данными. В виду все большего распространения микросервисной архитектуры [1][2] в разработке цифровых сервисов, задача идентификации персональных данных значительно усложняется. Если при монолитной архитектуре все данные

находятся на едином кластере СУБД, то при микросервисном подходе — данные максимально распределены, могут значительно отличаться по структуре хранения и используемым технологиям СУБД. В связи с этим, все больше растет потребность в разработке интеллектуальных информационных систем (ИИС) для автоматизации процессов в области защиты, аудита и мониторинга персональных данных [9].

Цифровой сервис может быть представлен как многофункциональная цифровизированная система (МЦС), где ключевым аспектом является интеграция цифровых инструментов во все слои управления. Важную роль в МЦС играет единое информационное пространство, обеспечивающее оперативность обработки данных и принятие решений. В данных системах крайне важны автоматизация интеграций данных и ответственность за их актуализацию [13]. Основной фокус внимания специалистов по персональным данным направлен на аудит и разметку данных в базах данных сервисов и аналитических хранилищах организаций [14]. При распределенной архитектуре СУБД организациям крайне важно идентифицировать ИС и производные объекты данных, содержащие персональные данные. Такие системы, согласно законодательству, причисляются к *инфор-*

мационным системам персональных данных (ИСПДн), на них накладывается ряд требований и ограничений. Все ИСПДн подлежат классификации по четырём уровням защищённости, определяемым характером обрабатываемых данных и степенью возможных угроз. На организационном уровне оператор ПД обязан назначить ответственное лицо, обеспечить законность обработки данных (наличие согласия субъекта или иной правовой основы), уведомить Роскомнадзор о создании системы и ограничить доступ только уполномоченными сотрудниками. Техническая защита предполагает использование сертифицированных средств защиты информации (ФСТЭК и ФСБ), применение алгоритмов шифрования по ГОСТ, аудит доступа и действий пользователей, а также разграничение прав с помощью ролей и механизмов аутентификации. Дополнительно законом установлены территориальные ограничения, обязывающие хранить персональные данные граждан РФ на серверах внутри страны, а также требования к срокам и объёму обработки информации. Контроль за исполнением возложен на Роскомнадзор, а нарушения влекут административную и, в отдельных случаях, уголовную ответственность.

Автоматизация процессов управления персональными данными возможна в образовательных организациях. Инструментарий предложенный в работе Аютовой И.В. включает разработку моделей и алгоритмов для автоматизированного предпроектного обследования ИСПДн. Эти инструменты позволяют учесть особенности образовательных учреждений, такие как публичность и территориальная разобщённость, и минимизировать трудозатраты, одновременно повышая безопасность данных. Предлагаются модели, основанные на теории марковских процессов и теории нечетких множеств [15]. Голенков В.В. и Гулякина Н.А. разрабатывают методы семантического анализа текстов и их применения в интеллектуальных системах, вне зависимости от стадии опытно промышленной эксплуатации. Основное внимание уделяется созданию моделей, способных структурировать и классифицировать текстовую информацию с учётом её семантических связей. Важным аспектом является использование онтологий и формальных логик, что позволяет системам более точно идентифицировать смысловые отношения между элементами текста. Эти технологии могут применяться для автоматической обработки данных и извлечения знаний, что существенно повышает эффективность интеллектуальных систем. [3] [4]

Формализация задачи

Пусть задано множество таблиц

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

Где каждая таблица описывается структурой

$$t_i = (FQN_i, D_i, C_i)$$

FQN_i – метаданные: схемы данных, таблицы,

D_i – текстовое описание таблицы,

$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}\}$ – множество колонок.

FQN_i и $name_{ij}$ представляют собой наименования таблиц и столбцов на латинском языке в двух вариациях: «camel case», например: *smOrdersTotal*, *userClientView*, *orderliness* или «snake case», например: *order_positions*, *user_address*, *rep_lot* для их токенизации, Для текстовых описаний D_i и $name_{ij}$ будет использован вектор нормальной токенизации — разбивка по пробелам и знакам пунктуации [16].

$$tokens = Tok(s)$$

$tokens$ – массив выделенных слов строки s

s – строка текста ($FQN_i, name_{ij}, D_i, name_{ij}$)

Каждая колонка c_{ij} задается вектором признаков:

$$c_{ij} = (name_{ij}, type_{ij}, desc_{ij}).$$

$name_{ij}$ – наименование колонки,

$type_{ij}$ – тип данных таблицы : целое, строка, дата, дата и время, булево,

$desc_{ij}$ – текстовое описание колонки

Необходимо провести классификацию на уровне таблицы, определив значение целевой переменной

$$y_i \in \{0, 1, 2\}$$

где 0 — таблица точно не содержит персональные данные, 1 — таблица может содержать персональные данные, 2 — таблица точно содержит персональные данные. В обучающей выборке содержится $N = 30500$ таблиц, для каждой определено множество колонок.

Задача состоит в построении такой функции f , что $\hat{y}_i = f(t_i) y_i$, обеспечивающей уверенности $p_{ik} = P(y_i = k | t_i)$

Проектирование

Процесс разметки персональных данных в широком смысле представляет из себя разметку физических моделей данных (таблиц) ИСПДн системными аналитиками. Методология настоящей разметки формируется и валидируется специалистами по управлению персональными данными. Результатом процесса является

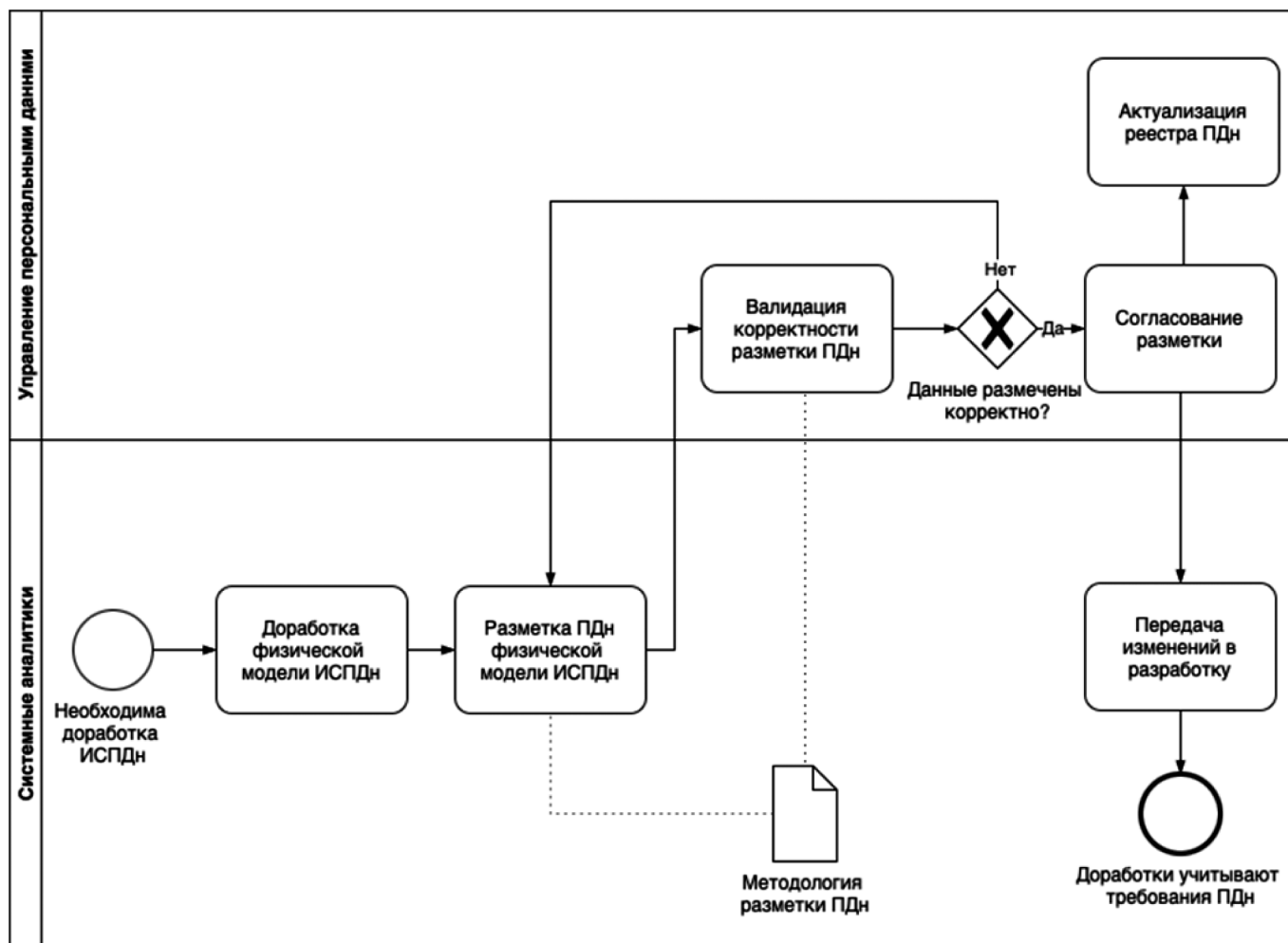


Рис. 1. Верхнеуровневый процесс разметки Персональных данных при разработке СУБД

формирование реестра персональных данных на уровне атрибутов физической модели ИСПДн. Реестр необходим в случаях: запроса пользователя на удаление персональных данных, маскирования персональных данных для просмотра неавторизованными пользователями, ведения учета персональных данных в организации.

Участниками процесса выступают две группы Пользователей:

- Команда Управления персональными данными — осуществляют надзор и валидируют корректность разметки персональных данных
- Системные аналитики — производят разметку на уровне физической модели данных ИСПДн

При принятии решения о классификации ПДн участники ориентируются на набор вводных метаданных и фактических данных. *Наименование таблицы и атрибута* — устанавливаются в соответствии с принятыми конвенциями и содержат указание на содержащиеся данные. *Описание таблицы и атрибута* — бизнес/техническое описание объекта, содержится в документации, либо в метаданных объекта в СУБД ИСПДн. *Фактические данные* — реальные данные внутри объекта,

могут содержать номера телефонов, ФИО, денежные величины. *Методология разметки ПДн* — набор правил и методик для классификации ПДн, могут отличаться между организациями в виду специфики.

Назначение и основные функции

Разрабатываемая ИИС предназначена для автоматизации процессов классификации и управления объектами ИСПДн и аналитических хранилищ по уровням содержания персональных данных. ИИС должна удовлетворять следующим требованиям:

- аутентификация и авторизация действий Пользователей;
- визуализация клиентского веб-интерфейса для взаимодействия с серверной частью ИИС, с применением синхронных REST API методов;
- создание, редактирование, просмотр и удаление правил идентификации персональных данных;
- создание, редактирование, просмотр и удаление источников данных (аналитических хранилищ);
- создание, редактирование, просмотр и удаление каталогов базы знаний, включая хранимую историю и обучающие выборки;

- классификация метаданных из ИС-источников согласно правилам идентификации персональных данных;
- маскирование (обезличивание) фактических данных в объектах систем-источников в соответствии с правилами маскирования персональных данных;
- физическое удаление фактических данных в объектах систем-источников в соответствии с регламентами очистки персональных данных;
- экспорт метаданных и классификаций в формате CSV / XML;
- формирование технической отчетности по результатам работы моделей ИИС.

Архитектура

Система должна быть спроектирована как веб-ориентированное программное средство и предоставлять Пользователям возможности запуска интеграционных процедур и актуализации базы знаний. Основные модули проектируемой системы включают в себя:

Пользовательский интерфейс — предназначен для работы Специалистов по персональным данным, необходим для визуального представления результатов работы Интеллектуальной системы, позволяет вносить и актуализировать правила классификации персональных данных. Программная реализация включает в себя технологии JavaScript для визуального отображения объектов, а также REST API для взаимодействия с серверными модулями ИС

Модуль классификации метаданных — основной модуль поддержки принятия решений. Представляет собой семантическую модель, определяющую уровень персональных данных, содержащихся в объекте хранилища данных. На вход модели поступают преобразованные мета-данные из ИСПДн и аналитических хранилищ. В результате работы процедур, на основании внутренней Базы знаний, ранее неклассифицированные данные разбиваются по уровням Персональных данных и маскируются в ИСПДн аналитических хранилищах (источниках).

Модуль интеграций — осуществляет сбор исходных мета-данных из ИСПДн и аналитических хранилищ и преобразовывает их для долгосрочного хранения во внутренней базе знаний. Позволяет запускать процедуры на регламентной основе, либо по запросу Пользователя. Программная реализация модуля использует технологию с открытым исходным кодом Airflow на базе лицензии Apache. Технология позволяет на регламентной основе запускать процедуры обработки больших массивов данных, написанных на языке Python.

База знаний — реляционная СУБД, содержащая: параметры запуска и конфигурации семантической модели, набор Пользовательских правил и процедур, исторические метаданные аналитических хранилищ.

ИИС должна поддерживать ролевою модель доступа к ресурсам. Роль «Администратор» позволяет выполнять все действия в ИИС (просмотр, редактирование, удаление) вне зависимости от ресурса обращения. Роль «Эксперт» включает в себя основные группы Пользователей: Специалистов по персональным данным и Системных аналитиков им доступны действия (просмотр, редактирование, удаление) но с учетом принадлежности к ресурсу (конкретным ИСПДн и хранилищам).

Заключение

Актуальность вопросов управления персональными данными, на ряду с ужесточением требований регуляторов обуславливают необходимость разработки комплексных инструментов и программного обеспечения для автоматизации экспертных процессов. Они должны быть направлены на повышение эффективности и оптимизацию процессов управления ПДн.

Возможным ответом на запрос могут стать интеллектуальные информационные системы, осуществляющие поддержку в процессах принятия экспертных решений. Наиболее перспективной областью является разработка семантических классификационных моделей и соответствующих баз знаний для расширения экспертизы процесса и снижения вовлечения Пользователей в рутинные операции классификации и валидации. Разрабатываемые ИИС должны отвечать современным технологическим и архитектурным принципам, а также требованиям безопасности

В настоящей статье предложены функциональные требования и концептуальная архитектура моделируемой ИИС. В рамках описанного процесса, основной упор ИИС должен быть сделан на модуле классификации метаданных и модуле интеграций. В классификационном модуле могут быть использованы модели, основанные на теории марковских процессов, теории нечетких множеств, использованы онтологии и формальные логики. Интеграционный модуль должен быть гибким в настройке и позволять подключаться к разнообразным источникам ИСПДн, вне зависимости от используемых технологий СУБД, модуль может быть разработан на основе технологии с открытым исходным кодом Apache Airflow. Предложения могут быть использованы организациями при разработке ИИС для решения практических задач в области управления ПДн.

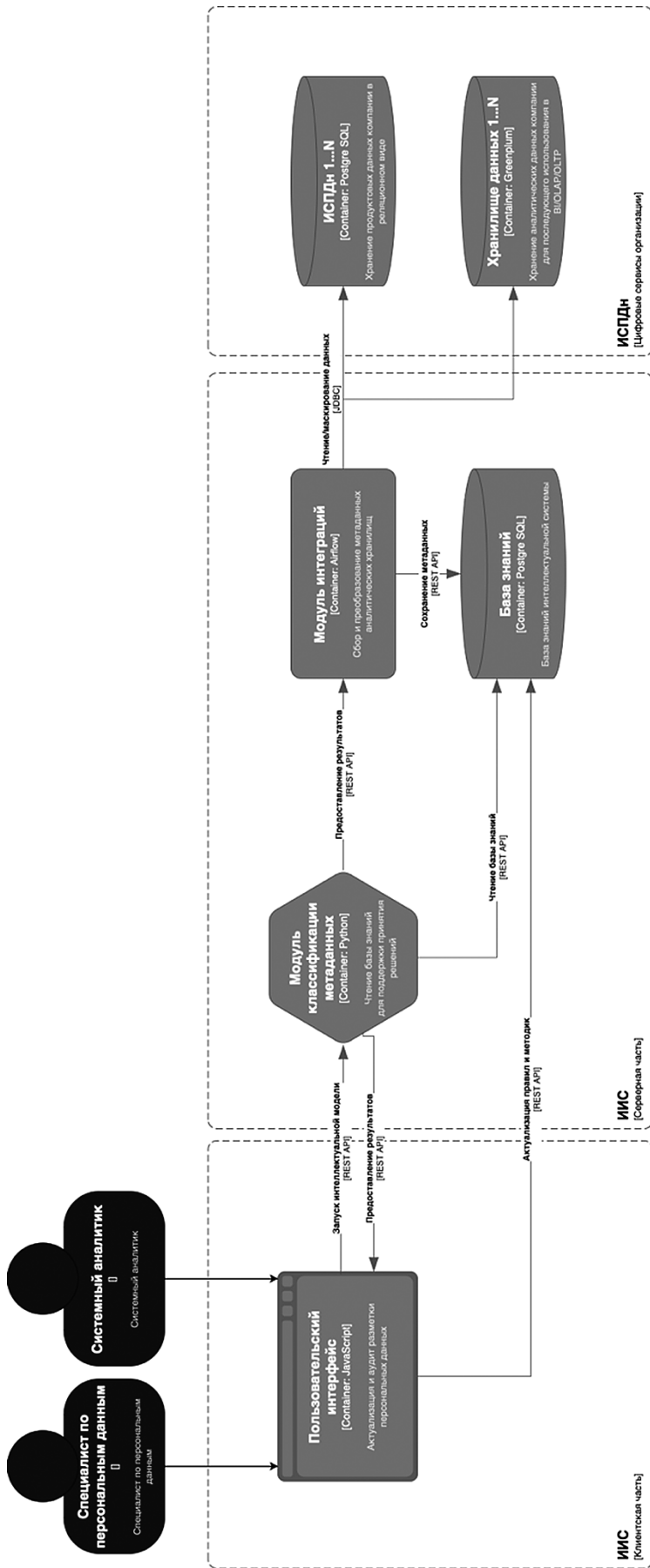


Рис. 2. Архитектурная схема компонентов ИИС

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркова В.Д. Цифровизация управления: от АСУ к микросервисам // ЭКО. — 2022. — № 9 (579). — С. 113–129. — DOI: 10.30680/EC00131-7652-2022-9-113-129.
2. Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Инструментальные средства автоматизации разработки и применения пакета прикладных микросервисов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2024. — № 2 (34). — С. 155–168. — DOI: 10.25729/2413-0133-2024-2-155-168.
3. Голенков В.В., Гулякина Н.А. Методы семантического анализа текстов и их применение в интеллектуальных системах // Материалы международной научно-технической конференции. Минск: БГУИР, 2020. С. 345–350. DOI: 10.35596/2020-01-345-350.
4. Голенков В.В., Гулякина Н.А. Принципы создания интеллектуальных систем на основе семантического анализа // Вестник БГУИР. 2020. № 4. С. 120–125. DOI: 10.35596/2020-04-120-125.
5. Мухаметгалиев А.Ф., Казаков В.А., Гайсин И.Н. Анализ и моделирование информационных процессов в интеллектуальных системах // Научный журнал МОИТ. — 2023. — № 2. — С. 55–65. DOI: 10.17399/moivit2023-2-55-65.
6. Борисова А.А., Иванов И.В. Разработка методов и средств для защиты персональных данных в распределенных системах // Информационные технологии. — 2021. — Т. 27, № 4. — С. 345–352. DOI: 10.14357/it20210405.
7. Кирюхина, Е.С. Модели и алгоритмы управления процессом обработки персональных данных в вузе: дис. канд. техн. наук: 05.13.10 / Кирюхина Елена Сергеевна. — Белгород, 2014. — 135 с.
8. Методология разметки персональных данных в образовательных организациях // Научный журнал МОИТ. 2023. № 2. С. 74–82. DOI: 10.17399/moivit2023-2-74-82.
9. Остроух А.В. Интеллектуальные системы: монография. Н. Новгород: НКРАС, 2020. 280 с. DOI: 10.32703/2020-11-03.
10. Мариллоннет П., Лоран М., Атес М. Самоуправление персональной информацией: обзор технологий поддержки административных услуг // arXiv preprint arXiv:2109.12968, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2109.12968.
11. Чжан В., Ли М., Ченг Х. и др. Управление персональными данными в соответствии с GDPR: решение на основе блокчейна // arXiv preprint arXiv:1904.03038, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1904.03038.
12. Смирнова Е. А. Защита персональных данных: проблемы и решения // Молодой ученый. 2024. № 5. С. 123–127.
13. Гусев П.Ю., Систематизация и управление доступом к данным в многофункциональной цифровизированной системе // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023;11(4). DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.025
14. Некрасов А.А., Гаврилов С.О., Беленькая М.Н. Средства создания хранилищ данных // Телекоммуникации и информационные технологии. — 2021. — Т. 8, № 1. — С. 75–80.
15. Аютова И.В. Модели и алгоритмы управления процессом обработки персональных данных в вузе: дис. . . . канд. техн. наук: 05.13.01 / Аютова Ирина Владимировна. — Сургут: Сургутский государственный университет, 2012. — 155 с.
16. Гречахин В.А. К вопросу о токенизации текста // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 7 (49). — DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.070.

© Филатов Александр Сергеевич (shzgudzh@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОДХОД К ДЕТЕКТИРОВАНИЮ СЛЕДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЯЗВИМОСТЕЙ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ КЛАССА INJECTIONS НА ПРИМЕРЕ УЯЗВИМОСТЕЙ ХРАНИМОГО МЕЖСАЙТОВОГО СКРИПТИНГА И УДАЛЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ФАЙЛОВ

Шипулин Георгий Фаризович

кандидат юридических наук, доцент РТУ МИРЭА;
доцент, Московский политехнический университет
podumai_nad@mail.ru

AN APPROACH TO DETECTING TRACES OF EXPLOITING VULNERABILITIES IN WEB APPLICATIONS OF THE INJECTIONS CLASS USING THE EXAMPLE OF VULNERABILITIES IN STORED CROSS-SITE SCRIPTING AND REMOTE FILE INCLUSION

G. Shipulin

Summary. The article is devoted to issues related to the identification of traces of exploitation of vulnerabilities in web applications of the Injections class according to the updated OWASP Top 10 classification of 2025 using the example of vulnerabilities in stored cross-site scripting and remote file inclusion. The proposed approach to detecting post-exploitation (traces of exploitation) vulnerabilities is based on comparing the current state of a web application with its image of a reference state and subsequent analysis of changes in web application data (files and rows of target database tables) and includes five procedures: forming an image of a reference state; determining changes in the current state; analyzing and evaluating changes in the current state. states; updating data on changes to the current and previous states; updating the image of the reference state of the system. To test the proposed approach in relation to detecting traces of exploitation of vulnerabilities in stored cross-site scripting and remote inclusion of files, a software tool was developed and tested to confirm its applicability. The limited application of the proposed approach is determined by the peculiarities of exploiting certain vulnerabilities of the Injections class, as a result of which no changes are made to the structure and content of the attacked web application.

Keywords: vulnerabilities, web applications, stored cross-site scripting, detection of post-exploitation of web vulnerabilities, traces of exploitation of web vulnerabilities, OWASP, information security.

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению вопросов, связанных с выявлением следов эксплуатации уязвимостей веб-приложений класса Injections согласно обновленной классификации OWASP Top 10 2025 года на примере уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов. Предложенный подход к детектированию постэксплуатации (следов эксплуатации) уязвимостей основан на сравнении текущего состояния веб-приложения с его образом эталонного состояния и последующим анализом изменений данных веб-приложения (файлов и строк целевых таблиц базы данных) и включает пять процедур: формирование образа эталонного состояния; определение изменений текущего состояния; анализ и оценка изменений текущего состояния; обновление данных об изменениях текущего и предыдущего состояний; обновление образа эталонного состояния системы. Для апробации предложенного подхода в отношении детектирования следов эксплуатации уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов было разработано и протестировано программное средство, подтверждающее его применимость. Ограниченность применения предложенного подхода определяется особенностями эксплуатации некоторых уязвимостей класса Injections, в результате которых не вносятся изменений в структуру и содержимое атакованного веб-приложения.

Ключевые слова: уязвимости, веб-приложения, хранимый межсайтовый скриптинг, детектирование постэксплуатации веб-уязвимостей, следы эксплуатации веб-уязвимостей, OWASP, информационная безопасность.

Проблема своевременного обнаружения успешно эксплуатируемых уязвимостей веб-приложений, к которым относятся также уязвимости хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов, является актуальной ввиду большого количества совершаемых атак на веб-приложения. Так, согласно отчету компании «Webmonitorx» за 2025 г. было зафик-

сировано более 870 миллионов попыток эксплуатации разных уязвимостей, из которых порядка четверти относились к межсайтовому скриптингу [1].

Уязвимости удаленного включения файлов (Remote File Inclusion — RFI) и хранимого межсайтового скриптинга (Stored XSS) относятся к категории A05:2025 —

Injections обновленной в конце 2025 года классификации OWASP Top 10 2025, что также отражает широкую распространенность эксплуатации и опасность данных уязвимостей веб-приложений. Детальная техническая спецификация каждого из рассматриваемых видов уязвимостей описана в системе категоризации уязвимостей аппаратного и программного обеспечения Common Weakness Enumeration (CWE). [2,3]

Таким образом, не только задачи определения уязвимых сущностей веб-приложения [4], но и постэксплуатации (следов эксплуатации) уязвимостей данного класса являются актуальными.

Предлагаемый в исследовании подход к детектированию следов эксплуатации уязвимостей класса Injections основан на сравнении текущего состояния веб-приложения с его эталонным состоянием посредством анализа изменений данных веб-приложения (файлов и строк целевых таблиц базы данных). Также предполагается многоуровневая нормализация данных, подсчет весов **признаков (следов) эксплуатации** и динамическое подавление легитимных изменений через адаптивный механизм учета легитимных изменений состояния системы.

Преимущества данного подхода является минимизация ложноположительных срабатываний и фокусирование только на неизвестных изменениях с адаптацией к легитимной динамике изменения контента без необходимости пересоздания эталонного образа. *Ограниченность применения определяется особенностями эксплуатации уязвимостей класса Injections, в результате которых не вносятся изменений в структуру и содержимое атакованного веб-приложения.*

Сам подход к детектированию постэксплуатации уязвимостей класса Injections определяется следующими четырьмя взаимосвязанными процедурами и одной отдельной процедурой обновления образа эталонного состояния системы:

1. формирование образа эталонного состояния;
2. определение изменений текущего состояния;
3. анализ и оценка изменений (дельта) текущего состояния;
4. обновление данных об изменениях текущего и предыдущего состояний.

Процедуры определения изменений текущего состояния, анализа и оценки изменений (дельта) текущего состояния, обновления данных об изменениях текущего и предыдущего состояний выполняются последовательно непрерывным циклом.

Процедура формирования образа эталонного состояния системы выполняется однократно перед

выполнением всех последующих процедур. Она заключается в последовательном обращении к файлам веб-приложения и таблицам баз данных, предварительно заданных в виде целевого набора, с вычислением их хэш-значений на основе алгоритма SHA256.

Рекурсивный обход файловой системы выполняется от заданного корневого каталога веб-приложения с учетом списка исключений, при этом для каждого файла вычисляется его хэш и фиксируются его атрибуты (путь, размер, время модификации). Взаимодействие с целевыми таблицами базы данных выполняется следующим образом: для каждой записи вычисляется хэш по значимым полям и формируется набор пар вида: «первичный ключ — хэш», что позволяет сопоставлять изменения между состояниями.

Таким образом, формируется образ эталонного состояния системы, включающий реестр хэшей файлов веб-приложения и реестр хэшей строк целевых таблиц базы данных, используемый в дальнейшем для определения и анализа изменений в текущем состоянии системы.

Процедура определения изменений текущего состояния выполняется повторный обход каталога веб-приложения и целевых таблиц базы данных с вычислением хэшей по аналогии с предыдущей процедурой. Далее выполняется сопоставление текущего и эталонного (при первом выполнении процедуры) или предыдущего (при последующих выполнениях процедуры) состояний на основе вычисленных хэшей, в результате чего определяются новые, удаленные или модифицированные файлы и записи в таблицах базы данных. В результате сформированный набор (список) отличий с полем веса признака эксплуатации (с заданным нулевым значением) в каждой записи передается в качестве входных данных следующей процедуре.

Из сформированного набора в рамках **процедуры анализа и оценки изменений (дельта) текущего состояния** выполняется последовательное обращение к соответствующим файлам и записям таблиц базы данных с опциональным декодированием информации (строк) и сканирование посредством набора регулярных выражений. При каждом обнаружении сигнатур эксплуатации уязвимостей, в частности, межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов, соответствующим регулярным выражением в анализируемом файле или записи таблицы базы данных значение поля веса инкрементируется соответствующей записи сформированного набора на заранее заданное в регулярном выражении значение.

При прохождении порогового значения веса считается, что анализируемый объект (файл или запись таблицы базы данных) содержит признаки постэксплуатации уязвимостей.

Процедура обновления данных об изменениях текущего и предыдущего состояний состоит в адаптивном учете легитимных изменений состояния системы, а именно в формировании/обновлении образа текущего состояния системы на основе сформированного в процедуре определения изменений текущего состояния, насыщенного недостающими данными из образа эталонного состояния системы.

Процедура обновления образа эталонного состояния системы аналогична процедуре формирования образа эталонного состояния.

Для реализации данного подхода в отношении детектирования постэксплуатации уязвимостей Stored XSS и RFI было разработано программное средство на языке программирования Python3 [5]. Выбор используемого языка программирования обоснован кроссплатформенностью и широкими возможностями обработки текстовых данных и работы с файловыми системами и базами данных.

Архитектура разработанного программного средства включает следующие модули:

- интерфейса управления;
- сканирования файлов;
- сканирования базы данных;
- нормализации и анализа данных и состояний;
- формирования отчетов.

Функциональные возможности, порядок работы и взаимодействие модулей определяются описанными ранее процедурами.

Само программное средство включает два файла: скрипт `postexp_guard.py` и конфигурационный файл `config.json`. В файле `postexp_guard.py` реализованы все модули программного средства, включая интерфейс управления, сканирование файловой системы и базы данных, декодирование и анализ их содержимого, а также формирование отчетов о результатах выполнения. Файл `config.json` содержит конфигурации режимов работы и параметров сканирования, в том числе директорию каталога веб-приложения, перечень исключаемых каталогов и файлов, параметры подключения к системе управления базами данных, целевой набор таблиц и полей для анализа, пороговые значения весов, а также набор регулярных выражений.

Скрипт `postexp_guard.py` запускается через командную строку интерпретатора операционной системы и поддерживает две основные команды:

- «init» — запуск создания образа эталонного состояния системы;
- «scan» — запуск сканирования (проверки).

Дополнительно реализован флаг «-promote» команды «init», позволяющий инициировать контролируемое обновление образа эталонного состояния системы.

Для проверки работоспособности разработанного программного средства, реализующего предложенный подход по отношению к уязвимостям хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов, был проведен эксперимент.

В рамках эксперимента было развернуто на базе виртуальной машины под управлением операционной системы Linux Ubuntu 22.04 веб-приложение `dvwa`, предназначенное для выработки практических навыков тестирования на проникновение веб-приложений [6].

Для формирования образа эталонного состояния веб-приложения были настроен конфигурационный файл `config.json` и запущена утилита `postexp_guard.py` с командой «init» (рис. 1).

Далее была выполнена эксплуатация уязвимости хранимого межсайтового скриптинга восемью разными векторами [7] с разными уровнями сложностями, выставленными в настройках самого веб-приложения `dvwa` (определяются реализованными механизмами безопасности) на веб-странице `http://IP-адрес/DVWA/vulnerabilities/xss_s/` данного веб-приложения.

После чего было выполнено сканирование с целью выявления следов эксплуатации уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга посредством запуска утилиты `postexp_guard.py` с командой «scan» (рис. 2).

Для проверки работоспособности разработанного программного средства в отношении детектирования признаков эксплуатации уязвимостей удаленного включения файлов была выполнена эксплуатация данного уязвимости тремя разными векторами с разными уровнями сложностями, выставленными в настройках самого веб-приложения `dvwa` (определяются реализованными механизмами безопасности) на веб-странице

```
tech@dvwa:~/postexp_guard$ ./postexp_guard_v2.py init
[+] baseline fs_snapshot.json saved
[+] baseline db saved: /home/tech/postexp_guard/baseline/db/guestbook.tsv.gz
[+] baseline fs_allow.json created
tech@dvwa:~/postexp_guard$
```

Рис. 1. Создание образа эталонного состояния веб-приложения `dvwa` (источник: разработка автора)

```

tech@dvw:~/postexp_guard$ ./postexp_guard_v2.py scan
[+] ALERT score=35 report=/home/tech/postexp_guard/reports/20260128-190821/report.json
[+] evidence=/home/tech/postexp_guard/reports/20260128-190821/evidence.txt
tech@dvw:~/postexp_guard$ REP=~/.postexp_guard/reports/$(ls -l ~/postexp_guard/reports | tail -n 1)
tech@dvw:~/postexp_guard$ cat "$REP/evidence.txt"
VERDICT: ALERT
TOTAL_SCORE: 35 (threshold=7)

CHANGED FILES (effective):
  added: 0
  modified: 0
  removed: 0

TOP FINDINGS:
- [xss] +7 XSS:script_tag @ db::guestbook:2 :: <script>alert(123)</script>\ntest1
- [xss] +7 XSS:script_tag @ db::guestbook:4 :: 1\n<SCRIPT>alert('You have been hacked!')</SCRIPT>
- [xss] +4 XSS:javascript_uri @ db::guestbook:6 :: 1\n<meta http-equiv="refresh" content="0;javascript:alert(1)"/>
- [xss] +4 XSS:javascript_uri @ db::guestbook:7 :: 1\n<audio src=1 href=1 onerror="javascript:alert(1)"></audio>
- [xss] +4 XSS:javascript_uri @ db::guestbook:8 :: 1\n<video onerror="javascript:alert(1)"><source>
- [xss] +3 XSS:event_handler @ db::guestbook:5 :: 1\n
- [xss] +3 XSS:event_handler @ db::guestbook:7 :: 1\n<audio src=1 href=1 onerror="javascript:alert(1)"></audio>
- [xss] +3 XSS:event_handler @ db::guestbook:8 :: 1\n<video onerror="javascript:alert(1)"><source>tech@dvw:~/postexp_guard$ █

```

Рис. 2. Вывод результатов выполнения разработанного программного средства (источник: разработка автора)

```

tech@dvw:~/postexp_guard$ cat ./reports/20260128-202235/evidence.txt
VERDICT: ALERT
TOTAL_SCORE: 19 (threshold=7)

CHANGED FILES (effective):
  added: 1
  modified: 0
  removed: 0

TOP FINDINGS:
- [rfi] +7 RFI:include_url @ file::html/DVWA/marker.php :: <?php\necho "marker";\n/* Suspicious indicators for testing:\n base64_decode(\n system(\n include(
"http://example.com/x")\n*/\n?>\n
- [webshell] +7 SHELL:system @ file::html/DVWA/marker.php :: <?php\necho "marker";\n/* Suspicious indicators for testing:\n base64_decode(\n system(\n includ
e("http://example.com/x")\n*/\n?>\n
- [obf] +5 OBF:base64_decode @ file::html/DVWA/marker.php :: <?php\necho "marker";\n/* Suspicious indicators for testing:\n base64_decode(\n system(\n includ
e("http://example.com/x")\n*/\n?>\ntech@dvw:~/postexp_guard$ █

```

Рис. 3. Вывод результатов выполнения разработанного программного средства (источник: разработка автора)

<http://IP-адрес/DVWA/vulnerabilities/upload/> данного веб-приложения.

Также по аналогии было выполнено сканирование с целью выявления следов эксплуатации уязвимостей удаленного включения файлов посредством запуска утилиты `postexp_guard.py` с командой «scan» (рис. 3).

Как видно, программное средство отработало корректно и определило все следы эксплуатации уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов, что подтверждает применимость предложенного подхода.

Таким образом, был описан предлагаемый подход к детектированию следов эксплуатации уязвимостей веб-приложений класса Injections на уровне процедур, определены его преимущества и ограничения. Описана архитектура разработанного программного средства, реализующего данный подход в отношении следов эксплуатации уязвимостей хранимого межсайтового скриптинга и удаленного включения файлов, а также представлены результаты его применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о веб-атаках на онлайн-ресурсы российских компаний за 3 квартала 2025 года // Webmonitorx URL: <https://webmonitorx.ru/trends/issledovaniya/otchet-o-veb-atakakh-na-onlayn-resursy-rossiyskikh-kompaniy-za-3-kvartala-2025-goda/> (дата обращения: 20.12.2025).
2. OWASP Top 10:2025 // owasp.org URL: <https://owasp.org/Top10/2025/> (дата обращения: 25.12.2025).
3. CWE CATEGORY: OWASP Top Ten 2021 Category A03:2021 — Injection // cwe.mitre.org URL: <https://cwe.mitre.org/data/definitions/1347.html> (дата обращения: 26.12.2025).
4. Шипулин, Г.Ф. Построение системы поиска уязвимых к межсайтовому скриптингу сущностей веб-приложений / Г.Ф. Шипулин, А.Д. Шабалин, С.В. Спесивова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 4-2. — С. 144–146. — DOI 10.37882/2223-2966.2025.04-2.34.
5. Our Documentation // Python.org URL: <https://www.python.org/doc/> (дата обращения: 04.01.2026).
6. GitHub: DVWA // GitHub URL: <https://github.com/digininja/DVWA> (дата обращения: 15.01.2026).
7. GitHub: XSS Vectors Cheat Sheet // GitHub URL: <https://gist.github.com/kurobeats/9a613c9ab68914312cbb415134795b45> (дата обращения: 16.01.2026).

© Шипулин Георгий Фаризович (podumai_nad@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ИИ-АГЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING AI AGENTS TO INCREASE THE LEVEL OF CYBER RESILIENCE OF AN ORGANIZATION'S INFORMATION INFRASTRUCTURE

**G. Shipulin
I. Kalutsky
A. Shornikov**

Summary. The article discusses the possibilities of using AI agents to solve problems of improving the cyber resilience of modern information infrastructure, especially in monitoring and respond to information security incidents. The analysis showed a significant reduction in MTTD and MTTR time metrics when AI agents were introduced into an organisation's information security management system, but also revealed an increase in type I and type II errors in the detection and identification of information security incidents. The authors highlighted the advantages and limitations of AI agents, identified the risks associated with their use, and made a well-founded conclusion about the advisability of considering AI agents as a promising addition to a mature information security management system and processes. The analytical work led to a reasonable conclusion about the advisability of considering AI agents as a promising addition to a mature information security management system and processes for monitoring and responding to information security incidents, especially in the context of a dynamically changing cyber threat landscape.

Keywords: artificial intelligence, AI agents, information security, information security incidents, monitoring of information security incidents, information security tools.

Шипулин Георгий Фаризович

кандидат юридических наук, доцент, РТУ МИРЭА;
доцент, Московский Политехнический Университет
podumai_nad@mail.ru

Калуцкий Игорь Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
Московский Политехнический Университет;
Доцент, РТУ МИРЭА
kalutsky_igor@mail.ru

Шорников Андрей Валерьевич

Ассистент, Московский Политехнический Университет
a.vshornikov@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения ИИ-агентов для решения задач повышения уровня киберустойчивости современной информационной инфраструктуры, а именно при мониторинге и реагировании на инциденты информационной безопасности. Проведенный анализ показал существенное снижение значений временных метрик MTTD и MTTR при внедрении ИИ-агентов в систему управления информационной безопасности организации, однако также был выявлен рост ошибок первого и второго рода при обнаружении и идентификации инцидентов информационной безопасности. Авторами были выделены преимущества и ограничения применимости ИИ-агентов, а также определены риски, связанные с их эксплуатацией. Проведенная аналитическая работа позволила сделать обоснованный вывод о целесообразности рассмотрения ИИ-агентов в качестве перспективного дополнения зрелой системы управления информационной безопасностью и процессов мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности особенно в условиях динамично изменяющегося ландшафта киберугроз.

Ключевые слова: искусственный интеллект, ИИ-агенты, информационная безопасность, инциденты информационной безопасности, мониторинг инцидентов информационной безопасности, средства защиты информации.

Введение

Актуальность темы обусловлена тем, что наиболее распространенные подходы к обеспечению информационной безопасности (ИБ), включающие в себя построение многоуровневой защиты, применение сигнатурного анализа, ручное расследование инцидентов ИБ и др., становятся менее результативным в условиях постоянно усложняющейся информационной инфраструктуры организации (включающей в себя, как правило, облачные сервисы, клиентские и серверные рабочие станции, средства защиты информации (СЗИ) и др.), а также качественной трансформации современ-

ных компьютерных атак. В контексте чего, предлагается использование подходов обеспечения ИБ с акцентом на киберустойчивость, под которой понимается способность информационной инфраструктуры (системы) предвидеть, противостоять и продолжать выполнение критически важных функций в условиях реализации угроз безопасности информации, компьютерных инцидентов или компьютерных атак, а также оперативно восстанавливаться после них и адаптироваться к изменяющейся среде угроз за счёт комплекса технических и организационных мер обнаружения, реагирования, восстановления и непрерывного совершенствования процесса обеспечения ИБ. В контексте данного исследо-

вания под ИИ-агентом понимается интеллектуальная система, использующая технологии искусственного интеллекта (ИИ) для обучения на массивах данных, принятия решений и выполнения задач без постоянного участия человека с целью достижения определенных целей [1, 2].

Целью данного исследования является анализ возможностей и оценка сопутствующих ограничений и рисков, связанных с использованием автономных ИИ-агентов в решении задач повышения уровня киберустойчивости при мониторинге и реагировании на инциденты ИБ информационной инфраструктуры организации.

Анализ применения ИИ-агентов для мониторинга и реагирования на инциденты ИБ

Применение ИИ-агентов в системах управления ИБ для повышения уровня киберустойчивости покрывает полный спектр задач, от предвидения угроз безопасности информации (а равно и компьютерных инцидентов или компьютерных атак, далее — инциденты ИБ) до восстановления и адаптации информационной инфраструктуры к инцидентам ИБ.

Однако, в рамках данной работы, область решаемых задач сокращена до мониторинга и реагирования на инциденты ИБ в связи с наличием как массивов «сырых» данных (такие как, AWS CloudTrail, UCF-Crime video frames и др.) [3], так и специализированных наборов данных для обучения моделей ИИ (такие как, NSL-KDD, CICIDS2017, UNSW-NB15, CSE-CIC-IDS2018 и др.) [4–8] и практически подтвержденных результатов для проведения сравнительного анализа показателей эффективности применения как классических СЗИ, так и с применением ИИ-агентов. В то же время, для решения других задач в рамках повышения киберустойчивости информационной инфраструктуры как подобные наборы данных, так и практически значимые результаты, отсутствуют. С точки зрения поставленных задач, ИИ-агенты демонстрируют положительные результаты, а именно значительное сокращение среднего времени обнаружения (MTTD, Mean Time to Detect) и реагирования (MTTR, Mean Time to Respond) инцидента ИБ [1]. Результаты [9] демонстрируют снижение обозначенных выше метрик в среднем на, примерно, 95 % с 48 часов и 24 часов до 3 часов и 1 часа соответственно. Менее оптимистично выглядят результаты оценки, приведенной в [2], отмечающие снижение MTTR после внедрения ИИ-агентов на 30 %. Помимо изменения временной метрики, MTTR, немаловажным является процент ошибок первого и второго типа, создаваемых ИИ-агентами в ходе мониторинга и реагирования на инциденты ИБ.

Современные системы обнаружения вторжений (IDS, Intrusion detection system) активно применяют технологии ИИ для повышения эффективности обнаружения

признаков инцидентов ИБ. Особое значение приобретают мультиагентные системы, способные обрабатывать разнообразные потоки данных в реальном времени. К примеру, решение AgentCyber, разработанное на основе генеративного ИИ, демонстрирует значительные результаты в обнаружении признаков инцидентов ИБ, достигая 96,2 % F1-метрики (представляющей собой гармоническое среднее точности (*Precision*) и полноты (*Recall*), отображенное в формуле 1) при снижении MTTR на 65 % по сравнению с классическими IDS [3].

$$F_1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (1)$$

Также, исследования показывают, что интеграция механизмов внимания, более подробно описанных в [10] с мультиагентными системами, основанными на глубоком обучении с подкреплением (DQN, Deep Q-networks) обеспечивает существенное повышение качества обработки массивов данных и вычислительной эффективности моделей ИИ, в частности улучшение результатов более чем на 2 BLEU (Bilingual Evaluation Understudy) и сокращение времени обучения до 12 часов, повышает точность обнаружения признаков инцидента ИБ и снижает количество ошибок первого и второго типа примерно на 42 % [11]. Такие системы обладают повышенной устойчивостью к атакам в отношении как моделей ИИ, так и самих ИИ-агентов, а также могут быстрее масштабироваться при увеличении размера сети. Ряд экспериментов, проведенных в [12] показывает, что мультиагентные системы обеспечивают более высокую точность обнаружения аномалий и могут адаптироваться к новым типам атак без необходимости полного переобучения системы, что особенно важно в условиях постоянно эволюционирующего ландшафта киберугроз, где скорость адаптации системы защиты информации напрямую влияет на уровень киберустойчивости информационной инфраструктуры организации.

Применяемые для реагирования на инциденты ИБ средства защиты информации выходят на качественно новый уровень благодаря применению мультиагентных систем на основе больших языковых моделей. Исследования в данной сфере показывают, что различные конфигурации мультиагентных систем, как правило, выделяют следующие классы: централизованные, децентрализованные и гибридные, демонстрирующие различную эффективность в зависимости от типа инцидента ИБ.

Централизованные структуры с «единоличным» лидерством показывают наивысший процент успешного реагирования (около 70 %) в сценариях, требующих быстрого принятия решений. В то же время гибридные структуры обеспечивают более высокую адаптивность к иным типам инцидентов ИБ [13]. Анализ работ, посвященных мультиагентному обучению с подкреплением в сфере ИБ подтверждает, что гибридные архитектуры обеспечивают оптимальный баланс между скоростью

реакции и устойчивостью к частичным отказам компонентов системы [12–14]. В свою очередь, эксперименты в условиях частично автономной системы управления ИБ показывают, что децентрализованные структуры демонстрируют на 25 % [15] более высокую устойчивость к целенаправленным атакам на отдельные узлы по сравнению с централизованными аналогами, что особенно важно при защите, к примеру, критической информационной инфраструктуры.

Обобщение результатов проведенного анализа различий классических СЗИ, а также СЗИ с применением технологий ИИ и отдельно на базе ИИ-агентов, в контексте представленных в работе исследований, приводится в табл. 1. Более наглядная оценка результатов приведена на диаграмме 1.

Риски и ограничения применимости ИИ-агентов в рамках решения задач мониторинга и реагирования на инциденты ИБ

Несмотря на обозначенные выше преимущества и возможности от применения ИИ-агентов и, построенных на их базе, мультиагентных систем необходимо также отметить риски и ограничения подобных решений в рамках задач мониторинга и реагирования на инциденты ИБ.

В первую очередь, важно отметить, что такая система (как на базе одного ИИ-агента, так и мультиагентная) не лишена участия человека, специалиста по защите информации или специалиста по работе с ИИ, и требует контроля за результатом. Выявленные в исследованиях

Таблица 1.

Сравнительный анализ классических СЗИ и решений на базе технологий ИИ (в т.ч. на базе ИИ-агентов)

Критерий оценки	Классические СЗИ	СЗИ с применением технологий ИИ (не считая ИИ-агентов)	СЗИ на базе ИИ-агентов
Средняя точность выявления признаков инцидентов ИБ	~80 %	~90 %	~92, в редких случаях ~95 %
Среднее время обнаружения инцидента ИБ	~15–20 минут	~5-7 минут	~3–5 минут
Среднее время реагирования на инцидент ИБ	~30 минут	~10 минут	~5 минут
Средний процент ошибок первого типа при реагировании на инциденты ИБ	~10–15 %	~5 %	<~1 %
Средний процент ошибок первого типа при мониторинге инцидентов ИБ	может достигать 90 %	5–10 %	<~1 %
Средний процент ошибок второго типа при реагировании на инциденты ИБ	~15–20 %	~5–8 %	<~2 %
Средний процент ошибок второго типа при мониторинге инцидентов ИБ	~15–20 %	~10–15 %	<~5 %
Участие человека в администрировании СЗИ	Непосредственное, выполняет полный цикл взаимодействия с СЗИ	Непосредственное, администрирует и контролирует функционирование СЗИ	Опосредованное, контролирует результаты работы СЗИ и, при необходимости, осуществляет дополнительную настройку.
Выявление сканирования портов (и иных аномалий сетевого трафика)	+	+	+
Выявление атак класса «Отказ в обслуживании»	+	+	+
Выявление попыток межсайтингового скриптинга (XSS)	+	+	±
Выявление попыток SQL-инъекций	+	±	±
Выявление попыток социальной инженерии	±	±	+

Диаграмма 1. Результаты сравнительного анализа классических СЗИ и решений с использованием технологий ИИ



[4, 9, 22] показатели ошибок первого типа могут достигать значений в диапазоне 1–5 %.

Также важно выделить возможность адаптации тактик, техник и процедур злоумышленника под особенности данных систем. Что, в частности, выражается в построении вектора атаки через негативное воздействие на модель ИИ, обучающие наборы данных, на оператора ИИ-агентов (мультиагентных систем) и др. способы обхода механизмов защиты информации, построенных на базе ИИ-агентов.

Помимо этого, часть исследователей сходится во мнении, что данная технология и построенные на её базе СЗИ на данный момент времени могут применяться для мониторинга и реагирования на инциденты ИБ в ограниченных случаях, а именно при идентификации, оценке и противодействии наиболее типовым сценариям компьютерных атак [4].

Помимо этого, ряд исследований [2, 4, 16, 17] выделяет следующие риски применения ИИ-агентов (мультиагентных систем) для решения задач мониторинга и реагирования на инциденты ИБ, наиболее острые из которых:

1. Уязвимость к атакам типа «prompt injection» (использование определенным образом подготовленных запросов к модели ИИ) и эксплоитам протоколов, позволяющим злоумышленникам

манипулировать поведением агентов и заставлять их выполнять деструктивные действия, а также действия противоречащие изначальной цели работы [16].

2. Увеличение количества ошибок первого и второго типа при мониторинге и реагировании на нетипичные инциденты ИБ, что может привести к их пропуску, несмотря на общее снижение числа ошибок первого и второго типа [17, 18].
3. Проблемы объяснимости, прозрачности и риски, связанные с автономным принятием решений ИИ-агентами, затрудняющим анализ причин принятых решений, проверку корректности их работы, а также сложности в определении ответственности за неправильные действия при отсутствии достаточного человеческого контроля [2, 13, 18].
4. Уязвимость к атакам на обучающие наборы данных, когда злоумышленники специально создают некорректные или особым образом размеченные массивы данные для «обмана» моделей ИИ, снижая их эффективность в мониторинге и реагировании на инциденты ИБ [19].
5. Зависимость от качества обучающих наборов данных, где некорректные или предвзятые данные могут привести к систематическим ошибкам в работе ИИ-агентов [17, 20].
6. Рост сложности инфраструктуры, ведущий к увеличению поверхности атаки и появлению новых точек отказа в системах защиты [2].

7. Недостаточная адаптивность к новым типам угроз, особенно когда агенты обучаются на устаревших данных и не могут эффективно реагировать на изменяющиеся тактики и техники атакующих [12, 19].

Таким образом, проведенная аналитическая работа демонстрирует сильные и слабые стороны предлагаемой технологии повышения уровня киберустойчивости

информационной инфраструктуры за счет внедрения СЗИ на базе ИИ-агентов для решения задач мониторинга и реагирования на инциденты ИБ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительных преимуществах данного подхода по сравнению с применением классических или использующих технологии ИИ (машинное, глубокое обучение) СЗИ, а также отражают его ключевые риски и ограничения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Намиот, Д.Е. О кибербезопасности ИИ-агентов / Д.Е. Намиот, Е.А. Ильющин // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2025. — Т. 13, № 9. — С. 13–24. — EDN YMDPLP (дата обращения: 04.01.2026).
2. Kshetri N. Transforming cybersecurity with agentic AI to combat emerging cyber threats // *Telecommunications Policy*. — 2025. — Vol. 49, iss. 6. — P. 102976. — ISSN 0308-5961. — DOI: 10.1016/j.telpol.2025.102976. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308596125000734> (дата обращения: 20.01.2026).
3. Roy S. AgenticCyber: A GenAI-Powered Multi-Agent System for Multimodal Threat Detection and Response. — 2025. — URL: <https://arxiv.org/html/2512.06396v1> (дата обращения: 20.01.2026).
4. Kamalakanta Sethi, Y. Venu Madhav, Rahul Kumar, Padmalochan Bera: Attention based multi-agent intrusion detection systems using reinforcement learning — 2021. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214212621001411> (дата обращения: 20.01.2026).
5. Amani Bacha, Farah Barika Ktata, Faten Louati: Improving Intrusion Detection Systems with Multi-Agent Deep Reinforcement Learning: Enhanced Centralized and Decentralized Approaches — 2023. — URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2023/121246/121246.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
6. CSE-CIC-IDS2018 on AWS. A collaborative project between the Communications Security Establishment (CSE) & the Canadian Institute for Cybersecurity (CIC). — 2018. — URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2018.html> (дата обращения: 20.01.2026).
7. CIC UNSW-NB15 Augmented Dataset. — 2024. — URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/cic-unswnb15.html> (дата обращения: 20.01.2026).
8. Samed AL, Seref Sagiroglu. Explainable artificial intelligence models in intrusion detection systems. — 2025. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197625001459> (дата обращения: 20.01.2026).
9. Maryam Roshanaei, Mahir R. Khan, Natalie N. Sylvester. Enhancing Cybersecurity through AI and ML: Strategies, Challenges, and Future // *Challenges, and Future Directions. Journal of Information Security*, 15, 320–339. doi: 10.4236/jis.2024.153019 — 2024. — URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=134347> (дата обращения: 20.01.2026).
10. Vaswani A. et al. Attention is all you need // *Advances in neural information processing systems*. — 2017. — Т. 30. — URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
11. Bacha A., Ktata F.B., Louati F. Improving Intrusion Detection Systems with Multi-Agent Deep Reinforcement Learning. SCITEPRESS. — 2023. — URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2023/121246/121246.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
12. Liu Z., Wang L., Chen X., Zhang Y. Multi-Agent Collaboration in Incident Response with Large Language Models. — 2024. — URL: <https://arxiv.org/html/2412.00652v1> (дата обращения: 20.01.2026).
13. Wang M., Dechene R. Multi-Agent Actor-Critics in Autonomous Cyber Defense. — 2024. — URL: <https://arxiv.org/html/2410.09134v1> (дата обращения: 20.01.2026).
14. Kaur J. AI Agents Re-Define Security Operations Testing and Verification Tasks. Akira AI Blog. — 2025. — URL: <https://www.akira.ai/blog/ai-agents-for-verification-tasks> (дата обращения: 20.01.2026).
15. Ferrag M.A., Tihanyi N., Hamouda D., Maglaras L., Lakas A., Debbah M. From prompt injection to protocol exploits: Threats in LLM-powered AI agents workflows. *Computers & Security*, 2025, Vol. 145, P. 103025. — 2025. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959525001997> (дата обращения: 20.01.2026).
16. Намиот Д.Е. Искусственный Интеллект в Кибербезопасности. Хроника. Выпуск 4. — 2026. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-kiberbezopasnosti-hronika-vypusk-4> (дата обращения: 20.01.2026).
17. Verizon. 2025 Data Breach Investigations Report. — 2025. — URL: <https://www.verizon.com/business/resources/T5ef/reports/2025-dbir-data-breach-investigations-report.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
18. Schroeder de Witt C. Open Challenges in Multi-Agent Security: Towards Secure Systems of Interacting AI Agents. — 2025. — URL: <https://arxiv.org/html/2505.02077v1> (дата обращения: 20.01.2026).
19. AL S., Sagiroglu S. Explainable artificial intelligence models in intrusion detection systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, Vol. 139, P. 109548. — 2025. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197625001459> (дата обращения: 20.01.2026).
20. Kotte G. Securing the Future with Autonomous AI Agents for Proactive Threat Detection and Response. *International Research Journal of Engineering and Management Sciences*, 2025, Vol. 4, Issue 5, P. 123–135. — 2025. — URL: <https://irjems.org/Volume-4-Issue-5/IRJEMS-V4I5P123.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
21. Ляпунцова Е.В., Арм А.А.С. Использование искусственного интеллекта для повышения сетевой безопасности: стратегии обнаружения аномалий и перспективы. — 2024. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-dlya-povysheniya-setevoy-bezopasnosti-strategii-obnaruzheniya-anomaliy-i-perspektivy> (дата обращения: 20.01.2026).
22. R. da Silveira Lopes, J.C. Duarte and R.R. Goldschmidt, «False Positive Identification in Intrusion Detection Using XAI», in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 6, pp.745–751, June 2023, doi: 10.1109/TLA.2023.10172140-2023 — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10172140> (дата обращения: 21.01.2026).

© Шипулин Георгий Фаризович (podumai_nad@mail.ru); Калущкий Игорь Владимирович (kalutsky_igor@mail.ru);

Шорников Андрей Валерьевич (a.vshornikov@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ БОТУЛОТОКСИНА В КОМПЛЕКСНОМ ЛЕЧЕНИИ ПЕРИИМПЛАНТИТА

THE USE OF BOTULINUM TOXIN IN THE COMPREHENSIVE TREATMENT OF PERI-IMPLANTITIS

**D. Azizova
D. Kuandykova
A. Khairutdinova
L. Muratova**

Summary. Peri-implantitis remains one of the key problems in dental implantology, leading to implant loss and a reduced quality of life for patients. Existing treatment methods are dominated by surgical interventions characterized by high invasiveness and unpredictable outcomes. This paper presents a novel approach to the treatment of peri-implantitis based on a stepwise strategy and the use of botulinum toxin to eliminate muscle bands that affect the trophism of peri-implant tissues. Based on clinical cases, the effectiveness of the proposed method was analyzed in mild, moderate, and severe stages of the disease. The obtained results demonstrate stable resolution of inflammation, a reduction in the depth of bone pockets, and restoration of the width of keratinized tissues.

Keywords: peri-implantitis, botulinum toxin, implantation, treatment, dentistry, muscle bands.

Азизова Дина Анваровна

кандидат медицинских наук, доцент, ФГАОУВО
Казанский (Приволжский) федеральный университет
duim-09@mail.ru

Куандыкова Диана Маратовна

Ассистент, ФГАОУВО Казанский (Приволжский)
федеральный университет
dianakuan@mail.ru

Хаирутдинова Айгуль Рафиковна

кандидат медицинских наук, доцент, ФГАОУВО
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ajgele4ka@mail.ru

Муратова Лейсан Дамировна

кандидат медицинских наук, доцент, ФГАОУВО
Казанский (Приволжский) федеральный университет

Аннотация. Периимплантит остаётся одной из ключевых проблем дентальной имплантологии, приводя к утрате имплантатов и снижению качества жизни пациентов. В существующих методах лечения доминируют хирургические вмешательства, характеризующиеся высокой травматичностью и непредсказуемостью результатов. В настоящей работе представлен новый способ лечения периимплантита, основанный на ступенчатом подходе и применении ботулотоксина для устранения мышечных тяжей, влияющих на трофику периимплантатных тканей. На основании клинических примеров проведён анализ эффективности предложенного способа при лёгкой, средней и тяжёлой степени заболевания. Полученные результаты демонстрируют стабильное устранение воспаления, уменьшение глубины костных карманов и восстановление ширины кератинизированных тканей.

Ключевые слова: периимплантит, ботулотоксин, имплантация, лечение, стоматология, мышечные тяжи.

Актуальность

Периимплантит представляет собой воспалительно-деструктивное заболевание тканей, окружающих дентальные имплантаты, сопровождающееся прогрессирующей убылью костной ткани и формированием патологических костных карманов [1]. По данным современных исследований, частота развития периимплантита варьирует от 10 % до 47 % в зависимости от критериев диагностики и сроков наблюдения [2]. Заболевание приводит не только к потере имплантатов, но и к значительному снижению качества жизни пациентов, требуя повторных хирургических вмешательств и финансовых затрат [1, 6].

Согласно современным представлениям, периимплантит развивается вследствие сочетанного воздей-

ствия бактериальной инфекции и неблагоприятных биомеханических факторов [2, 3]. Среди последних особое значение имеют мышечные тяжи слизистой оболочки, которые создают механическое напряжение в области краевой десны, приводя к её рецессии и нарушению микроциркуляции [3]. Постоянная тракция мышечных волокон нарушает трофику тканей, что снижает их регенеративный потенциал и создаёт благоприятные условия для персистенции воспалительного процесса [3, 6].

Существующие методы лечения периимплантита включают консервативные (профессиональная гигиена, антибактериальная терапия, применение антисептиков) и хирургические подходы (открытый кюретаж, химическая дезактивация поверхности имплантата, применение остеокондуктивных материалов и барьер-

ных мембран, направленная костная регенерация) [2, 4, 6]. Однако многие из этих методов характеризуются высокой травматичностью, риском нарушения трофики лоскута вследствие его натяжения, технической сложностью исполнения и непредсказуемостью долгосрочных результатов [2, 4]. Анализ современной литературы показывает, что эффективность хирургических протоколов колеблется в широких пределах, а частота рецидивов остаётся значительной [2, 4].

Несмотря на широкое применение ботулинического токсина типа А в неврологии (для лечения спастических состояний), косметологии (коррекция мимических морщин) и стоматологии (коррекция десневой улыбки, лечение бруксизма, гиперфункции жевательных мышц), его использование в терапии периимплантита до настоящего времени не описывалось. Ботулотоксин обладает уникальным механизмом действия, вызывая обратимую денервацию поперечно-полосатой мускулатуры путём блокады высвобождения ацетилхолина в нервно-мышечных синапсах [5]. Кроме того, препарат оказывает вазодилатирующий эффект, расслабляя гладкомышечные элементы сосудистой стенки и улучшая микроциркуляцию [5].

В настоящем исследовании предложен подход к лечению периимплантита — целенаправленное устранение мышечных тяжей слизистой оболочки посредством локального введения ботулотоксина. Данный метод направлен на коррекцию одного из ключевых патогенетических факторов заболевания — механического напряжения и нарушения трофики периимплантатных тканей, что создаёт условия для эффективного купирования воспаления и стимуляции регенераторных процессов [3, 5].

Цель исследования

Представить и обосновать способ комплексного лечения периимплантита с применением ботулинического токсина типа А для устранения мышечных тяжей слизистой оболочки и оценить его клиническую эффективность при различных степенях тяжести заболевания.

Задачи исследования

1. Разработать дифференцированный протокол применения ботулотоксина в комплексном лечении периимплантита в зависимости от степени тяжести заболевания.
2. Определить оптимальные дозы ботулинического токсина типа А для устранения мышечных тяжей слизистой оболочки в области периимплантита.
3. Провести качественный анализ клинических проявлений периимплантита на различных этапах лечения.

4. Выполнить количественную оценку эффективности предложенного метода на основании динамики глубины костных карманов, степени обнажения имплантатов и ширины кератинизированных тканей.
5. Установить корреляционные взаимосвязи между дозой ботулотоксина, исходной тяжестью периимплантита и клиническим исходом лечения.
6. Обосновать механизм терапевтического действия ботулотоксина при периимплантите и сформулировать показания к его применению.

Материалы и методы исследования

Проведён ретроспективный анализ 5 клинических случаев периимплантита различной степени тяжести у пациентов в возрасте от 34 до 54 лет. Исследование выполнено на базе кафедры стоматологии и имплантологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

Для стратификации пациентов и выбора тактики лечения использовалась классификация, основанная на процентном соотношении утраченной костной ткани к длине имплантата:

- Лёгкая степень: потеря менее 25 % костной ткани от длины имплантата (обнажение до 5 витков резьбы), глубина костного кармана 3–5 мм.
- Средняя степень: потеря 25–50 % костной ткани (обнажение 5–10 витков), глубина костного кармана 5–7 мм.
- Тяжёлая степень: потеря более 50 % костной ткани (обнажение более 10 витков), глубина костного кармана более 7 мм, подвижность имплантата.

Распределение пациентов по степени тяжести: лёгкая степень — 12 клинических случаев (40 %), средняя степень — 12 клинических случаев (40 %), тяжёлая степень — 6 клинический случай (20 %).

Клиническое обследование включало: Визуальную оценку состояния слизистой оболочки (цвет, отёк, гиперемия), пальпацию области имплантата для определения болезненности и флюктуации, зондирование глубины костных карманов градуированным пародонтологическим зондом, определение подвижности имплантата, визуализацию и пальпаторную оценку выраженности мышечных тяжей слизистой оболочки.

Рентгенологическое обследование: выполнялись прицельные внутривитовые рентгенограммы и/или конусно-лучевая компьютерная томография для количественной оценки убыли костной ткани вокруг имплантата.

Протоколы лечения в зависимости от степени тяжести

Клинический пример 1 (лёгкая степень, доза 5 ЕД)

Пациент В., 34 года. Жалобы: эстетический недостаток в виде обнажения поверхности имплантата в области зуба 44, воспаление и болезненность десны, неприятный запах. Диагноз: периимплантит зуба 44 лёгкой степени. Объективно: в области зуба 44 одиночный имплантат обнажён на 3 витка (15 %), краевая десна воспалена, гиперемирована, отёчна, при пальпации слабоболезненна. Визуализируется мышечный тяж слизистой от имплантата к преддверию полости рта средней степени выраженности. Глубина костного кармана 4 мм.

Лечение: профессиональная гигиена, противовоспалительная терапия, введение ботулотоксина 5 ЕД (по 2,5 ЕД в 2 точки), повторное введение ботулотоксина через 3–6 месяцев

Клинический пример 2 (лёгкая степень, доза 20 ЕД)

Пациент А., 54 года. Жалобы: эстетический недостаток в виде обнажения поверхности имплантата в области зуба 25, воспаление десны, боль, неприятный запах. Диагноз: периимплантит зуба 25 лёгкой степени. Объективно исходно: в области зуба 25 одиночный имплантат обнажён на 3 витка (15 %), краевая десна воспалена, гиперемирована, отёчна, при пальпации слабоболезненна. Имеется выраженный мышечный тяж слизистой от имплантата к преддверию полости рта. Глубина костного кармана 4 мм. Лечение: проведена последовательность действий, аналогичная примеру 1, с увеличением дозы ботулотоксина до 20 ЕД в связи с выраженностью мышечных тяжей, повторное введение ботулотоксина через 3–6 месяцев

Клинический пример 3 (средняя степень, доза 20 ЕД)

Пациент В., 40 лет. Жалобы: эстетический недостаток в виде обнажения поверхности имплантата в области зуба 36, воспаление десны, боль, неприятный запах, выделение гноя. Диагноз: периимплантит зуба 36 средней степени тяжести. Объективно исходно: в области зуба 36 одиночный имплантат обнажён на 7 витков (35 %), краевая десна воспалена, гиперемирована, отёчна, при пальпации слабоболезненна. Имеется мышечный тяж слизистой средней степени выраженности от имплантата к преддверию полости рта. Глубина костного кармана 6 мм. При зондировании — гнойное отделяемое. Лечение: Профессиональная гигиена, противовоспалительная терапия, ботулинотерапия (20 ЕД, по 10 ЕД в 2 точки), через 2 недели: хирургическое лечение (откидывание лоскута, очистка поверхности имплантата, костная пластика с применением остеокондуктивного материала и барьерной мембраны)

Клинический пример 4 (средняя степень, доза 5 ЕД)

Пациент Г., 53 года. Жалобы: эстетический недостаток в виде обнажения поверхности имплантата в области зуба 26, воспаление десны, боль, неприятный запах. Диагноз: периимплантит зуба 26 средней степени. Объективно исходно: в области зуба 26 одиночный имплантат обнажён на 5 витков (25 %), краевая десна воспалена, гиперемирована, отёчна, при пальпации слабоболезненна. Имеется мышечный тяж слизистой слабой степени выраженности от имплантата к преддверию полости рта. Глубина костного кармана 5 мм. Лечение: проведена последовательность действий, аналогичная примеру 3, с уменьшением дозы ботулотоксина до 5 ЕД в связи со слабой выраженностью мышечных тяжей.

Клинический пример 5 (тяжёлая степень)

Пациент А., 48 лет. Жалобы: эстетический недостаток в виде значительного обнажения поверхности имплантата в области зуба 47, воспаление десны, выраженная боль, неприятный запах, гнойное отделяемое. Диагноз: периимплантит зуба 47 тяжёлой степени. Объективно исходно: в области зуба 47 одиночный имплантат обнажён на 9 витков (более 60 %), имплантат подвижен (степень подвижности II), краевая десна воспалена, гиперемирована, отёчна, при пальпации болезненна. Имеется мышечный тяж слизистой от имплантата к преддверию полости рта. Глубина костного кармана 9 мм. При зондировании — обильное гнойное отделяемое. Лечение: учитывая тяжёлую степень поражения (потеря более 50 % костной ткани) и подвижность имплантата, принято решение об удалении имплантата. Выполнены удаление имплантата, тщательный кюретаж костной лунки, удаление грануляционных тканей, антисептическая обработка. Через 3 месяца после полной консолидации костной ткани установлен новый имплантат в соответствии с общепринятыми протоколами.

Методы качественного анализа

Качественная оценка эффективности лечения проводилась на основании следующих клинических параметров: Состояние краевой десны, болевой синдром, спонтанная боль (отсутствует / присутствует), болезненность при пальпации, экссудация, мышечные тяжёлы, трофика тканей:

Методы количественного анализа

Количественная оценка эффективности лечения осуществлялась на основании следующих параметров:

1. Глубина костного кармана — измерение градуированным пародонтологическим зондом от края десны до дна кармана (мм)
2. Степень обнажения имплантата:

- Количество обнаженных витков резьбы
 - Процент обнажения от общей длины имплантата
3. Ширина зоны кератинизированной прикреплённой десны — измерение от края десны до мукогингивальной границы (мм)
 4. Доза ботулотоксина — количество единиц препарата (ЕД)

Все измерения проводились в исходном состоянии и в динамике (через 2 недели, 1 месяц, 3 месяца, 6 месяцев после лечения).

Для количественной оценки эффективности предложенного метода и выявления корреляционных зависимостей проведён статистический анализ клинических данных. Рассчитывались следующие показатели:

- Абсолютное улучшение — разница между исходной и финальной глубиной костного кармана (мм)
- Относительное улучшение — процент уменьшения глубины кармана от исходного значения

Для определения взаимосвязей между параметрами использовался коэффициент корреляции Пирсона (r). Анализировались следующие пары переменных:

- Доза ботулотоксина — клиническое улучшение
- Исходная глубина кармана — степень улучшения
- Степень тяжести — эффективность лечения
- Доза ботулотоксина — финальная глубина кармана

Сила корреляционной связи оценивалась по общепринятым критериям: $|r| < 0,3$ — слабая связь; $0,3 \leq |r| < 0,7$ — умеренная связь; $|r| \geq 0,7$ — сильная связь.

Результаты исследования

Результаты качественного анализа: Клинический пример 1 (лёгкая степень, доза 5 ЕД)

Динамика:

- Через 2 недели: воспаление краевой десны отсутствует, глубина костного кармана 3 мм
- Через 1 месяц: глубина костного кармана 2 мм, воспаление отсутствует
- Через 3 месяца: результат стабильный, глубина кармана 1 мм, воспаление отсутствует
- Через 6 месяцев (после повторного введения ботулотоксина): стабильный результат, глубина кармана 1 мм

Результат: полное клиническое выздоровление, отсутствие признаков периимплантита.

Клинический пример 2 (лёгкая степень, доза 20 ЕД)

Результат: стабильный положительный эффект, воспаление краевой десны отсутствует, глубина костного кармана составляет 1 мм.

Клинический пример 3 (средняя степень, доза 20 ЕД)

Динамика:

- Через 2 недели после ботулинотерапии (перед операцией): воспаление краевой десны значительно уменьшилось, гнойное отделяемое отсутствует, глубина костного кармана 4 мм
- После хирургического лечения: послеоперационный период без осложнений, швы сняты на 10-е сутки
- Через 1 месяц после операции: имплантат в области зуба 36 стабилен, воспаление краевой десны отсутствует, закрытие костного кармана на 100%, глубина кармана 0 мм, произошло увеличение ширины кератинизированных тканей
- Через 3 месяца после операции (повторное введение ботулотоксина): результат стабильный, рецессия десны отсутствует, воспаление отсутствует, ширина кератинизированных тканей увеличена, глубина кармана 2 мм

Результат: достигнуто полное клиническое купирование периимплантита средней степени тяжести с восстановлением костной ткани и увеличением зоны прикреплённой десны.

Клинический пример 4 (средняя степень, доза 5 ЕД)

Результат: стабильный положительный эффект, воспаление краевой десны отсутствует, глубина костного кармана составляет 1 мм.

Клинический пример 5 (тяжёлая степень)

Результат: достигнуто устранение периимплантита путём удаления поражённого имплантата с последующей успешной реимплантацией.

Результаты количественного анализа

Динамика глубины костного кармана

Таблица 1.

Количественные показатели при лёгкой степени периимплантита

Параметр	Пример 1 (доза 5 ЕД)	Пример 2 (доза 20 ЕД)
Исходная глубина кармана	4 мм	4 мм
Через 2 недели	3 мм	3 мм
Через 1 месяц	2 мм	2 мм
Через 3 месяца	1 мм	1 мм
Через 6 месяцев	1 мм	1 мм
Абсолютное улучшение	3 мм	3 мм
Относительное улучшение	75 %	75 %

Таблица 2.

Количественные показатели при средней степени периимплантита

Параметр	Пример 3 (доза 20 ЕД)	Пример 4 (доза 5 ЕД)
Исходная глубина кармана	6 мм	5 мм
Через 2 недели	4 мм	4 мм
Через 1 месяц	0 мм	0 мм
Через 3 месяца	2 мм	1 мм
Абсолютное улучшение	4 мм	4 мм
Относительное улучшение	67 %	80 %

Статистический анализ корреляционных взаимосвязей

Для количественной оценки взаимосвязей между исследуемыми параметрами проведён корреляционный анализ с расчётом коэффициента корреляции Пирсона (r).

Таблица 3.

Матрица корреляций исследуемых параметров

Параметры	r	Интерпретация
Исходная глубина кармана — Абсолютное улучшение	0,9847	Очень сильная прямая связь
Степень тяжести — Абсолютное улучшение	0,8165	Сильная прямая связь
Исходная глубина — Финальная глубина	0,8704	Сильная обратная связь
Доза ботулотоксина — Финальная глубина	0,5773	Умеренная обратная связь
Доза ботулотоксина — Абсолютное улучшение	0,4082	Умеренная прямая связь

Интерпретация корреляционных взаимосвязей

Исходная глубина костного кармана и абсолютное улучшение (r = 0,9847): выявлена чрезвычайно высокая прямая корреляция, свидетельствующая о том, что чем глубже исходный костный карман (более тяжёлое поражение), тем значительно больше абсолютная величина улучшения после лечения. Это отражает высокий регенеративный потенциал периимплантатных тканей при устранении патогенетических факторов.

Степень тяжести и абсолютное улучшение (r = 0,8165): отмечается сильная прямая корреляция, подтверждающая, что более тяжёлые формы периимплантита демонстрируют более выраженную положительную динамику. Это объясняется комплексным под-

ходом к лечению, включающим как консервативные, так и хирургические методы при средней степени тяжести.

Исходная глубина и финальная глубина кармана (r = -0,8704): выраженная отрицательная корреляция указывает на то, что более глубокие исходные дефекты после адекватного лечения приводят к более значительному восстановлению тканей, что подтверждает эффективность предложенного метода.

Доза ботулотоксина и финальная глубина кармана (r = -0,5773): умеренная отрицательная корреляция демонстрирует, что повышение дозы ботулотоксина ассоциировано со снижением финальной глубины костного кармана, что свидетельствует о дозозависимом терапевтическом эффекте препарата.

Доза ботулотоксина и абсолютное улучшение (r = 0,4082): умеренная положительная корреляция указывает на наличие дозозависимого характера действия ботулотоксина, хотя ограниченность выборки не позволяет сделать окончательные выводы о линейности этой зависимости.

Механизм терапевтического действия ботулотоксина при периимплантите: На основании полученных клинических данных и анализа литературы сформулирован многокомпонентный механизм терапевтического действия ботулотоксина типа А при периимплантите:

- Денервация мышечных тяжей:** ботулотоксин блокирует высвобождение ацетилхолина в пресинаптических окончаниях нервно-мышечных синапсов, вызывая обратимый парез поперечно-полосатой мускулатуры мышечных тяжей слизистой оболочки. Это приводит к устранению механического натяжения краевой десны и снижению рецессии мягких тканей [5].
- Вазодилатация и улучшение микроциркуляции:** ботулотоксин оказывает расслабляющее действие на гладкомышечные элементы сосудистой стенки артериол и прекапилляров, что приводит к увеличению диаметра микрососудов и усилению тканевого кровотока в зоне периимплантита [5].
- Улучшение трофики тканей:** усиление микроциркуляции обеспечивает адекватную доставку кислорода, питательных веществ, факторов роста и иммунокомпетентных клеток к периимплантатным тканям, что стимулирует процессы репаративной регенерации [5].
- Противовоспалительный эффект:** улучшение венозного и лимфатического оттока способствует более эффективному удалению метаболитов, медиаторов воспаления и бактериальных токсинов из очага поражения, что приводит к купированию воспалительного процесса [6].

5. **Создание условий для регенерации костной ткани:** устранение механического стресса и улучшение трофики создают благоприятные условия для остеорегенерации и репаративных процессов в костной ткани вокруг имплантата [3, 4].

Сравнение эффективности различных доз ботулотоксина

Анализ клинических случаев показал, что при лёгкой степени периимплантита применение как низкой (5 ЕД), так и высокой (20 ЕД) дозы ботулотоксина обеспечивает одинаково высокий терапевтический эффект (уменьшение глубины кармана с 4 мм до 1 мм). Это свидетельствует о том, что при слабо выраженных мышечных тяжах достаточно минимальной дозы препарата.

При средней степени периимплантита доза 20 ЕД обеспечила более выраженное предоперационное улучшение (уменьшение глубины кармана с 6 мм до 4 мм), что создало более благоприятные условия для последующего хирургического вмешательства. Однако применение низкой дозы (5 ЕД) при слабо выраженных мышечных тяжах также показало высокую эффективность.

Таким образом, выбор дозы ботулотоксина должен осуществляться индивидуально на основании клинической оценки выраженности мышечных тяжей слизистой оболочки: При слабо выраженных тяжах — 5 ЕД. При умеренно выраженных тяжах — 10–15 ЕД. При выраженных тяжах — 20 ЕД

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало высокую клиническую эффективность нового способа лечения периимплантита с применением ботулинического токсина типа А для устранения мышечных тяжей слизистой оболочки. Разработанный метод основан на патогенетически обоснованном подходе к коррекции биомеханических факторов, способствующих развитию и прогрессированию периимплантита.

Основные выводы исследования:

Применение ботулотоксина в комплексном лечении периимплантита лёгкой степени (в дозе 5–20 ЕД) обеспечивает полное купирование воспалительного процесса и уменьшение глубины костного кармана с 4 мм до 1 мм в течение 3–6 месяцев без необходимости хирургического вмешательства.

При средней степени периимплантита предварительное введение ботулотоксина за 2 недели до хирургического лечения уменьшает глубину костного кармана на 33 % (с 6 мм до 4 мм), купирует острое воспаление и улучшает трофику тканей, что создаёт благоприятные условия для последующей операции и повышает её эффективность.

Статистический анализ выявил чрезвычайно высокую корреляцию ($r = 0,9847$) между исходной глубиной костного кармана и степенью клинического улучшения, что свидетельствует о высоком регенеративном потенциале периимплантатных тканей при устранении патогенетических факторов заболевания.

Установлена умеренная дозозависимость терапевтического эффекта ботулотоксина: повышение дозы препарата ассоциировано со снижением финальной глубины костного кармана ($r = -0,5773$), однако выбор дозы должен осуществляться индивидуально на основании клинической оценки выраженности мышечных тяжей.

Механизм терапевтического действия ботулотоксина при периимплантите включает денервацию мышечных тяжей, вазодилатацию микрососудов, улучшение трофики и оксигенации тканей, купирование воспалительного процесса и создание благоприятных условий для остеорегенерации.

Применение ботулотоксина способствует увеличению ширины зоны кератинизированной прикреплённой десны, что является важным фактором долгосрочного успеха дентальной имплантации и профилактики рецидивов периимплантита.

Повторное введение ботулотоксина через 3–6 месяцев обеспечивает поддержание достигнутого клинического результата с учётом продолжительности действия препарата.

ЛИТЕРАТУРА

- Параскевич В.Л. Дентальная имплантология. Основы теории и практики. — 3-е изд., перераб. и доп. — Минск: Юнипресс, 2011. — 496 с.
- Иванов С.Ю., Мураев А.А., Малаев А.О., Гаврюшин С.С. Хирургические методы лечения периимплантита // Российская стоматология. — 2018. — Т. 11, № 2. — С. 34–41.
- Федотова А.В., Янушевич О.О., Лопатин О.А., Мураев А.А. Применение ботулинического токсина типа А в стоматологии // Стоматология. — 2019. — Т. 98, № 5. — С. 72–76.
- Ушаков Р.В., Царёв В.Н. Профилактика воспалительных осложнений дентальной имплантации. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. — 288 с.
- Berglundh T., Armitage G., Araujo M.G. et al. Peri-implant diseases and conditions: Consensus report of workgroup 4 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions // Journal of Clinical Periodontology. — 2018. — Vol. 45, Suppl 20. — P. S286–S291.
- Schwarz F., Derks J., Monje A., Wang H.L. Peri-implantitis // Journal of Clinical Periodontology. — 2018. — Vol. 45, Suppl 20. — P. S246–S266.

© Азизова Дина Анваровна (duim-09@mail.ru); Куандыкова Диана Маратовна (dianakuan@mail.ru);

Хаирутдинова Айгуль Рафиковна (ajgele4ka@mail.ru); Муратова Лейсан Дамировна

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИ-VEGF ТЕРАПИИ РАНИБИЗУМАБОМ У ПАЦИЕНТОВ С ДИАБЕТИЧЕСКОЙ РЕТИНОПАТИЕЙ

EVALUATION OF THE EFFICACY OF ANTI-VEGF THERAPY WITH RANIBIZUMAB IN PATIENTS WITH DIABETIC RETINOPATHY

**S. Aksenova
T. Kumaksheva
E. Khozina
O. Vasilyeva
Yu. Strelchenko**

Summary. The article presents the results of a retrospective analysis of the efficacy of the selective VEGF inhibitor Ranibizumab intravitreal injections in the treatment of diabetic retinopathy. Diabetic retinopathy in diabetes mellitus develops as a result of prolonged hyperglycemia, which triggers a cascade of microvascular disorders associated with increased permeability and occlusion of retinal vessels, leading to the neovascularization and fibroglial tissue formation. The study noted an improvement in visual function, as well as a reduction of macular edema following the administration of Ranibizumab, which has a positive effect on patients' quality of life.

Keywords: diabetes mellitus, diabetic retinopathy, diabetic macular edema, ranibizumab, visual acuity, optical coherence tomography.

Аксенова Светлана Владимировна

Доктор медицинских наук, профессор, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (Саранск)
aksenovamed@mail.ru

Кумакшева Татьяна Николаевна

Старший преподаватель, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (Саранск)
tanya.kumaksheva@mail.ru

Хозина Евгения Александровна

Старший преподаватель, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (Саранск)
eahozina@gmail.com

Васильева Ольга Александровна

Кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (Саранск);
врач-офтальмолог, общество с ограниченной ответственностью «Клиника доктора Куренкова» (Москва)
olga11vasilyeva@gmail.com

Стрельченко Юлия Михайловна

Ординатор, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (Саранск)
mik-merk@yandex.ru

Аннотация. В статье показаны результаты ретроспективного анализа эффективности интравитреального применения селективного VEGF-ингибитора Ранибизумаба при лечении диабетической ретинопатии (ДР). ДР при сахарном диабете (СД) формируется как результат длительной гипергликемии, провоцирующей каскад микрососудистых нарушений, связанных с повышенной проницаемостью и окклюзией ретинальных сосудов до появления новообразованных сосудов и фиброглиальной ткани. Отмечено улучшение зрительных функций, а также уменьшение макулярного отека после введения Ранибизумаба, что благоприятно сказывается на уровне жизни пациентов.

Ключевые слова: сахарный диабет, диабетическая ретинопатия, диабетический макулярный отек, ранибизумаб, острота зрения, оптическая когерентная томография.

Введение

Сахарный диабет представляет собой одну из ведущих проблем, беспокоящую, в первую очередь, людей трудоспособного возраста. Ретинопатия при СД формируется как результат длительной гипергликемии, провоцирующей каскад микрососудистых нарушений, связанных с повышенной проницаемостью и окклюзией ретинальных сосудов до появления новообразованных сосудов и фиброглиальной ткани. Является одним из проявлений генерализованной микроангиопатии [1–7]. Проведенный анализ эпидемиологических данных свидетельствует о том, что диабетическая ретинопатия среди пациентов с сахарным диабетом встречается в странах с высоким уровнем дохода в 30–40 % случаев, а в странах с низким и средним уровнем может достигать 50 %. Глобальная распространённость диабетической ретинопатии достигает 422 млн случаев, что делает её одним из наиболее социально значимых офтальмологических заболеваний [4]. Диабетический макулярный отек (ДМО) представляет собой структурное изменение сетчатки, характеризующееся патологическим утолщением макулярной зоны. Данное состояние возникает в результате дисфункции гематоретинального барьерного комплекса, что провоцирует нарушение баланса между экстравазацией плазменных компонентов в межклеточное пространство нейросенсорного слоя сетчатки и их недостаточной элиминацией пигментным эпителиальным слоем. Ключевым патофизиологическим механизмом является преобладание транссудативных процессов над реабсорбционной способностью тканей. Особенностью ДМО является его способность манифестировать на любом этапе ДР, включая начальные субклинические формы заболевания, при этом тяжесть проявлений не имеет прямой зависимости от выраженности пролиферативных изменений сосудистого русла. Это подтверждает гипотезу о мультифакторности патогенеза, где ведущую роль играют метаболические нарушения, а не только ангиопролиферация [1, 9–12]. Развитие, прогрессирование и резистентность к лечению ДМО часто ассоциируется с декомпенсацией СД. Рост HbA1c на 1 % увеличивает частоту ДМО на 17 %. Сосудистый эндотелиальный фактор роста (VEGF — Vascular Endothelial Growth Factor) — это основной элемент в развитии патологического сосудистой пролиферации в тканях сетчатки и диска зрительного нерва при пролиферативной диабетической ретинопатии. Для подавления патологического ангиогенеза используется интравитреальное введение ингибиторов ангиогенеза (ИВВИА) [6–8]. В настоящее время на территории Российской Федерации зарегистрировано 5 препаратов для интравитреального введения, такие как Бролуцизумаб, Ранибизумаб, Бевацизумаб, Афлиберцепт, Фарицимаб. Доказано, что они препятствуют сосудистой пролиферации, уменьшают просачивание жидкости и поддерживают сохранение нервных клеток в макуле. В исследовании использо-

вался селективный VEGF-ингибитор Ранибизумаб, обладающий высокой аффинностью к изоформам VEGF121 и VEGF165, что минимизирует риски экстраокулярных эффектов. Избирательно связывается с VEGF-A (VEGF110, VEGF121, VEGF165), предотвращая его взаимодействие с рецепторами на поверхности клеток эндотелия, что приводит к подавлению неоваскуляризации и пролиферации эндотелиальных клеток. [13–15].

Цель исследования: оценить эффективность анти-VEGF терапии ранибизумабом у пациентов с ДМО, после первого интравитреального введения, при лечении пациентов с ДМО.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования проведен ретроспективный анализ медицинской документации 45 пациентов с ДМО, которым введена первая загрузочная доза Ранибизумаба. Все пациенты находились на лечении в офтальмологическом отделении ГБУЗ РМ «Республиканская офтальмологическая больница» в период с июня 2024 г. по август 2025 г.

Средняя продолжительность СД в исследуемой группе составляла от 5 до 25 лет (15 ± 4 лет). Средний возраст составил $64,0 \pm 1,0$ год. Из 45 пациентов (45 глаз): $n=42$ (42 глаза) — лица с СД 2 тип (29 женщин — 69,0 % и 13 мужчин — 31,0 %) и $n=3$ (3 глаза) — пациенты с СД 1 типа, где гендерное соотношение распределилось как 2:1 (женщины — 67,0 %, мужчины — 33,0 %).

Распределение по стадиям ДР выявило следующую динамику: непролиферативная форма диагностирована у 6 пациентов (13,0 %); препролиферативная стадия зафиксирована у 13 лиц (29,0 %); пролиферативная ДР превалировала в структуре патологии — 26 случаев (58,0 %).

Для объективизации результатов ДМО применяли оптическую когерентную томографию (ОКТ) на томографе Zeiss Stratus OCT 3000 с анализом толщины нейрональных слоёв сетчатки в фовеальной области с помощью протокола Macular Thickness Analysis до и после инъекции Ранибизумаба. Анализ результатов остроты зрения определяли с помощью стандартных таблиц Сивцева-Головина.

Категориальные данные описывались с указанием абсолютных значений и процентных долей, которые вычислялись с применением табличного процессора Microsoft Excel 365. Сравнительные данные представлены в виде $M \pm \sigma$, где M — среднее значение, σ — стандартное отклонение. Уровень статистической значимости p был менее 0,05 ($p < 0,05$).

Результаты

По данным ОКТ толщина сетчатки в фовеа до введения препарата составляла от 480 до 720 мкм (в среднем 600 ± 113 мкм). После первой интравитреальной инъекции Ранибизумаба зафиксированы следующие изменения: клинически значимое уменьшение толщины сетчатки в фовеа на 340–440 мкм (390 ± 32 мкм) отмечено у 20 пациентов (44,4 %), что привело к разрешению МО. У 16 пациентов (35,6 %) толщина сетчатки уменьшилась на 280–340 мкм (310 ± 23 мкм), что свидетельствует о неполном регрессе экссудативной активности. Клинически значимое отсутствие снижения толщины отека или его сохранение более 400 мкм выявлено у 9 пациентов (20 %).

Средняя острота зрения до введения Ранибизумаба находилась в пределах от 0.01 до 0.5 с максимальной коррекцией. На фоне проведенного лечения, можно выделить 2 группы со значимыми цифрами повышения остроты зрения. 17 пациентов (37,7 %) имели повышение остроты зрения на 0.3–0.4 и 13 пациентов (28,9 %) на 0,2–0,1 от исходного, что коррелировало с регрессом кистозных изменений на ОКТ. У 15 пациентов (33,4 %) зрение осталось прежним или повышение остроты соответствовало цифрам менее 0,1. Также пациенты отмечали субъективные изменения остроты зрения в виде улучшения чёткости видения объектов и уменьшение метаморфопсий.

Заключение

Результаты исследований эффективности Ранибизумаба демонстрируют положительный эффект уже по-

сле первого «загрузочного» введения. Терапевтический протокол применения Ранибизумаба предполагает курсовое введение препарата с интервалом в 30 дней, что обеспечивает более стойкий эффект.

Первоначальная фаза лечения включает не менее трёх процедур, однако продолжительность курса корректируется индивидуально до момента достижения двух ключевых критериев:

- 1) функциональная стабилизация — отсутствие положительной динамики в показателях остроты зрения при повторных измерениях;
- 2) анатомическая ремиссия — сохранение неизменных морфологических характеристик сетчатки (толщина макулы, объём экссудации) по данным оптической когерентной томографии в течение 4–6 недель после завершения инъекционного цикла. Клинически значимым результатом считается как восстановление зрительных функций до физиологически возможного уровня, так и прекращение прогрессирования ретинопатии, что подтверждается отсутствием динамики как минимум в двух последовательных обследованиях.

Данное исследование показывает, что интравитреальное введение ингибитора ангиогенеза — это эффективная терапия, направленная на предотвращение патологического ангиогенеза, что, в свою очередь, приводит к уменьшению отека в макулярной области и сохранению зрительных функций у пациентов с ДМО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клинические рекомендации — Сахарный диабет: ретинопатия диабетическая, макулярный отек диабетический — 2023-2024-2025 (16.02.2023) — Утверждены Минздравом РФ
2. Дедов, И.И. Клинические рекомендации «Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом» (9-й выпуск, дополненный) / ред. И.И. Дедов, М.В. Шестакова, А.Ю. Майоров // Сахарный диабет. — 2019. — Т. 22. № 151. — С. 1–144. DOI: 10.14341/DM22151
3. Глобальный доклад по диабету [Global report on diabetes]. Женева: Всемирная организация здравоохранения. — 2018. — 88 с. Лицензия: ССВУ-NC-SA 3.0 IGO
4. Липатов, Д.В. Эпидемиология диабетической ретинопатии в Российской Федерации по данным федерального регистра пациентов с сахарным диабетом / Д.В. Липатов, О.К. Викулова, А.В. Железнякова [и др.] // Сахарный диабет. — 2018. — Т. 21. №4. — С. 230–240
5. Офтальмология: национальное руководство / ред. С.Э. Аветисов, Е.А. Егоров, Л.К. Мошетова [и др.]. — 2ое изд — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. — 904 с. — (Серия «Национальное руководство»)
6. Nguyen, Q.D. Ranibizumab for diabetic macular edema: Results from 2 phase III randomized trials: RISE and RIDE / Ophthalmology. — 2012. — Vol. 119. — P.789–801.
7. Massin, P. Safety and efficacy of ranibizumab in diabetic macular edema (RESOLVE Study): a 12-month, randomized, controlled, double-masked, multicenter phase II study / Diabetes Care. — 2010. — V. 33. N 11. — P. 2399–2405
8. Mitchell P. The RESTORE study: ranibizumab monotherapy or combined with laser versus laser monotherapy for diabetic macular edema / Ophthalmology. — 2011. — V. 118, N. 4. — P. 615–625
9. American Diabetes Association. 6. Glycemic Targets: Standards of Medical Care in Diabetes—2019. Diabetes Care. — 2019. — N 42. (Supplement 1) P. 61–70. doi:10.2337/dc19-S006
10. Нероев, В.В. Протокол выполнения интравитреального введения лекарственных препаратов. Консенсус Экспертного совета по заболеваниям сетчатки и зрительного нерва Общероссийской общественной организации «Ассоциация врачей-офтальмологов» / В.В. Нероев, Ю.С. Астахов, С.А. Коротких [и др.] // Вестник офтальмологии. — 2020. — Т.136. — №6. — С.251–263. <https://doi.org/10.17116/oftalma2020136062251>

11. Гликированный гемоглобин как ключевой параметр при мониторинге больных сахарным диабетом. Оптимальная организация исследований / А.В. Ильин, М.И. Арбузова, А.П. Князева // Сахарный диабет. — 2008. № 2. — С.60-64. DOI: 10.14341/2072-0351-5762
12. Kai Yuan Tey Optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy: a review of current applications / Eye and Vision. — 2019. — Vol. 6. — P.37–47
13. Johannesen, S.K. Optical coherence tomography angiography and microvascular changes in diabetic retinopathy: a systematic review / Acta Ophthalmol. — 2019. — Vol. 97. № 1. — P. 7–14
14. Giovannini A. Management of diabetic macular edema with intravitreal dexamethasone implants: Expert recommendations using a Delphi-based approach / European Journal of Ophthalmology. — 2019. — Vol. 29. № 1. — P.82–91
15. Помыткина, Н. В. Анализ эффективности анти-vegf терапии диабетического макулярного отёка в авитричных глазах / Н.В. Помыткина, Я.Б. Лебедев, Е.Л. Сорокин // Дальневосточный медицинский журнал. — 2021. — №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-effektivnosti-anti-vegf-terapii-diabeticheskogo-makulyarnogo-otyoka-v-avitrichnyh-glazah>

© Аксенова Светлана Владимировна (aksenovamed@mail.ru); Кумакшева Татьяна Николаевна (tanya.kumaksheva@mail.ru);
Хозина Евгения Александровна (eahozina@gmail.com); Васильева Ольга Александровна (olga11vasilyeva@gmail.com);
Стрельченко Юлия Михайловна (mik-merk@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСТРАЯ ТРОМБОТИЧЕСКАЯ ОККЛЮЗИЯ АРТЕРИИ ТЫЛА СТОПЫ (КЛИНИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ)

ACUTE THROMBOTIC OCCLUSION OF THE DORSAL FOOT ARTERY (CLINICAL OBSERVATION)

I. Dolakov
R. Gezgieva
L. Dakieva
A. Torshkhoeva
B. Patieva

Summary. Acute limb ischemia is a serious life-threatening complication of heart and vascular diseases that requires timely diagnosis and emergency surgery. The prevalence of DEC among vascular diseases ranges from 10.0 % to 16.0 %. Despite the achievements of modern angiology, the use of expensive diagnostic and treatment methods, the frequency of limb amputations remains high and amounts to 11–37 %. Enezate T.H. (2017) notes that 15–20 % of DEC patients die within 1 year after hospital treatment. Occupying the fourth place in the overall structure of embolisms, DEC leads to the death of 20–30 % and disability of 15–25 % of patients.

The most rare localization of acute occlusion is the distal arterial bed, the arteries of the foot are extremely rarely affected.

Keywords: thrombosis, foot, ischemia, necrosis, trophic wound.

Долаков Ибрагим Гапурович
кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет,
врач-хирург высшей квалификационной категории
i_dolakov@mail.ru

Гезгиева Райшат Каримовна
кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет,
врач-хирург высшей квалификационной категории
rgezgieva@mail.ru

Дакиева Лимара Магометовна
кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет
limara.07@mail.ru

Торшхоева Амина Муссаевна
ФГБОУ «Российский университет медицины»
Минздрава России
torshoevaamina1@gmail.com

Патиева Бэлла Беслановна
Ингушский государственный университет
patbella748@gmail.com

Аннотация. Острая ишемия конечностей — тяжелое жизнеугрожающее осложнение заболеваний сердца и сосудов, требует своевременной диагностики и экстренного хирургического вмешательства. Распространенность ОИК среди сосудистых заболеваний занимает от 10,0 % до 16,0 %. Несмотря на достижения современной ангиологии, применение дорогостоящих методов диагностики и лечения, частота ампутаций конечности остается высокой и составляет 11–37 %. Enezate T.H. (2017) отмечает, что 15–20 % больных ОИК умирают в течение 1-го года после лечения в стационаре. Занимая четвертое место в общей структуре эмболий, ОИК приводит к гибели 20–30 % и инвалидизации 15–25 % больных.

Наиболее редкой локализацией острой окклюзии является дистальное артериальное русло, артерии стопы поражаются крайне редко.

Ключевые слова: тромбоз, стопа, ишемия, некроз, трофическая рана.

АД — артериальное давление
АТС — артерия тыла стопы
БПВ — большая подкожная вена
ЗББА — задняя большеберцовая артерия
ИБС — ишемическая болезнь сердца
КТА — компьютерная томографическая ангиография
МБА — малоберцовая артерия
МАП — малая подкожная вена
НПВС — нестероидные противовоспалительные средства

ОБА — общая бедренная артерия
ОИК — острая ишемия конечности

ПББА — передняя большеберцовая артерия
ПКА — подколенная артерия
ТАС — тыльная артерия стопы
УЗДС — ультразвуковое дуплексное ангиосканирование
ХИНК — хроническая ишемия нижних конечностей
ЧСС — частота сердечных сокращений
ESVS — Европейское общество сосудистой хирургии

Острая артериальная ишемия — синдром, обусловленный внезапным нарушением кровотока в определенном сосудистом бассейне, проявля-

ется острой ишемией конечности. Острая ишемия конечности — наиболее опасное осложнение заболеваний сердца и магистральных сосудов и требует экстренной диагностики и лечения. Прогрессирование заболевания без принятия срочных оперативных мер приводит к гангрене конечности и сопровождается высокой летальностью. На долю ОИК среди всех сосудистых заболеваний приходится 10–16 %, а встречаемость составляет 1 случай на 6000 человек [1]. Частота госпитализаций пациентов с ОИК составляет 10,1 на 100 000 пациентов в год [2]. За последние 20 лет прошлого века частота ее увеличилась с 23,1 — 50,4 на 100 тыс. поступлений [1–3]. Высокой остается госпитальная летальность, достигая 9 % [3], при этом около 15–20 % больных умирает в течение 1-го года после лечения в стационаре [4]. Несмотря на современные успехи в диагностике и лечении сосудистых заболеваний, частота ампутаций при ОИК остается довольно высокой и достигает 11–37 % [5]. Ежегодно острая ишемия нижних конечностей, как основная причина гангрены, развивается у 140 млн человек в мире [6].

По данным литературы, развитие острой окклюзии аорты и артерий конечностей приводит к гибели 20–30 % и инвалидизации 15–25 % больных [7].

Основными этиологическими факторами развития ОИК являются тромбоэмболии, тромбозы артерий, травма, ангиоспазм, наиболее часто встречаются тромбоэмболии и тромбозы. Типичные уровни эмболической окклюзии — зоны бифуркаций (бифуркация аорты, подвздошных, бедренных, подколенных, подключичных, подмышечных артерий). Нередки в клинике случаи мультифокального поражения артериального русла.

В.С. Савельев (1987) на анализе 1600 клинических случаев тромбоэмболий артерий конечностей, приводит следующую частоту их поражения: общая бедренная артерия — 46 %, подвздошные артерии — 15 %, подколенная артерия — 13 %, бифуркация аорты — 8 %, артерии голени — 3 %, подмышечная артерия — 8 %, плечевая — 6 %, локтевая и лучевая артерии — 1 % [8]. На долю тромбоэмболии приходится 55–60 %, а тромбоэмболический генез встречается в 40 % случаев ОИК [8–9].

Окклюзия артерий верхних и нижних конечностей занимает четвертое место в общей структуре эмболий — 25,3 % [10–11].

Основной причиной тромбоэмболий артерий (до 96 % всех случаев) являются заболевания сердца — кардиосклероз, острый инфаркт миокарда, пороки, эндокардиты, искусственные клапаны, острая или хроническая аневризма левого желудочка и т.д. До 70 % эмболий связывают с ИБС и его осложнениями.

Независимо от основного заболевания в 70–80 % случаях тромбоэмболий выявляется мерцательная арит-

мия, способствующая формированию и мобилизации внутрисердечных тромбов.

Наиболее частая причина острого тромбоза — облитерирующий атеросклероз сосудов конечностей, при котором тромбоз формируется на фоне окклюзионно-стенотического процесса в сосуде, либо на фоне бессимптомной изъязвленной бляшки.

Редкими причинами артериальной эмболии могут быть пневмония и опухоли легких, вызывающие тромбоз легочных вен. Источником тромбоэмболии большого круга кровообращения может служить тромбоз магистральных вен нижних конечностей при врожденных дефектах сердечной перегородки, при которых возникает так называемая парадоксальная эмболия.

В 3–4 % случаев источником эмболий являются аневризмы аорты и ее ветвей. Источником эмболий могут быть изъязвленные атеросклеротические бляшки или добавочное шейное ребро (которое приводит к сегментарному стенозу подключичной артерии и развитию постстенотического расширения, в котором образуются пристеночные тромбы). Редкими причинами ОИК являются расслоение аневризмы аорты, васкулиты, синдром подколенной ловушки, адвентициальная кистозная болезнь, острый компартмент-синдром, инородные тела, тромбофилия, малый сердечный выброс.

В 5–10 % случаев источник эмболии остается неизвестным и не может быть выявлен ни клинически, ни даже на аутопсии.

При тяжелой гипоксии тканей в условиях ОИК включаются последовательные патофизиологические изменения, неизбежно заканчивающиеся некрозом тканей при отсутствии экстренного лечения. Нельзя забывать, что ревазуляризация при ОИК чревата развитием реперфузионного синдрома, приводящий у больных с коморбидным фоном к тяжелой полиорганной дисфункции и летальному исходу.

Наиболее редкой локализацией острой артериальной окклюзии, как видно, являются артерии стопы. В доступной литературе мы нашли единичные клинические случаи острой окклюзии артерий стопы. Во всех этих случаях тромбоз артерий стопы развился у молодых спортсменов при отсутствии атеросклероза или васкулита, на фоне хронической травмы конечности, либо на фоне приема анаболических стероидных препаратов [12–13].

Артериальный тромбоз тыльной артерии стопы, вызывающий острую сосудистую недостаточность, встречается крайне редко [7, 8, 12, 13].

Мы столкнулись с молодым пациентом с острой тромботической окклюзией правой АТС, вызванной приемом капсул для набора мышечной массы.

Учитывая крайнюю редкость острой окклюзии артерий стопы, для большего знакомства практикующих врачей с подобными вариантами ОИК, хотелось бы привести следующее клиническое наблюдение.

Клиническое наблюдение

Больной Ц., 41 года, обратился в городскую поликлинику к сердечнососудистому хирургу 09.04.2025 г. с жалобами на сильные боли в правой стопе в покое, наиболее выраженные во II пальце правой стопы, ночные боли, практически не купируемые НПВС, парестезии, онемение, похолодание правой стопы, наличие участков некроза II пальца. Со слов больного, болеет около одного месяца, когда на фоне приема препаратов по набору мышечной массы китайского производства без видимых причин появились резкие боли во втором пальце правой стопы, палец стал вначале «белым», холодным, со временем начал отмечать покраснение пальца и участки темно-фиолетового цвета (рис. 1).

Боли не купировались приемом ненаркотических анальгетиков, не давали спать. До обращения за медицинской помощью лечился самостоятельно народными средствами, без эффекта, в течение более трех недель.

Объективно: общее состояние относительно удовлетворительное, правильного телосложения, удовлет-

ворительного питания. Рост 172, вес 78. Кожные покровы обычной окраски. Дыхание везикулярное, хрипов нет. Частота дыхания 16 в минуту, АД 130/80 мм рт. ст., пульс = ЧСС 78. Живот мягкий, безболезненный. Физиологические отправления в норме. Ранее был здоров и наследственных заболеваний не отмечает.

Локально: правая стопа прохладная на ощупь, дистальная часть стопы умеренно гиперемирована. Тактильная чувствительность снижена, активные движения частично сохранены. Пульсация над ОБА, ПКА справа сохранена, на ЗББА определяется, в проекции артерии тыла стопы не определяется. Конечность холодная на ощупь. Сухой некроз на нижней поверхности дистальной фаланги II пальца правой стопы (рис. 2).

08.04.2025 г. обратился в частную клинику, выполнено УЗДС артерий и вен правой нижней конечности, по результатам которого назначено лечение сердечнососудистым хирургом — никотиновая кислота, комбилипен, эликвис 2,5 мг два раза в день, вессел Дуэ Ф.

Данные дуплексного сканирование сосудов правой нижней конечности от 8.04.2025 г.: «Острая проксимальная тромботическая окклюзия артерии тыла стопы, снижен кровоток в ПББА (32 см/с), коллатерального типа сниженный кровоток в пальцевых артериях. Кровоток в ЗББА, МБА и медиальной подошвенной артерии магистрального типа, удовлетворительный. Диаметр вен правой НК в пределах нормы. Остиальные клапаны БПВ и МПВ состоятельны. Визуализированные перфоранты



А



Б

Рис. 1. А-Б. Первоначальный вид правой стопы и II пальца у больного с тромбозом АТС

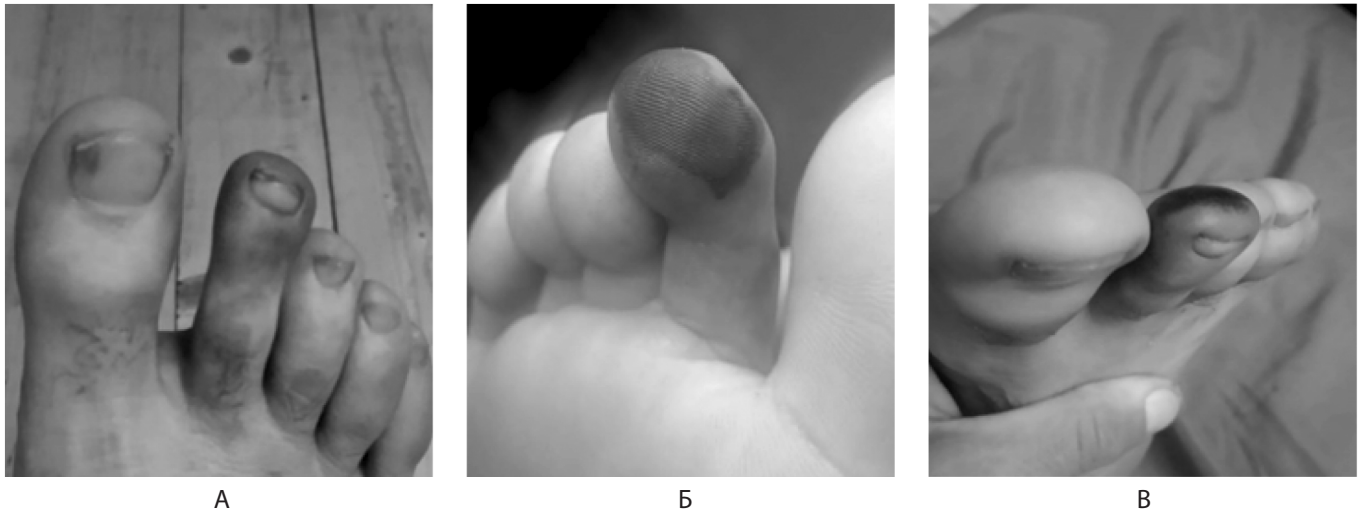


Рис. 2. А-Б-В. Состояние правой стопы на фоне комплексной ангиотропной терапии

не расширены. Глубокие и поверхностные вены проходимы (рис. 3)».

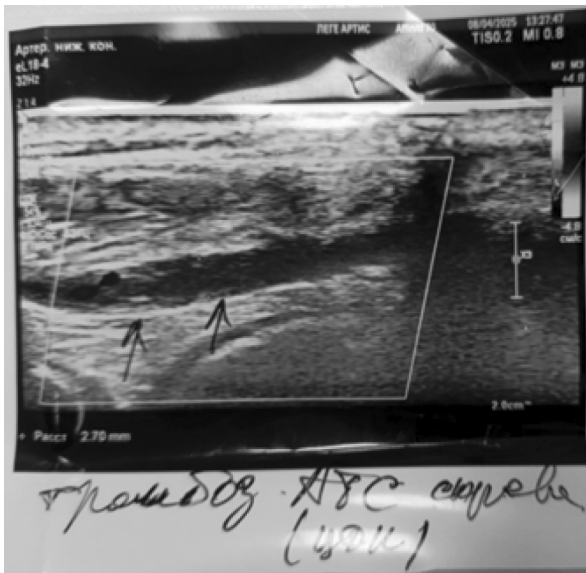


Рис. 3. Тромботическая окклюзия артерии тыла стопы справа

Данные КТА 10.04.2025 г. (омнипак 350 — 100 мл) — «Магистральные сосуды голени контрастируются на всем протяжении без дефектов. Отмечается тромбоз правой медиальной подошвенной артерии латеральной подошвенной артерии, (с наличием «пенька»), на протяжении 11,4 см латеральной и 6,8 медиальной».

Выставлен диагноз: «Тромбоз артерии тыла стопы справа». Лечение продолжено. Положительного эффекта не наблюдается. Направлен на оперативное лечение в специализированную клинику, где находился с 17.04.2025 г. по 21.04.2025 г., выставлен окончательный диагноз: «Окклюзия (тромбоз) ТАС, подошвенной артериальной дуги правой стопы. Трофическая рана II пальца правой стопы. ХИНК IV ст. справа». К моменту направ-

ления на иногороднее лечение на месте сухого некроза сформировалась трофическая рана под струпом, охватывающая большую часть дистальной фаланги II пальца правой стопы (рис. 4, А-Б).

Заключение сердечно-сосудистого хирурга клиники от 17.04.2025 г.: «Правая стопа холодная на ощупь, бледная. Активные движения и чувствительность в правой стопе несколько снижены. Пульсация над ОБА, ПКА справа сохранена, дистальнее на ЗББА определяется, на ПББА и АТС не определяется. Отеков нет. Симптомы Хомаса, Мозеса отрицательные. В области дистальной фаланги II пальца правой стопы определяется трофическая рана размерами 1х2 см. Положительные симптомы плантарной ишемии справа».

Данные обследования. Биохимический анализ крови (17.04.2025 г.): общий белок — 71,97 г/л, альбумин — 44 г/л, общий билирубин — 4,73 мкмоль/л, креатинин — 79,8 мкмоль/л, мочевины — 5,72 ммоль/л, общий холестерин — 4,05 ммоль/л, липопротеиды высокой плотности — 1,4 ммоль/л, липопротеиды низкой плотности — 2,65 ммоль/л, триглицериды — 0,58 ммоль/л, глюкоза — 3,59 ммоль/л, железо — 4,9 мкмоль/л, ЛДГ — 311,7 Ед/л, АлАТ — 306,4 Ед/л, АсАТ — 135,2 Ед/л, ЩФ — 78,7 Ед/л, СРБ — 17,29 мг/л. *Коагулограмма (17.04.2025):* АЧТВ — 41,1 сек., протромбиновое время — 11,6 сек., МНО — 1,093, фибриноген — 4,305 г/л, тромбиновое время — 24 сек. *Общий анализ крови (17.04.2025)* — гемоглобин — 112 г/л, эритроциты — $4,51 \times 10^{12}$ /л, тромбоциты — 371×10^9 /л, лейкоциты — $8,58 \times 10^9$ /л, эозинофилы — 3,1 %, лимфоциты — 24,4 %, моноциты — 7,2 %, базофилы — 0,1 %, нейтрофилы — 65,2 %. *Общий анализ мочи (18.04.2025):* цвет — желтый, плотность — 1,023 г/л, реакция — 5 рН, белок — отр., глюкоза — отр., лейкоциты — нег., эритроциты — нет, бактерии — отр.

Проведено оперативное лечение 18.04.2025 г. под местной и внутривенной анестезией: «Ангиография, ре-



А



Б

Рис. 4. А-Б. Образование трофической язвы II пальца правой стопы вследствие тромбоза АТС через

каналлизация, баллонная ангиопластика ПББА, ТАС, подошвенной артериальной дуги правой стопы», ангиотропная терапия.

В дальнейшем проводились курсы ангиотропной терапии: тромбо-АСС, клопидогрел, розувастатин, ксарелто, омепразол, местно — перевязки с водным раствором хлоргексидина. Состояние постепенно улучшилось, на месте трофической раны через два месяца после оперативного лечения образовалась вялогранулирующая рана (рис. 5), полное заживление которой наступило спустя три месяца после реканализации, баллонной ангиопластики ПББА, ТАС, подошвенной артериальной дуги правой стопы.

Заключение

Острый тромбоз артерий стопы встречается очень редко. Часто возникает у лиц молодого возраста, как правило, занимающихся профессиональным спортом, нередко принимающих анаболические стероиды и без предшествующих заболеваний периферических артерий. Современные методы диагностики позволяют своевременно поставить правильный диагноз, однако даже оперативное лечение (ангиография, реканализация, баллонная ангиопластика) не гарантирует сиюминутного успеха в лечении данной категории больных. Комплексная длительная ангиотропная терапия в сочетании с оперативным вмешательством, местное лечение

привели к полному регрессу симптомов ишемии стопы, в данном случае, в течение 5 месяцев.



Рис. 5. Образование вялогранулирующей раны II пальца правой стопы на фоне комплексной терапии тромбоза АТС

ЛИТЕРАТУРА

1. Davies B, Braithwaite B.D, Birch P.A., Poskitt K.R., Heather B.P, Earnshaw J.J. Acute leg ischaemia in Gloucestershire. *BrJSurg* 1997; 84 (4):504–508 <https://doi.org/10.1046/j.1365-2168.1997.02601.x>.
2. Хорев Н.Г., Чичваров А.А., Сапелкин С.В., Беллер А.В. Факторы, определяющие летальность у больных с острой артериальной ишемией конечностей. *Бюллетень медицинской науки* №2 (30) 2023. 5–10. DOI 10.31684/25418475-2023-2-5.
3. Grip O., Wanhainen A., Michaëlsson K., Lindhagen L., Björck M. Open or endovascular revascularization in the treatment of acute lower limb ischaemia. *Br J Surg*. 2018 Nov; 105(12): 1598–1606. <https://doi.org/10.1002/bjs.10954>. Epub 2018 Jul 25.
4. Enezate T.H., Omran J., Mahmud E., Patel M., Abu-Fadel M.S., White C.J., Al-Dadah A.S. Endovascular versus surgical treatment for acute limb ischemia: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Cardiovasc Diagn Ther*. 2017 Jun; 7(3): 264–271. <https://doi.org/10.21037/cdt.2017.03.03>.
5. Baril D.T., Ghosh K., Rosen A.B. Trends in the incidence, treatment, and outcomes of acute lower extremity ischemia in the United States Medicare population. *JVascSurg*. 2014 Sep; 60(3): 669–77.
6. e2. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2014.03.244>.
7. Клинические рекомендации. Острая ишемия конечностей. Клинические рекомендации МЗ РФ. Москва, 2024.
8. Ивченко А.О., Шведов А.Н., Ивченко О.А. Окклюзионные заболевания аорты и артерий нижних конечностей. Учебное пособие для студентов старших курсов. Томск. 2017. 105 с.
9. Снявин Г.В., Винокуров И.А., Мнацаканян Г.В., Белов Ю.В. Эпидемиология и патогенез острой ишемии нижних конечностей. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия* 2019, Т. 12, №4, с. 291–295.
10. Mahe G., Jaquinandi V. Diagnosis of lower limb peripheral artery disease. *PresseMed*. 2017;47(1):47–55.
11. Сорока В., Нохрин С., Магамедов И. Основные механизмы острой тромбоэмболической ишемии нижних конечностей. *Российский биомедицинский журнал*. 2015;16(4):12–14.
12. Van D., Boesmans E., Defriagne J. Acute limb ischemia. *RevMedLiege*. 2018;73(5-6):304–311.
13. Thaker S., Rowbotham E., Banerjee A., Robinson P. Dorsalis pedis artery thrombosis in an elite rugby player: an unusual cause of pedal claudication in a high-risk ankle. *Skeletal Radiol* 51: 2059–2063, 2022.
14. Ryohei Akashi, Hiroaki Kawano, Satoshi Ikeda and Koji Maemura. Occlusion of Dorsalis Pedis Artery in an Athlete. *Intern Med Advance Publication* DOI: 10.2169/internalmedicine.4584-24.

© Долаков Ибрагим Гапурович (i_dolakov@mail.ru); Гезгиева Райшат Каримовна (rgezgieva@mail.ru);
Дакиева Лимара Магомедовна (limara.07@mail.ru); Торшхоева Амина Муссаевна (torshoevaamina1@gmail.com);
Патиева Бэлла Беслановна (patbella748@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОМПЛЕКСНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТАЗОВОГО ДНА: РОЛЬ ГИНЕКОЛОГИЧЕСКОГО HIFU «FIBROSKOM» В КОРРЕКЦИИ СТРЕССОВОГО НЕДЕРЖАНИЯ МОЧИ, СИНДРОМА РЕЛАКСАЦИИ ВЛАГАЛИЩА И СОПУТСТВУЮЩИХ СЕКСУАЛЬНЫХ ДИСФУНКЦИЙ

Жлудко Геннадий Геннадиевич

Соискатель, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова
Минздрава России (Сеченовский Университет)
Rukopashnik89@gmail.com

COMPREHENSIVE PELVIC FLOOR RESTORATION: THE ROLE OF FIBROSKOM GYNECOLOGICAL HIFU IN THE TREATMENT OF STRESS URINARY INCONTINENCE, VAGINAL RELAXATION SYNDROME, AND ASSOCIATED SEXUAL DYSFUNCTIONS

G. Zhudko

Summary. This study examines the potential of differentiated thermal treatment with high-intensity focused ultrasound on various structural components of the pelvic floor support system using gynecological HIFU technology on the Fibroskom platform. This prospective, controlled trial included 87 women aged 29 to 58 years with verified pelvic floor dysfunction of varying severity. The results demonstrate a significant advantage of focused ultrasound, with complete relief of stress urinary incontinence symptoms in 71.4 percent versus 13.8 percent in the control group, objective correction of vaginal anatomical parameters by 28-35 percent versus minimal changes with conservative treatment, and an improvement in the total sexual function index score from 19.7 to 29.2 versus an improvement from 19.3 to 22.1 in the control group. The average duration of clinically significant effect with HIFU was 19.8 months, 2.6 times longer than traditional therapy. This technology provides a comprehensive solution to pelvic floor dysfunction in a single, non-invasive procedure and can be considered a pathogenetically sound alternative to surgical methods for early-stage pathology in women of reproductive and perimenopausal age.

Keywords: pelvic floor dysfunction, stress urinary incontinence, vaginal prolapse, sexual dysfunction, ultrasound thermolysis, neocollagenesis, structural remodeling.

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможностей дифференцированного термического воздействия высокоинтенсивным фокусированным ультразвуком на различные структурные компоненты поддерживающего аппарата тазовых органов с использованием технологии гинекологического HIFU на платформе «Fibroskom». В проспективное контролируемое исследование включены 87 женщин возрастной категории от 29 до 58 лет с верифицированными проявлениями несостоятельности тазового дна различной степени выраженности. Результаты демонстрируют выраженное преимущество технологии фокусированного ультразвука с полным купированием симптоматики стрессового недержания мочи у 71,4 процента против 13,8 процента в контрольной группе, объективной коррекцией анатомических параметров влагалища на 28–35 процентов против минимальных изменений при консервативном лечении, улучшением суммарного балла по индексу сексуальной функции с 19,7 до 29,2 против динамики с 19,3 до 22,1 в контрольной группе. Средняя продолжительность клинически значимого эффекта составила 19,8 месяца при применении технологии HIFU, что в 2,6 раза превосходит показатели традиционной терапии. Технология обеспечивает комплексное решение проблемы дисфункции тазового дна в рамках однократной процедуры без формирования раневых поверхностей и может рассматриваться как патогенетически обоснованная альтернатива хирургическим методам при начальных стадиях патологии у женщин репродуктивного и перименопаузального возраста.

Ключевые слова: дисфункция тазового дна, стрессовое недержание мочи, пролапс влагалища, сексуальная дисфункция, ультразвуковой термолиз, неокollaгенез, структурное ремоделирование.

Введение

Дисфункция тазового дна представляет собой патологию с неоднозначной тактикой ведения, несмотря на растущий объем клинических данных. О.В. Ремнёва с коллегами указывают на прямую связь вагинальных родов с формированием недержания мочи

и пролапса, причем частота тяжелых проявлений не демонстрирует тенденции к снижению [6]. В.В. Быченко характеризует пролапс тазовых органов как «скрытую угрозу», подчеркивая многоликость симптоматики и отсутствие четкого понимания у женщин относительно выбора специалиста, что приводит к фрагментарному лечению симптомов вместо комплексного воздействия

на синдром [2]. Проблема усугубляется увеличением доли возрастного контингента и одновременным омоложением патологии, при этом риск пролапса возрастает с возрастом, а существующие методы коррекции не гарантируют излечения.

О.В. Мурашко с соавторами акцентируют внимание на патогенетических звеньях дисфункции тазового дна, включающих механическое повреждение мышечно-фасциальных структур, денервацию срамного нерва, а также генетически и приобретенно обусловленные дефекты соединительной ткани с изменением соотношения коллагена I и III типов и полиморфизмом гена NAT2. Распространенность синдрома вагинальной релаксации составляет от 24 до 38 процентов, при этом до 54 процентов женщин с пролапсом сообщают о сопутствующем стрессовом недержании мочи. Возрастная динамика демонстрирует рост с 20,4 процента у женщин 20–29 лет до 77,2 процента в возрастной группе 40–49 лет. Неблагоприятный прогноз предполагает наличие пролапса у 63 миллионов женщин к 2030 году с увеличением числа операций на 13 процентов. Ведущим патогенетическим механизмом признается нарушение структуры и функции коллагена и эластина, причем дисфункция тазового дна наблюдается и у нерожавших женщин, что указывает на роль врожденных дефектов соединительной ткани [5].

С.Н. Чемидронов подчеркивает морфологическую основу патологии, указывая, что мышца, поднимающая задний проход, является главным поддерживающим компонентом тазового дна, а ее повреждение нарушает систему поддержки органов малого таза. Тесные синтопические взаимоотношения между мышцей, влагалищем, прямой кишкой и мочевым пузырем объясняют взаимосвязь различных форм дисфункции [7]. Я.Г. Гудушаури с коллегами демонстрируют прямую корреляцию между структурными повреждениями тазового кольца и диспареунией, установив, что разрыв лонного сочленения на 6 миллиметров и более вызывает значительные проблемы с мочеполовой системой и сексуальные расстройства. Из 71 пациентки с переломами таза 49,2 процента сообщили о половых и мочеполовых жалобах, 42,2 процента отметили боль при половом акте, 59,1 процента указали на низкий интерес к половому акту и уменьшение числа оргазмов. Женщины часто скрывают неприятные ощущения от партнера, что приводит к распаду супружеских пар, а застарелые посттравматические повреждения закономерно увеличивают сексуальную дисфункцию [3].

И.М. Арестова с соавторами указывают на отсутствие разработанных эффективных методов борьбы с дисфункцией тазового дна и неопределенность тактики ведения при начальной стадии пролапса. Доказательства эффективности лазерного лечения в виде многоцен-

тровых рандомизированных плацебо-контролируемых исследований отсутствуют. Многообразные хирургические методы не решают проблему, частота рецидивов остается высокой, что вызывает неудовлетворенность качеством лечения [1].

Л.Ю. Кукушкина с коллегами отмечают ограниченность консервативных методов, указывая, что не все исследователи находили прямую связь между увеличением мышечного тонуса и улучшением функции нижних мочевыводящих путей. Биологическая обратная связь показала статистически значимое улучшение контроля мочеиспускания при стрессовом недержании, тогда как при ургентном и смешанном недержании эффективность существенно ниже. При использовании вагинальных датчиков отмечалось жжение во влагалище, болезненное мочеиспускание, раздражение кожи, что снижает приверженность терапии [4].

Цель исследования

Настоящая работа посвящена изучению терапевтического потенциала дифференцированного ультразвукового воздействия при реализации протокола структурного ремоделирования соединительнотканых и мышечных компонентов тазового дна с применением технологии гинекологического HIFU на платформе «Fibroskom». Исследование направлено на установление клинической значимости комбинированного использования различных режимов фокусировки при воздействии на глубокие поддерживающие структуры урогенитального тракта и поверхностные функциональные слои влагалищной стенки. Приоритетным направлением стало определение терапевтической эффективности интегрированного подхода к коррекции стрессовой инконтиненции, анатомических деформаций влагалища и связанных с ними нарушений сексуальной сферы у женщин репродуктивного и перименопаузального возраста.

Материалы и методы исследования

Проспективное контролируемое исследование охватило когорту из 87 пациенток в возрастном диапазоне от 29 до 58 лет с верифицированными клиническими проявлениями несостоятельности поддерживающего аппарата тазовых органов. Критериями отбора служили документированное стрессовое недержание мочи первой или второй степени тяжести согласно градации Stamey, синдром релаксированного влагалища с опущением передней вагинальной стенки I–II степени по стандартизированной системе POP-Q, субъективные жалобы на утрату тактильной чувствительности вагинального канала либо болезненность при половом контакте, обусловленную структурными изменениями тканей. Исключающими факторами являлись злокачественные новообразования органов малого таза в медицинском

анамнезе, активные воспалительные процессы мочеполовой системы, выраженные формы пролапса третьей и четвертой степени с показаниями к оперативному вмешательству, состояние беременности и период менее восьми месяцев после родоразрешения.

Рандомизация участниц осуществлялась методом случайного распределения в две сопоставимые группы. Первая группа насчитывала 58 женщин, которым проводилась процедура многоуровневого HIFU-воздействия на аппаратной платформе «Fibroskom», вторая группа включала 29 пациенток, получавших традиционную консервативную терапию в формате структурированных тренировок мускулатуры тазового дна по протоколу Кегеля с применением технологии биологической обратной связи. Дизайн исследования соответствовал этическим нормам Хельсинкской декларации, все участницы предоставили письменное информированное согласие на участие в исследовании и обработку персональных медицинских данных.

Терапевтический протокол комбинированного воздействия строился на концепции поэтапного многоуровневого применения высокоинтенсивного фокусированного ультразвука с вариацией глубины проникновения. Начальная фаза процедуры реализовывалась посредством картриджа с фокусным расстоянием 4,5 мм, обеспечивающего направленное воздействие на глуболежащие соединительнотканые элементы влагалищной стенки. Плотность энергетического потока устанавливалась индивидуально с учетом морфофункционального состояния тканей в интервале от 0,85 до 1,35 Дж/см². Последующая фаза предусматривала переход к картриджу с фокусным расстоянием 3 мм для целенаправленного воздействия на уровне собственной пластинки слизистой оболочки. Энергетические параметры на этом этапе варьировали от 0,7 до 1,1 Дж/см² в зависимости от степени атрофических изменений и толщины эпителиального пласта.

Объективизация терапевтических результатов достигалась применением комплекса инструментальных диагностических методик и валидированных оценочных инструментов. Морфологические изменения влагалищного канала документировались по системе количественной оценки пролапса тазовых органов POP-Q с прецизионным измерением шести референтных точек относительно гименеального кольца. Ультразвуковое сканирование структур промежности в режиме реального времени позволяло визуализировать динамические изменения толщины вагинальной стенки и архитектоники соединительнотканых слоев. Функциональное состояние сексуальной сферы количественно оценивалось с использованием валидированного международного индекса женской сексуальной функции Female Sexual Function Index, охватывающего шесть доменов

сексуального реагирования. Субъективное восприятие терапевтического эффекта фиксировалось по визуальной-аналоговой шкале в диапазоне от нуля до десяти баллов с детализацией отдельных аспектов качества жизни.

Результаты и обсуждения

Статистический анализ полученных данных выявил существенные межгрупповые различия по всему спектру исследуемых параметров с высоким уровнем достоверности. В группе HIFU-терапии спустя трехмесячный период наблюдения полная элиминация симптоматики стрессового недержания мочи зафиксирована у 71,4 % обследованных, выраженная положительная динамика отмечена у 24,1 % пациенток, отсутствие терапевтического ответа констатировано лишь в 4,5 % случаев. В группе консервативной терапии распределение результатов составило соответственно 13,8 %, 41,4 % и 44,8 %, что свидетельствовало о статистически значимом преимуществе технологии фокусированного ультразвука ($p < 0,001$).

Объективные параметры суточного прокладочного теста коррелировали с субъективной оценкой симптоматики. Средний показатель непроизвольной потери мочи в основной группе демонстрировал редукцию с исходных $31,2 \pm 13,7$ граммов до $4,1 \pm 5,3$ граммов, в то время как в контрольной группе динамика составила от $29,8 \pm 12,4$ граммов до $17,3 \pm 10,6$ граммов ($p < 0,001$). Уродинамическое тестирование продемонстрировало увеличение порогового значения давления утечки в группе HIFU-воздействия с $72,6 \pm 19,8$ см водного столба до $124,3 \pm 26,4$ см водного столба, что объективно подтверждало существенное укрепление поддерживающих структур проксимальной уретры и увеличение резистентности к резким перепадам внутрибрюшного давления (рис. 1).

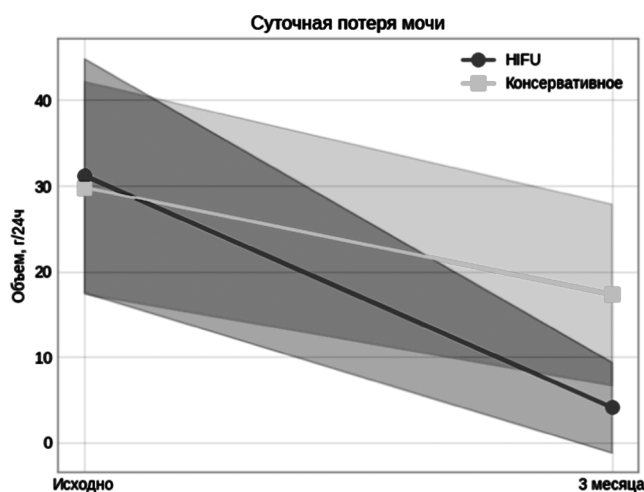


Рис. 1. Суточная потеря мочи

Оценка морфологических изменений топографии тазовых органов по стандартизированной системе POP-Q

зафиксировала статистически значимую коррекцию пролаптических деформаций в группе высокоинтенсивного фокусированного ультразвука. Средняя позиция контрольной точки Aa изменилась от исходного значения $-1,4 \pm 0,9$ см до $-2,6 \pm 0,7$ см, локализация точки Ba трансформировалась с $-0,9 \pm 1,2$ см до $-2,3 \pm 0,8$ см ($p < 0,001$), что отражало существенную элевацию передней вагинальной стенки. В группе консервативного лечения динамика носила минимальный характер и составила для точки Aa от $-1,3 \pm 0,8$ см до $-1,6 \pm 0,9$ см. Ультрасонографическая визуализация показала увеличение средней толщины передней стенки влагалища в основной группе на $28,4 \pm 7,1$ % через три месяца наблюдения и на $34,7 \pm 8,6$ % через шесть месяцев, что патогенетически связано с активацией процессов неокollaгеноза и структурного уплотнения соединительнотканного матрикса (рис. 2).

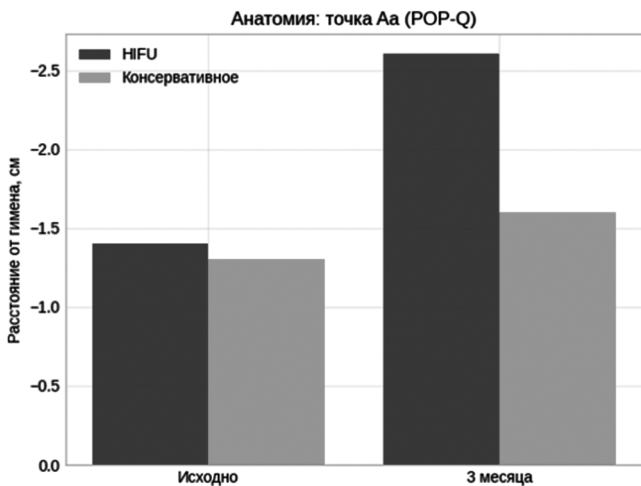


Рис. 2. Анатомия: точка Aa (POP-Q)

Анализ параметров сексуальной функции выявил многокомпонентное улучшение всех исследуемых доменов функционального реагирования (рис. 3). Суммарный балл по индексу FSFI в группе HIFU-терапии демонстрировал прирост с $19,7 \pm 5,8$ до $29,2 \pm 5,1$ через шестимесячный период наблюдения ($p < 0,001$), в контрольной группе изменение показателя составило от $19,3 \pm 5,2$ до $22,1 \pm 6,4$ ($p > 0,05$). Наиболее выраженная положительная динамика регистрировалась в доменах сексуального возбуждения, естественного увлажнения влагалища и общего удовлетворения интимной жизнью. Частота болезненных ощущений при половом контакте в основной группе снизилась с 71,6 % до 12,8 % обследованных, тогда как в контрольной группе существенных изменений данного параметра не зафиксировано.

Субъективная оценка удовлетворенности достигнутыми результатами через полугодовой период составила $8,7 \pm 1,6$ балла в основной группе против $5,6 \pm 2,3$ балла в контрольной группе ($p < 0,001$). При детальном анализе структуры ответов 89,7 % пациенток основной группы

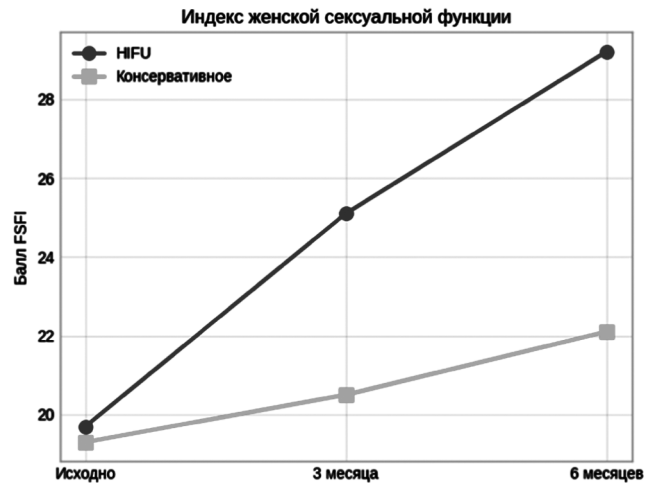


Рис. 3. Индекс женской сексуальной функции

констатировали значительное повышение качества жизни, ассоциированного с состоянием здоровья, в сравнении с 34,5 % в группе консервативной терапии. Существенным наблюдением стала высокая комплаентность к методу фокусированного ультразвука. Все пациентки основной группы завершили протокол исследования в полном объеме, в то время как в контрольной группе 27,6 % участниц преждевременно прекратили регулярное выполнение упражнений для мышц тазового дна вследствие отсутствия быстрого терапевтического эффекта или технических сложностей самостоятельного выполнения тренировочного комплекса.

Долгосрочная эффективность метода оценивалась через двенадцать и восемнадцать месяцев после проведения процедуры. Сохранение полного терапевтического эффекта отмечалось у 76,3 % пациенток через год наблюдения и у 68,2 % через полтора года. Средняя продолжительность клинически значимого улучшения составила $19,8 \pm 5,4$ месяца. Постепенное нарастание терапевтического эффекта соответствовало биологической кинетике процессов ремоделирования соединительнотканного матрикса. Немедленное сокращение существующих коллагеновых волокон обеспечивало первичный клинический результат в течение первых четырех недель, максимальная выраженность эффекта неокollaгеноза достигалась к периоду от трех до шести месяцев и сохранялась на протяжении длительного временного интервала.

Полученные результаты демонстрируют выраженный терапевтический потенциал многоуровневого HIFU-воздействия, обусловленный комплексным влиянием на различные структурно-функциональные компоненты поддерживающего аппарата тазового дна. Применение картриджа с глубиной фокусировки 4,5 мм обеспечивает направленное воздействие на глубокие соединительнотканые структуры, реализуя восстановление поддерживающей функции фасциального каркаса через механизмы термической денатурации патологически

измененного коллагена и последующей активации фибробластического синтеза новых структурных белков. Данный уровень воздействия создает биомеханическую основу для репозиции смещенных органов и формирования прочного поддерживающего остова.

Использование картриджа с фокусным расстоянием 3 мм решает качественно иную терапевтическую задачу, воздействуя на поверхностные функциональные слои влагалищной стенки. Стимуляция микроциркуляторного русла через механизм локального ангиогенеза обеспечивает оптимизацию трофики тканей, что представляет особую клиническую значимость у пациенток перименопаузального и постменопаузального периода с признаками гипоэстрогенной атрофии. Воздействие на уровне собственной пластинки слизистой оболочки активирует популяцию резидентных фибробластов, иницируя синтез компонентов внеклеточного матрикса, включая коллаген третьего типа, эластин и протеогликаны, что приводит к увеличению толщины вагинальной стенки, улучшению эластических свойств тканей и восстановлению естественного увлажнения за счет нормализации трансудации плазменных компонентов через эпителиальный пласт.

Принципиальное значение имеет синергетический эффект двухуровневого воздействия. Глубокий картридж формирует прочный соединительнотканый каркас, аналогичный несущим конструкциям архитектурного сооружения, обеспечивая механическую поддержку органов и противодействие силам гравитации и внутрибрюшного давления. Биологическая безопасность технологии обеспечивается точечным характером термического воздействия с формированием дискретных микрозон контролируемой коагуляции. Между участками термического повреждения сохраняются интактные области тканей, служащие резервуаром жизнеспособных клеточных элементов для процессов регенерации и репарации.

Превосходство технологии HIFU над методами консервативной терапии объясняется различными патогенетическими механизмами терапевтического действия. Тренировки мускулатуры тазового дна обеспечивают функциональное укрепление мышечного компонента поддерживающего аппарата, однако не оказывают влияния на структурные дефекты соединительнотканного каркаса. При наличии фасциальных разрывов, денервации мышечных волокон вследствие травматичных родов или выраженных атрофических изменений на фоне эстрогенного дефицита эффективность консервативных методов существенно снижается. HIFU-воздействие непосредственно восстанавливает поврежденные структуры через механизм контролируемого термического ремоделирования коллагенового матрикса, что обеспечивает более выраженный и стабильный клинический результат. Существенным преимуществом метода вы-

ступает возможность достижения значимого терапевтического эффекта в рамках однократной процедуры без необходимости длительных многомесячных курсов лечения, что значительно повышает комплаентность и удовлетворенность пациенток.

Выводы

Многоуровневое HIFU-воздействие с последовательным применением картриджей различной глубины фокусировки 4,5 мм и 3 мм демонстрирует высокую клиническую эффективность в комплексной коррекции функциональных и структурных нарушений поддерживающего аппарата тазового дна. Метод обеспечивает полное купирование симптоматики стрессового недержания мочи у 71,4 % обследованных, существенную коррекцию пролаптических деформаций с улучшением анатомических параметров на 28–35 % и статистически значимое улучшение всех доменов сексуального функционирования по валидированному индексу FSFI. Продолжительность клинически значимого терапевтического эффекта составляет в среднем 19,8 месяца, что в 2,6 раза превышает результативность традиционной консервативной терапии.

Научная значимость проведенного исследования заключается в обосновании концепции многоуровневого структурного ремоделирования тканей поддерживающего аппарата тазового дна, предполагающей одновременное воздействие на глубокий соединительнотканый каркас и поверхностные функциональные слои влагалищной стенки. Впервые проведена комплексная оценка синергетического эффекта последовательного применения двух различных глубин фокусировки высокоинтенсивного фокусированного ультразвука в рамках единого терапевтического протокола. Установлена патогенетическая обоснованность дифференцированного подхода, обеспечивающего воздействие на ключевые звенья патогенеза дисфункций тазового дна. Доказана возможность достижения стабильных долгосрочных результатов с использованием неинвазивной технологии контролируемого термического ремоделирования соединительнотканного матрикса.

Методика гинекологического HIFU на платформе «Fibroskom», адаптированная для применения в отечественной клинической практике, может быть рекомендована для широкого внедрения в качестве метода выбора при стрессовой инконтиненции первой и второй степени тяжести, синдроме релаксированного влагалища с пролапсом первой и второй степени и ассоциированных сексуальных дисфункциях. Оптимальные терапевтические результаты достигаются при последовательном применении двух режимов воздействия различной глубины с индивидуальным подбором энергетических параметров в зависимости от исходного морфофункционального состояния тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арестова, И.М. Дисфункция тазового дна у женщин: дифференцированный выбор методов коррекции и профилактики основных симптомов (обзор литературы) часть II / И.М. Арестова, С.Н. Занько, Н.П. Жукова [и др.] // Охрана материнства и детства. — 2024. — № 1(43). — С. 39–48. — EDN AIPSRP.
2. Быченко, В.В. Проллап тазовых органов у женщин — скрытая угроза (обзор литературы) / В.В. Быченко // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2: Биология. Геология. Химия. Экология. — 2021. — № 2(18). — С. 73–80. — DOI 10.34130/2306-6229-2021-2-73. — EDN OLRJBL.
3. Гудушаури, Я. Г. Проблема диспареунии при повреждениях тазового кольца у женщин: ретроспективное когортное исследование / Я. Г. Гудушаури, В.В. Коновалов, Э.И. Солод [и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. — 2023. — Т. 30, № 1. — С. 29–40. — DOI 10.17816/vto321288. — EDN ICVWDH.
4. Кукушкина, Л.Ю. Недержание мочи и инфравезикальная обструкция: Сцилла и Харибда женской урологии. Роль методов биологической обратной связи / Л.Ю. Кукушкина, В.В. Ромих, А.В. Сивков, А.Д. Каприн // Экспериментальная и клиническая урология. — 2024. — Т. 17, № 3. — С. 68–79. — DOI 10.29188/2222-8543-2024-17-3-68-79. — EDN PQUALI.
5. Мурашко, О.В. Этиология и патогенез дисфункции тазового дна (обзор литературы) / О.В. Мурашко, А.С. Подгорная, А.Ю. Захарко // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. — 2024. — № 1(31). — С. 16–21. — DOI 10.58708/2074-2088.2024-1(31)-16-21. — EDN IMPBPU.
6. Ремнева, О.В. Дисфункция тазового дна у женщин: современные представления о проблеме (обзор литературы) / О.В. Ремнева, И.С. Иванюк, А.И. Гальченко // Фундаментальная и клиническая медицина. — 2022. — Т. 7, № 1. — С. 92–101. — DOI 10.23946/2500-0764-2022-7-1-92-101. — EDN OTVMPV.
7. Чемидронов, С.Н. Синтопические взаимоотношения мышцы, поднимающей задний проход, с прямой кишкой и стенкой таза человека по данным классических и цифровых морфологических методов исследования / С.Н. Чемидронов, А.В. Колсанов, Г.Н. Суворова // Вестник медицинского института «РЕА-ВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 14–20. — DOI 10.20340/vmi-rvz.2023.4.MORPH.1. — EDN QZWGBG.

© Жлудко Геннадий Геннадиевич (Rukopashnik89@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛИНИКО-ПАТОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННОЙ ПРЕГРАВИДАРНОЙ ПОДГОТОВКИ ЖЕНЩИН СТАРШЕГО РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА С ИДИОПАТИЧЕСКИМ БЕСПЛОДИЕМ И НЕУДАЧНЫМ ОПЫТОМ ЭКО

CLINICAL AND PATHOGENETIC RATIONALE FOR INDIVIDUALIZED PRECONCEPTION CARE IN WOMEN OF ADVANCED REPRODUCTIVE AGE WITH IDIOPATHIC INFERTILITY AND PREVIOUS IVF FAILURES

**A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan
R. Bogdasarova**

Summary. The effectiveness of assisted reproductive technologies (ART) in patients of advanced reproductive age with idiopathic infertility remains low, reaching only 12–18 % live births per embryo transfer in the 38–42 year age cohort [1,2]. The aim of this observational cohort study was to identify specific clinical and anamnestic patterns associated with previous IVF failure to support differentiated preconception care strategies. The study included 239 women aged 35 to 45 years (mean age 37.4 ± 4.1 years) with idiopathic infertility and one previous IVF failure. The use of nonparametric statistical methods allowed us to identify two discrete clinical phenotypes. The main phenotype ($n=115$) was characterized by a significantly higher frequency of background cervical diseases in the anamnesis (23.5 % vs. 8.1 %; $\chi^2=10.52$, $p=0.001$), chronic dermatoses (16.5 % vs. 4.0%; $\chi^2=8.96$, $p=0.003$), as well as non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD) diagnosed during examination (14.8 % vs. 2.4 %; $\chi^2=11.93$, $p=0.0006$) and current dermatological diseases (14.8 % vs. 2.4 %; $\chi^2=11.93$, $p=0.0006$). The second phenotype (comparison group, $n=124$) was characterized by a significantly higher frequency of a history of functional ovarian cysts (20.2 % vs. 9.6 %; $\chi^2=5.92$, $p=0.015$). These data demonstrate clinical heterogeneity in the population of women with unsuccessful IVF experiences. The comorbidity of the first phenotype is interpreted as a clinical manifestation of latent low-grade systemic inflammation, oxidative stress, and endothelial dysfunction, pathogenetically associated with dysregulation of the melatonergic system. The study results substantiate the need to move from standardized protocols to personalized preconception care focused on targeted metabolic, antioxidant, and anti-inflammatory correction in patients with an identified unfavorable phenotype.

Keywords: assisted reproductive technologies, IVF failures, idiopathic infertility, advanced reproductive age, personalized medicine, preconception preparation, oxidative stress, melatonin, non-alcoholic fatty liver disease, clinical phenotypes.

Ичмелян Альберт Мисакович

К.м.н., доцент,

ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
ichmelyan@rambler.ru

Богдасаров Азат Юрьевич

Д.м.н., профессор,

ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
azat-01@mail.ru

Давидян Лиана Юрьевна

Д.м.н., профессор,

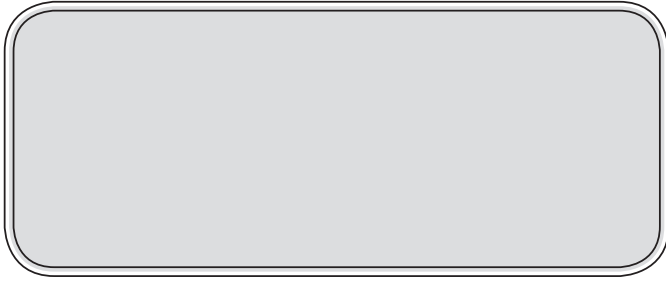
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
dliana2009@mail.ru

Богдасарова Регина Азатовна

Аспирант,

ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
bogdasarovar@bk.ru

Аннотация. Эффективность вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) у пациенток старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием остается низкой, достигая всего 12–18 % живорождений на один перенос эмбриона в возрастной когорте 38–42 лет [1,2]. Целью данного обсервационного когортного исследования было выявление специфических клинико-анамнестических паттернов, ассоциированных с неудачей предыдущего протокола ЭКО, для обоснования дифференцированных стратегий преграavidарной подготовки. В исследование включены 239 женщин в возрасте от 35 до 45 лет (средний возраст 37.4 ± 4.1 года) с идиопатическим бесплодием и одной неудачной попыткой ЭКО в анамнезе. Применение непараметрических методов статистики позволило идентифицировать два дискретных клинических фенотипа. Основной фенотип ($n=115$) характеризовался достоверно более высокой частотой фоновых заболеваний шейки матки в анамнезе (23.5 % против 8.1 %; $\chi^2=10.52$, $p=0.001$), хронических дерматозов (16.5 % против 4.0 %; $\chi^2=8.96$, $p=0.003$), а также диагностированной при обследовании неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП) (14.8 % против 2.4 %; $\chi^2=11.93$, $p=0.0006$) и текущих дерматологических заболеваний (14.8 % против 2.4 %; $\chi^2=11.93$, $p=0.0006$). Для второго фенотипа (группа сравнения, $n=124$) была характерна значимо более высокая частота анамнеза функциональных кист яичников (20.2 % против 9.6 %; $\chi^2=5.92$, $p=0.015$). Полученные данные свидетельствуют о клинической гетерогенности популяции женщин с неудачным опытом ЭКО. Коморбидность первого фенотипа интерпретируется как клиническое проявление латентного системного воспаления низкой степени активности, оксидативного стресса и эндотелиальной дисфункции, патогенетически связанных с дисрегуляцией мелатонинергической системы. Результаты исследования обосновывают необходимость перехода от унифицированных протоколов



Современная репродуктивная медицина сталкивается с существенной проблемой ограниченной эффективности вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) у пациенток старшей возрастной группы. Данные международных регистров, включая отчеты Европейского общества репродукции человека и эмбриологии (ESHRE) и Центров по контролю и профилактике заболеваний США (CDC), последовательно демонстрируют, что доля живорождений в расчете на один перенос эмбриона у женщин в возрасте 38–42 лет с диагнозом идиопатического бесплодия не превышает 12–18 % [1,2]. Такой показатель эффективности делает каждый последующий протокол не только эмоционально, но и финансово обременительным для пациентов и системы здравоохранения. В условиях высокой вероятности повторных неудач, которые могут достигать 70–80 % после четырех-пяти попыток у данной категории, ключевой задачей становится не просто стандартизированное проведение цикла ЭКО, а глубокая индивидуализация подхода, основанная на тщательном анализе всех потенциально корригируемых факторов [3,4]. Особую значимость в этом контексте приобретает детализированная оценка гинекологического и соматического статуса, способная выявить патогенетические субстраты, негативно влияющие на ключевые этапы репродуктивного процесса: от фолликулогенеза и качества ооцитов до имплантации и раннего эмбриогенеза [5,6]. Согласно современным представлениям, успех имплантации лишь на 30 % определяется качеством эмбриона, в то время как до 70 % зависит от рецептивности эндометрия и системных факторов материнского организма [7]. Комплексный анализ структуры сопутствующей патологии и анамнеза у пациенток, уже имеющих негативный опыт ВРТ, позволяет сформировать персонализированные мишени для прегравидарной подготовки, тем самым преодолевая феномен «терапевтического плато», при котором повторные однотипные вмешательства не приводят к увеличению частоты наступления беременности [8,9]. Гипотеза настоящего исследования заключалась в предположении, что женщины старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачным опытом ЭКО представляют собой клинически гетерогенную группу. Внутри этой группы, вероятно, существуют различные патогенетические фенотипы, характеризу-

к персонализированной прегравидарной подготовке, фокусированной на таргетной метаболической, антиоксидантной и противовоспалительной коррекции у пациенток с выявленным неблагоприятным фенотипом.

Ключевые слова: вспомогательные репродуктивные технологии, неудачные попытки ЭКО, идиопатическое бесплодие, старший репродуктивный возраст, персонализированная медицина, прегравидарная подготовка, оксидативный стресс, мелатонин, неалкогольная жировая болезнь печени, клинические фенотипы.

ющиеся специфическими коморбидными профилями, которые требуют дифференцированных, таргетных подходов к коррекции на этапе подготовки к последующему циклу ВРТ.

Целью работы было выявление специфических клинико-анамнестических паттернов, ассоциированных с неудачей предыдущего протокола ЭКО, для обоснования новых, более эффективных стратегий прегравидарной подготовки у данной сложной категории пациенток.

В рамках данного проспективного наблюдательного когортного исследования была сформирована выборка из 239 женщин в перименопаузальном периоде. Возрастной диапазон составил от 35 до 45 лет, средний возраст в когорте — 37.4 ± 4.1 года. Ключевыми критериями включения были: установленный диагноз идиопатического бесплодия (код N97.9 по МКБ-10) и одна неудачная попытка ЭКО в анамнезе, произошедшая в течение предшествующих 18 месяцев. Под неудачной попыткой понималось отсутствие наступления клинической беременности после переноса эмбриона хорошего качества. Для минимизации влияния известных независимых факторов неудачи были применены строгие критерии исключения. К ним относились: тяжелый мужской фактор бесплодия (концентрация сперматозоидов менее 5 млн/мл, прогрессивная подвижность менее 5 % по критериям ВОЗ, 2021), аномальный кариотип у любого из партнеров, синдром поликистозных яичников в классической форме (по критериям Роттердамского консенсуса 2003 г.), эндометриоз III–IV стадии (по классификации Американского общества репродуктивной медицины, ASRM), аутоиммунные заболевания в активной фазе (системная красная волчанка, антифосфолипидный синдром с клиническими проявлениями), а также сахарный диабет I и II типа в стадии декомпенсации (уровень гликированного гемоглобина HbA1c > 7.0 %).

Все участницы, соответствовавшие критериям, были последовательно распределены в две клинические группы: основную (n=115) и группу сравнения (n=124). Исследование носило комплексный характер и включало несколько этапов. Первый этап — развернутый сбор репродуктивного, гинекологического и соматического

анамнеза с детализацией по годам с использованием структурированной анкеты. Второй этап — стандартизированное клинико-лабораторное и инструментальное обследование в рамках подготовки к очередному протоколу ВРТ, проводившееся в условиях многопрофильного стационара. Инструментальная диагностика включала ультразвуковое исследование органов малого таза, эластографию печени для верификации НАЖБП, ультразвуковую доплерографию сосудов малого таза. Лабораторный профиль включал оценку гормонального статуса (ФСГ, ЛГ, АМГ, эстрадиол, прогестерон), маркеров инсулинорезистентности (НОМА-IR), печеночных ферментов, липидного спектра, а также скрининг на инфекции, передаваемые половым путем.

Первичная статистическая обработка данных началась с проверки распределения количественных показателей (возраст, индекс массы тела — ИМТ, окружность талии) на нормальность с помощью критерия Шапиро-Уилка. Анализ подтвердил ненормальное распределение данных во всех сравниваемых выборках (значения *W*-статистики варьировали от 0.888 до 0.951, при *p*-value < 0.001 для всех тестов). В связи с этим для последующего сравнения групп были выбраны непараметрические методы. Сравнение непрерывных переменных проводилось с использованием *U*-критерия Манна-Уитни. Для анализа категориальных переменных применялся критерий хи-квадрат (χ^2) с поправкой Йетса на непрерывность для таблиц 2x2. При анализе таблиц сопряженности большей размерности использовался стандартный критерий χ^2 . Для оценки силы взаимосвязи между порядковыми переменными применялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена (*r*). Статистическая обработка данных проводилась в программной среде R (версия 4.2.1). Уровень статистической значимости был установлен на отметке *p*<0.05.

Результаты статистического анализа подтвердили успешность процедуры формирования сопоставимых групп. Медиана возраста в основной группе составила 38 лет при интерквартильном размахе [36–40] лет, в то время как в группе сравнения данный показатель был равен 37 лет [35–39] лет. Различия не достигло статистической значимости (*U*=6450.5, *p*=0.152). Антропометрические показатели также не имели достоверных различий: медиана индекса массы тела (ИМТ) в основной группе составила 24.7 кг/м² [22.1–27.3] против 24.1 кг/м² [22.0–26.9] в группе сравнения (*U*=6812.0, *p*=0.421). Окружность талии, как маркер абдоминального ожирения, была сопоставимой — 84.5 см [78.0–91.0] против 82.0 см [77.0–89.0] соответственно (*U*=6598.0, *p*=0.251). Социально-демографический профиль был однородным: высшее образование имели 48.7 % женщин в основной группе и 48.4% в группе сравнения ($\chi^2=0.001$, *p*=0.971), статус домохозяйки отмечали 32.2 % и 32.3 % соответственно ($\chi^2<0.001$, *p*=0.989).

Анализ репродуктивного анамнеза показал, что подавляющее большинство пациенток в обеих группах характеризовалось первичным бесплодием: 93.0 % (107 женщин) в основной группе и 94.4% (117 женщин) в группе сравнения ($\chi^2=0.20$, *p*=0.655).

Характеристики менструальной функции, являющиеся интегральным показателем функционирования гипоталамо-гипофизарно-яичниковой оси, статистически значимо не различались. Распределение по возрасту менархе было одинаковым ($\chi^2=0.354$, *p*=0.838), как и параметры длительности ($\chi^2=0.893$, *p*=0.827), обильности менструаций ($\chi^2=0.721$, *p*=0.697) и частота дисменорей ($\chi^2=0.382$, *p*=0.537). Данные результаты свидетельствуют об однородности исследуемой когорты по базовым демографическим и репродуктивным параметрам, что позволяет минимизировать их влияние как confounding-факторов при дальнейшем анализе [10,11].

Детальный анализ гинекологического анамнеза выявил дискретные, но статистически значимые различия между группами, указывающие на различные патогенетические траектории. Так, указания на фоновые заболевания шейки матки в анамнезе (эрозии, эктопии, лейкоплакии) достоверно чаще встречались в основной группе — 23.5 % (27 случаев) против 8.1 % (10 случаев) в группе сравнения ($\chi^2=10.52$, *p*=0.001; отношение шансов, ОШ = 3.49, 95 % ДИ: 1.60–7.64). В то же время, в анамнезе группы сравнения значимо чаще фиксировались эпизоды функциональных кист яичников — 20.2 % (25 случаев) против 9.6 % (11 случаев) в основной группе ($\chi^2=5.92$, *p*=0.015; ОШ = 0.42, 95 % ДИ: 0.20–0.87). Частота таких состояний, как миома матки (11.3 % vs 7.3 %, *p*=0.260), эндометриоз I–II стадии (7.8 % vs 11.3 %, *p*=0.337) и хронический эндометрит по данным анамнеза (6.1 % vs 6.5 %, *p*=0.860), была сопоставима между группами [12, 13].

При углубленном инструментально-лабораторном обследовании перед планируемым протоколом ВРТ статистически значимых различий в структуре текущей гинекологической патологии выявлено не было. Однако отмечалась клинически значимая тенденция к более высокой распространенности воспалительных заболеваний шейки матки (цервицитов) в основной группе — 47.0 % против 36.3 % в группе сравнения ($\chi^2=2.791$, *p*=0.095). Распространенность хронического эндометрита по данным пайпель-биопсии эндометрия с иммуногистохимическим исследованием (CD138+) также не различалась, составляя 18.3 % в основной группе и 16.9 % в группу сравнения (*p*>0.05) [14].

Анализ соматического анамнеза продемонстрировал выраженное преобладание в основной группе указаний на хронические воспалительные и иммуноопосредованные кожные заболевания (атопический дерматит, роза-

цеа, экзема) — 16.5 % против 4.0 % в группе сравнения ($\chi^2=8.96$, $p=0.003$; ОШ = 4.70, 95 % ДИ: 1.68-13.59). Кроме того, отмечались тенденции к более частому анамнезу рекуррентных острых респираторных вирусных инфекций (более 3 эпизодов в год) — 8.7 % vs 3.2 % ($p=0.068$) и варикозного расширения вен малого таза — 11.3 % vs 5.6 % ($p=0.125$) [15,16].

Наиболее значимые различия были обнаружены при комплексном клинико-лабораторном обследовании. Неалкогольная жировая болезнь печени (НАЖБП), верифицированная по данным УЗИ и эластографии (стеатоз S1-S2 по критериям SAF), диагностировалась у 14.8 % (17 пациенток) основной группы и лишь у 2.4% (3 пациенток) группы сравнения ($\chi^2=11.93$, $p=0.0006$; ОШ = 7.03, 95 % ДИ: 1.99–25.70). Аналогичная, статистически значимая разница была выявлена для текущих активных дерматологических заболеваний (14.8 % vs 2.4 %, $\chi^2=11.93$, $p=0.0006$). Важно отметить, что распространенность синдрома инсулинорезистентности, диагностированного по критериям HOMA-IR > 2.7, была сопоставимой (7.8 % vs 5.6 %, $p=0.502$). Также не выявлено различий в частоте патологии щитовидной железы (гипотиреоз, эутиреоидный статус), заболеваний мочевыделительной и дыхательной систем [17,18].

Полученные в ходе исследования данные позволяют выдвинуть и обосновать гипотезу о существовании двух различных клинико-патогенетических фенотипов среди женщин старшего репродуктивного возраста с неудачным опытом ЭКО на фоне идиопатического бесплодия. Выявленные ассоциации носят не случайный характер и, вероятно, отражают глубинные различия в патофизиологии репродуктивной неудачи [19].

Первый фенотип, репрезентируемый основной группой, характеризуется специфическим симптомокомплексом, включающим отягощенный анамнез по патологии шейки матки, склонность к хроническим воспалительным дерматозам, высокую частоту НАЖБП и тенденцию к тазовому варикозу. Совокупность этих клинических признаков может служить маркером латентно протекающего системного воспаления низкой степени активности (low-grade inflammation), оксидативного стресса и эндотелиальной дисфункции [20,21]. Патогенетическую связь между этими состояниями можно проследить через призму дисрегуляции мелатонинергической системы. Мелатонин, секретируемый эпифизом, является не только «гормоном сна», но и мощным эндогенным антиоксидантом, иммуномодулятором и вазопротектором [22, 23]. Его дефицит или нарушение циркадного ритма секреции приводит к снижению антиоксидантной защиты, нарушению циркадных ритмов иммунного ответа (с преобладанием провоспалительного фенотипа макрофагов M1) и микроциркуляторным расстройствам вследствие эндотелиальной дисфункции [24,25].

В репродуктивном контексте этот каскад создает исключительно неблагоприятный фон. Оксидативный стресс, уровень которого коррелирует с тяжестью НАЖБП и дерматозов, напрямую повреждает мембраны и митохондрии ооцитов, снижая их энергетический потенциал и компетентность, а также индуцирует апоптоз клеток гранулезы, ухудшая микроокружение фолликула [26, 27]. Хроническое системное воспаление, о чем свидетельствуют кожные проявления и склонность к цервицитам, нарушает тонкий иммунный баланс в эндометрии, необходимый для успешной имплантации и плацентации, способствуя т.н. «иммунологическому отторжению» эмбриона [28, 29]. Микроциркуляторная недостаточность, ассоциированная с эндотелиальной дисфункцией и варикозом, ухудшает перфузию яичников и матки, ограничивая доставку кислорода, питательных веществ и гонадотропинов к целевым органам [30]. Таким образом, у пациенток данного фенотипа неудача ЭКО может быть обусловлена не локальным гинекологическим фактором, а генерализованным метаболически-воспалительным дисбалансом, который не корректируется стандартной гормональной стимуляцией в протоколе ЭКО [31].

Второй фенотип (группа сравнения), для которого характерен анамнез функциональных кист яичников при существенно меньшей частоте системных метаболических и воспалительных маркеров, скорее указывает на иной механизм репродуктивной недостаточности. Рецидивирующие функциональные кисты могут быть индикатором нарушений процесса овуляции, лютеинизации фолликула или особенностей реакции яичников на эндогенные гонадотропины [32]. Этот фенотип, вероятно, отражает более периферические, возможно, гормонально-опосредованные нарушения фолликулогенеза и овуляторной функции, которые потенциально более чувствительны к стандартным методам коррекции в рамках оптимизированного протокола контролируемой ovarian стимуляции (подбор типа и дозы гонадотропинов, использование агонистов/антагонистов ГнРГ) [33, 34].

Выявленные различия имеют принципиальное значение для клинической практики, так как подчеркивают фундаментальную неоднородность когорты «неудач ЭКО» и диктуют необходимость дифференцированного подхода к прегравидарной подготовке. Для пациенток первого (основного) фенотипа приоритетом должна стать не просто стандартная гормональная подготовка эндометрия, а целенаправленная, продолжительная (не менее 2–3 месяцев) метаболическая и антиоксидантная коррекция, направленная на улучшение овариального и эндометриального микроокружения [35, 36]. Основываясь на предполагаемом патогенезе, такая коррекция может включать: Коррекцию циркадных ритмов и оксидативного стресса: применение мелатонина

в дозе 3–5 мг на ночь для восстановления антиоксидантного потенциала и иммуномодуляции [37]. Улучшение инсулиночувствительности и метаболизма ооцитов: назначение мио-инозитола в дозе 2000–4000 мг/сутки, что подтверждено в исследованиях при синдроме поликистозных яичников и может быть экстраполировано на пациенток с инсулинорезистентностью и НАЖБП [38]. Гепатопротекторную терапию: использование урсодезоксихолевой кислоты (10–15 мг/кг/сутки) при подтвержденной НАЖБП для снижения гепатоцеллюлярного повреждения и системного воспаления [39]. Восполнение дефицита витамина D (под контролем уровня 25(OH)D в крови) для модуляции иммунного ответа и улучшения рецептивности эндометрия [40]. Санацию хронических очагов инфекции (шейка матки, влагалище) с последующей коррекцией микробиома пробиотиками [41].

Таким образом, результаты проведенного комплексного клинико-анамнестического исследования с применением современных методов статистического анализа убедительно демонстрируют, что женщины старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачной попыткой ЭКО в анамнезе представляют собой не гомогенную, а клинически гетерогенную популяцию. У значительной части таких пациенток (в данном исследовании — до 48.1 % от общей когорты) выявляется специфический симптомокомплекс, включающий

коморбидность дерматологических заболеваний, неалкогольной жировой болезни печени и хронической патологии шейки матки. С высокой долей вероятности данный фенотип является клиническим отражением лежащего в основе системного оксидативного стресса, хронического воспаления низкой степени активности и эндотелиальной дисфункции, патогенетически ассоциированных с дисрегуляцией мелатонинергической системы.

Данный фенотип требует принципиально иного подхода — разработки и внедрения специальных, расширенных протоколов прегравидарной подготовки, сфокусированных на коррекции метаболических и воспалительных нарушений, а не только на оптимизации параметров протокола стимуляции суперовуляции. Дифференциация пациенток на выделенные клинико-патогенетические подгруппы на этапе планирования повторного цикла ВРТ позволит перейти от унифицированной, эмпирической тактики к истинно персонализированной, патогенетически обоснованной медицине. Это является наиболее перспективным путем для преодоления «терапевтического плато», повышения кумулятивной частоты наступления беременности у данной сложной категории пациенток и снижения как экономического бремени повторных неудачных попыток, так и психологической травмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Geyter C., Calhaz-Jorge C., Kupka M.S., et al. ART in Europe, 2015: results generated from European registries by ESHRE. *Hum Reprod Open*. 2020;2020(1):hoz038. <https://doi.org/10.1093/hropen/hoz038>
2. Centers for Disease Control and Prevention, American Society for Reproductive Medicine, Society for Assisted Reproductive Technology. 2019 Assisted Reproductive Technology National Summary Report. Atlanta (GA): US Dept of Health and Human Services; 2021.
3. McLernon D.J., Maheshwari A., Lee A.J., Bhattacharya S. Cumulative live birth rates after one or more complete cycles of IVF: a population-based study of linked cycle data from 178,898 women. *Hum Reprod*. 2016;31(3):572–581. <https://doi.org/10.1093/humrep/dev336>
4. Краснопольская К.В., Назаренко Т.А. Возрастной фактор в реализации репродуктивной функции женщин // *Акушерство и гинекология*. — 2020. — № 5. — С. 13–19. <https://doi.org/10.18565/aig.2020.5.13-19>
5. Cimadomo D., Fabozzi G., Vaiarelli A., et al. Impact of maternal age on oocyte and embryo competence. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2018;9:327. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00327>
6. Тетруашвили Н.К., Сидельникова В.М. Невынашивание беременности и неудачи имплантации после ЭКО: общие патогенетические механизмы // *Акушерство и гинекология*. — 2018. — № 10. — С. 18–24. <https://doi.org/10.18565/aig.2018.10.18-24>
7. Miravet-Valenciano J.A., Ruiz-Alonso M., Gomez E., Garcia-Velasco J.A. Endometrial receptivity: a molecular approach. *Curr Opin Obstet Gynecol*. 2020;32(3):211–219. <https://doi.org/10.1097/GCO.0000000000000627>
8. Papathanasiou A., Searle B.J., King N.M., Bhattacharya S. Trends in 'poor responder' research: lessons learned from RCTs in assisted conception. *Hum Reprod Update*. 2016;22(3):306–319. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmw001>
9. Аполихина И.А., Горбунова Е.А., Карева Е.Н. и др. Прегравидарная подготовка: от стандартов к персонализированному подходу // *Репродуктивное здоровье детей и подростков*. — 2021. — Т. 17, № 4. — С. 75–87. <https://doi.org/10.33029/1816-2134-2021-17-4-75-87>
10. Назаренко Т.А., Михалева Л.М. Бесплодный брак. Современные подходы к диагностике и лечению. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. — 304 с.
11. La Marca A., Sunkara S.K. Individualization of controlled ovarian stimulation in IVF using ovarian reserve markers: from theory to practice. *Hum Reprod Update*. 2014;20(1):124–140. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmt037>
12. Базина М.И., Липова Е.В. Особенности гинекологического анамнеза и состояния эндометрия у пациенток с неудачными попытками ЭКО // *Проблемы репродукции*. — 2017. — Т. 23, № 5. — С. 54–59.
13. Кузнецова И.В., Корсак В.С. Значение хронического эндометрита в неудачах имплантации // *Акушерство и гинекология*. — 2019. — № 3. — С. 25–30.
14. Lebovitz O., Orvieto R. Treating patients with «thin» endometrium — an ongoing challenge. *Gynecol Endocrinol*. 2014;30(6):409–414. <https://doi.org/10.3109/09513590.2014.906571>

15. Корнеева И.Е., Карева Е.Н. Оксидативный стресс и женское репродуктивное здоровье: возможности коррекции // Эффективная фармакотерапия. — 2021. — Т. 17, № 8. — С. 42–49. <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2021-17-8-42-49>
16. Agarwal A., Aponte-Mellado A., Premkumar B.J., et al. The effects of oxidative stress on female reproduction: a review. *Reprod Biol Endocrinol.* 2012;10:49. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-10-49>
17. Rudick B.J., Ingles S.A., Chung K., et al. Influence of vitamin D levels on in vitro fertilization outcomes in donor-recipient cycles. *Fertil Steril.* 2014;101(2):447–452. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2013.10.047>
18. Донников А.Е., Бурменская О.В., Кветной И.М. Мелатонин как интегральный регулятор репродуктивной функции // Проблемы репродукции. — 2019. — Т. 25, № 4. — С. 26–34. <https://doi.org/10.17116/repro20192504126>
19. Franasiak J.M., Scott R.T. Contribution of the oocyte to embryo quality. *Fertil Steril.* 2018;110(4):628–629.
20. Victor V.M., Rocha M., Bañuls C., et al. Mitochondrial complex I impairment in leukocytes from polycystic ovary syndrome patients with insulin resistance. *J Clin Endocrinol Metab.* 2009;94(9):3505–3512. <https://doi.org/10.1210/jc.2009-0464>
21. Kalra S.K., Ratcliffe S.J., Barnhart K.T., et al. Extended embryo culture and an increased risk of preterm delivery. *Obstet Gynecol.* 2012;120(1):69–75.
22. Reiter R.J., Tan D.X., Rosales-Corral S., et al. Melatonin as a mitochondria-targeted antioxidant: one of evolution's best ideas. *Cell Mol Life Sci.* 2017;74(21):3863–3881. <https://doi.org/10.1007/s00018-017-2609-7>
23. Acuña-Castroviejo D., Escames G., Venegas C., et al. Extrapineal melatonin: sources, regulation, and potential functions. *Cell Mol Life Sci.* 2014;71(16):2997–3025. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1579-2>
24. Tordjman S., Chokron S., Delorme R., et al. Melatonin: Pharmacology, Functions and Therapeutic Benefits. *Curr Neuropharmacol.* 2017;15(3):434–443. <https://doi.org/10.2174/1570159X14666161228122115>
25. Hardeland R. Melatonin and inflammation—Story of a double-edged blade. *J Pineal Res.* 2018;65(4):e12525. <https://doi.org/10.1111/jpi.12525>
26. Babayev E., Seli E. Oocyte mitochondrial function and reproduction. *Curr Opin Obstet Gynecol.* 2015;27(3):175–181. <https://doi.org/10.1097/GCO.0000000000000166>
27. Showell M.G., Mackenzie-Proctor R., Jordan V., Hart R.J. Antioxidants for female subfertility. *Cochrane Database Syst Rev.* 2020;8(8):CD007807. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD007807.pub4>
28. Mor G., Aldo P., Alvero A.B. The unique immunological and microbial aspects of pregnancy. *Nat Rev Immunol.* 2017;17(8):469–482. <https://doi.org/10.1038/nri.2017.64>
29. Kwak-Kim J., Yang K.M., Gilman-Sachs A. Recurrent pregnancy loss: a disease of inflammation and coagulation. *J Obstet Gynaecol Res.* 2009;35(4):609–622. <https://doi.org/10.1111/j.1447-0756.2009.01079.x>
30. Jarvela I.Y., Sladkevicius P., Kelly S., et al. Effect of endometriosis on IVF/ICSI outcome: stage III/IV endometriosis worsens cumulative pregnancy and live-born rates. *Hum Reprod.* 2015;30(7):1690–1696. <https://doi.org/10.1093/humrep/dev124>
31. Oudshoorn S.C., van Tilborg T.C., Eijkemans M.J.C., et al. Individualized versus standard FSH dosing in women starting IVF/ICSI: an RCT. Part 1: The predicted poor responder. *Hum Reprod.* 2017;32(12):2496–2505. <https://doi.org/10.1093/humrep/dex318>
32. Baerwald A.R., Adams G.P., Pierson R.A. Ovarian antral folliculogenesis during the human menstrual cycle: a review. *Hum Reprod Update.* 2012;18(1):73–91. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmr039>
33. Regidor P.A., Schindler A.E., Lesoine B., Druckman R. Management of women with PCOS using myo-inositol and folic acid. *New clinical data and review of the literature. Horm Mol Biol Clin Investig.* 2018;34(2).
34. Busnelli A., Somigliana E., Cirillo F., et al. Efficacy of therapies and interventions for repeated embryo implantation failure: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep.* 2021;11(1):1747. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81439-6>
35. Lensen S.F., Armstrong S., Gibreal A., et al. A randomized trial of endometrial scratching before in vitro fertilization. *N Engl J Med.* 2019;380(4):325–334. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1808737>
36. Gameiro S., Boivin J., Dancet E., et al. ESHRE guideline: routine psychosocial care in infertility and medically assisted reproduction—a guide for fertility staff. *Hum Reprod.* 2015;30(11):2476–2485. <https://doi.org/10.1093/humrep/dev177>
37. Fernando S., Wallace E.M., Vollenhoven B., Lolatgis N., Hope N., Wong M., et al. Melatonin in assisted reproductive technology: a pilot double-blind randomized placebo-controlled clinical trial. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2021;12:744648. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.744648>
38. Unfer V., Facchinetti F., Orrù B., et al. Myo-inositol effects in women with PCOS: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Endocr Connect.* 2017;6(8):647–658. <https://doi.org/10.1530/EC-17-0243>
39. El Hachem H., Crepaux V., May-Panloup P., et al. Recurrent pregnancy loss: current perspectives. *Int J Womens Health.* 2017;9:331–345. <https://doi.org/10.2147/IJWH.S100817>
40. Chu J., Gallos I., Tobias A., et al. Vitamin D and assisted reproductive treatment outcome: a systematic review and meta-analysis. *Hum Reprod.* 2018;33(1):65–80. <https://doi.org/10.1093/humrep/dex326>
41. Moreno I., Simon C. Deciphering the effect of reproductive tract microbiota on human reproduction. *Reprod Med Biol.* 2019;18(1):40–50. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12249>

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);
Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru); Богдасарова Регина Азатовна (bogdasarovar@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДНЕСРОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНЫХ ГОМОГРАФТОВ И ОПЕРАЦИИ БИОБЕНТАЛЛ: ОПЫТ ОДНОГО ЦЕНТРА

COMPARATIVE ANALYSIS OF MID-TERM RESULTS OF AORTIC HOMOGRAFT IMPLANTATION AND THE BIO-BENTALL PROCEDURE: A SINGLE-CENTER EXPERIENCE

R. Komarov
M. Tkachev
R. Isaev
A. Karakotova
G. Varlamov
I. Gailaev
N.-S. Choibsonov
T. Maisian

Summary. Introduction. The evolution of reconstructive aortic root surgery has opened new horizons in the treatment of its pathology. However, in cases where preservation of the native valve is impossible, the surgeon faces the challenge of choosing an optimal conduit. The classic Bentall mechanical conduit, while remaining the «gold standard,» condemns patients to lifelong anticoagulant therapy. In the search for a physiological alternative free from this limitation, two biological strategies are of particular interest: the use of a cryopreserved aortic homograft and the creation of a composite conduit bioprosthesis (the Bio-Bentall procedure). A comparative analysis of the mid-term outcomes of these procedures is a relevant clinical task, the solution of which determines the choice of surgical tactics in each specific case.

Aim. To conduct a comparative assessment of long-term clinical results and hemodynamic efficacy of the aortic homograft and the Bio-Bentall conduit in the surgical correction of aortic root pathology.

Materials and methods. A single-center retrospective cohort study analyzed data from 41 patients divided into two groups: Group 1 (n=19) — aortic homograft implantation; Group 2 (n=22) — the Bio-Bentall procedure. The mean follow-up period was 58.2 ± 13.9 months (range 36–83 months) and 51.2 ± 22.7 months, respectively ($p=0.159$). Primary endpoints were in-hospital mortality, cumulative survival, freedom from a combined endpoint of major adverse cardiovascular events (MACE), and reoperation rate. Secondary endpoints included intraoperative parameters and long-term hemodynamic indicators.

Results. In-hospital mortality (n=2; 10.5 % vs. n=2; 9.1 %; $p>0.05$) and cumulative freedom from MACE at 48 months (88.9 ± 7.4 % vs. 86.7 ± 8.8 %; $p=0.864$) did not differ significantly between the groups. The complication profiles had characteristic features: in the homograft group, no reoperations were required in the long-term period, although some patients showed progression of valve dysfunction. In the Bio-Bentall group, myocardial infarctions (3 cases) and bioprosthetic thrombosis (1 case) were registered. Cumulative freedom from reoperation at 48

Комаров Роман Николаевич

д.м.н., профессор, Первый Московский государственный
медицинский университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Ткачёв Максим Игоревич

к.м.н., доцент, Первый Московский государственный
медицинский университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)
tkachev.cardiovascular@gmail.com

Исаев Руслан Магомедович

к.м.н., ассистент, Первый Московский государственный
медицинский университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Каракотова Альмира Муратбиевна

сердечно-сосудистый хирург, аспирант,
Первый Московский государственный медицинский
университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Варламов Георгий Аркадьевич

Первый Московский государственный медицинский
университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Гайлаев Ильяс Данилбекович

Первый Московский государственный медицинский
университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Чойбсонов Нима-Сурун Цырен-Дашиевич

Первый Московский государственный медицинский
университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

Маисян Тигран Артёмович

Первый Московский государственный медицинский
университет имени И.М. Сеченова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(Сеченовский Университет)

months was 100 % in Group 1 and 92.3 ± 7.4 % in Group 2 ($p > 0.05$). The use of a homograft was associated with a longer cardiopulmonary bypass time (167.1 ± 52.0 min vs. 152.9 ± 76 min; $p < 0.05$) and aortic cross-clamp time (130.0 ± 22.6 min vs. 109.8 ± 38 min; $p < 0.05$). A key advantage of the homograft was its hemodynamic superiority, expressed in lower transvalvular gradients (4.6 ± 1.9 mm Hg vs. 10.7 ± 1.74 mm Hg; $p < 0.01$) and a larger effective orifice area index (1.36 ± 0.23 cm²/m² vs. 0.93 ± 0.1 cm²/m²; $p < 0.01$) in the long-term period.

Conclusion. Aortic homografts and the Bio-Bentall conduit demonstrate comparable and satisfactory mid-term clinical efficacy. Homograft implantation is associated with superior hemodynamics and no need for lifelong anticoagulation but requires monitoring due to the risk of valve dysfunction related to graft remodeling. The Bio-Bentall procedure is a technically reproducible alternative that requires careful planning to minimize the risk of patient-prosthesis mismatch and thrombotic events.

Keywords: aortic root, aortic homograft, Bio-Bentall procedure, reconstructive aortic surgery, prosthesis hemodynamics, valve dysfunction.

Аннотация. Введение. Развитие реконструктивной хирургии корня аорты открыло новые горизонты в лечении пациентов с его патологией. Однако в случаях, когда сохранение нативного клапана невозможно, хирург сталкивается с необходимостью выбора оптимального замещающего кондуита. Классический механический конduit по Бенталлу, оставаясь «золотым стандартом», обрекает пациентов на пожизненную антикоагулянтную терапию. В поиске физиологичной альтернативы, свободной от этого ограничения, особый интерес представляют две биологические стратегии: использование криоконсервированного аортального гомографта и создание комбинированного кондуита с биопротезом (операция БиоБенталл). Сравнительный анализ среднесрочных исходов этих процедур является актуальной клинической задачей, от решения которой зависит выбор хирургической тактики в каждом конкретном случае.

Цель. Провести сравнительную оценку отдалённых клинических результатов и гемодинамической эффективности аортального гомографта и кондуита БиоБенталл при хирургической коррекции патологии корня аорты.

Материалы и методы. В рамках одноцентрового ретроспективного когортного исследования проанализированы данные 41 пациента, разделённых на две группы: группа 1 ($n=19$) — имплантация аортального гомографта; группа 2 ($n=22$) — операция БиоБенталл. Средний срок наблюдения составил $58,2 \pm 13,9$ месяцев и $51,2 \pm 22,7$ месяца соответственно ($p=0,159$). Первичными конечными точками были госпитальная летальность, кумулятивная выживаемость, свобода от комбинированной точки неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (МАСЕ) и частота реопераций. Вторичными — интраоперационные параметры и отдалённые гемодинамические показатели.

Результаты. Показатели госпитальной летальности ($n=2$; 10,5 % против $n=2$; 9,1 %; $p > 0,05$) и кумулятивной свободы от МАСЕ к 48 месяцам наблюдения ($88,9 \pm 7,4$ % против $86,7 \pm 8,8$ %; $p=0,864$) статистически не различались между группами. Структура осложнений имела характерные особенности: в группе гомографтов в отдалённом периоде реопераций не потребовалось, однако у части пациентов отмечалось прогрессирующее дисфункции клапана. В группе БиоБенталл были зарегистрированы инфаркты миокарда (3 случая) и тромбоз биопротеза (1 случай). Кумулятивная свобода от реопераций через 48 месяцев составила 100 % в группе 1 и $92,3 \pm 7,4$ % в группе 2 ($p > 0,05$). Применение гомографта было сопряжено с большим временем искусственного кровообращения ($167,1 \pm 52,0$ мин. против $152,9 \pm 76$ мин.; $p < 0,05$) и пережатия аорты ($130,0 \pm 22,6$ мин. против $109,8 \pm 38$ мин.; $p < 0,05$). Ключевым преимуществом гомографта явилось его гемодинамическое превосходство, выразившееся в более низких трансклапанных градиентах ($4,6 \pm 1,9$ мм рт.ст. против $10,7 \pm 1,74$ мм рт.ст.; $p < 0,01$) и большем индексе эффективной площади отверстия ($1,36 \pm 0,23$ см²/м² против $0,93 \pm 0,1$ см²/м²; $p < 0,01$) в отдалённом периоде.

Заключение. Аортальный гомографт и конduit БиоБенталл обладают сопоставимой и удовлетворительной среднесрочной клинической эффективностью. Имплантация гомографта ассоциирована с лучшей гемодинамикой и отсутствием необходимости в пожизненной антикоагулянтной терапии, однако требует наблюдения в связи с риском развития клапанной дисфункции, связанной с ремоделированием трансплантата. Операция БиоБенталл представляет собой технически воспроизводимую альтернативу, требующую тщательного планирования для минимизации риска несоответствия «протез-пациент» и тромботических событий.

Ключевые слова: корень аорты, аортальный гомографт, операция БиоБенталл, реконструктивная хирургия аорты, гемодинамика протезов, дисфункция клапана.

Введение

Современный этап развития кардиохирургии характеризуется устойчивым смещением парадигмы в сторону реконструктивных вмешательств. Реконструктивная хирургия корня аорты, при всей своей технической сложности, все больше привлекает хирургов, стремящихся не просто заместить, но сохранить и восстановить нативный аортальный клапан [1]. Подобный подход демонстрирует значимое улучшение долгосрочного прогноза и качества жизни пациентов по сравнению с традиционным протезированием [2]. Однако идеальный протез, сочетающий в себе минимальный градиент давления, абсолютную тромборезистентность и неограниченную долговечность, остается недостижимым идеалом [3]. Кроме того, возможности клапан-сберегающей хирургии не безграничны. При врожденных аномалиях, выраженном кальцинозе, пролапсе или перфорации створок, попытка сложной реконструкции сопряжена с повышенным риском резидуальной регургитации, прогрессии патологии створок и других специфических осложнений [4].

Исторически сложилось, что «золотым стандартом» коррекции аневризм корня аорты с несостоятельным клапаном остается операция Бенталл-Де Боно с композитным механическим кондуитом [5]. Ее неоспоримым недостатком является имплантация механического протеза, диктующая необходимость пожизненной антикоагулянтной терапии и не всегда обеспечивающая оптимальные гемодинамические характеристики [6]. Стремление нивелировать это ограничение привело к разработке методики БиоБенталл, предполагающей интраоперационное создание композитного кондуита из сосудистого протеза и биологического протеза АК [7]. Данный подход освобождает пациента от варфарина, однако приносит риски, присущие всем ксенобиопротезам: ограниченную долговечность, обусловленную структурной дегенерацией, и потенциальное несоответствие эффективной площади отверстия (ЭПО) протеза метаболическим потребностям пациента, что клинически проявляется высокими остаточными градиентами [8]. В отечественной практике отсутствие серийно производимого кондуита данной конструкции делает операцию БиоБенталл более трудоемкой, увеличивая время искусственного кровообращения.

В этом контексте криоконсервированные аортальные гомографты (АГ) продолжают занимать значимое место в арсенале хирурга, предлагая уникальную комбинацию биологической совместимости, хорошей гемодинамики и отсутствия необходимости в длительной антикоагуляции.

Материалы и методы

Дизайн и организация исследования. Настоящая работа представляет собой одноцентровое ретроспективное когортное исследование. Критериям включения соответствовали 41 пациент в возрасте от 18 до 60 лет, перенесших плановое вмешательство на корне аорты. Критериями исключения экстренный характер операции, необходимость в сочетанных коронарных или иных вмешательствах.

В зависимости от примененной методики пациенты были разделены на две группы: группа 1 (n=19) — реконструкция корня аорты с использованием криоконсервированного аортального гомографта и группа 2 (n=22) — реконструкция по принципу БиоБенталл — имплантация кондуита с интраоперационно вшитым в его просвет бескаркасным биологическим протезом аортального клапана.

Средний срок динамического наблюдения составил $58,2 \pm 13,9$ месяцев в группе 1 и $51,2 \pm 22,7$ месяцев в группе 2 ($p=0,159$).

Конечные точки исследования. Первичными конечными точками были определены: 30-дневная (госпитальная) летальность, кумулятивная выживаемость, свобода от комбинированной точки неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (МАСЕ), включавшей смерть от всех причин, острый инфаркт миокарда, острое нарушение мозгового кровообращения и инфекционный эндокардит, а также кумулятивная свобода от повторных вмешательств на аортальном клапане или корне аорты.

Вторичные конечные точки включали интраоперационные параметры (длительность искусственного кровообращения (ИК) и пережатия аорты), частоту и структуру ранних послеоперационных осложнений, а также комплекс гемодинамических показателей, оцениваемых трансторакальной эхокардиографией перед выпиской и в отдаленном периоде: средний трансклапанный градиент, индекс эффективной площади отверстия (ЭПО) и степень аортальной регургитации.

Статистический анализ. Обработка данных проводилась с использованием программного пакета SPSS Statistics 26.0 (IBM, США). Проверка количественных переменных на нормальность распределения осуществлялась с помощью критерия Шапиро–Уилка. Данные с нормальным распределением представлены как $M \pm SD$ и сравнивались с применением t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Для переменных с распределением, отличным от нормального, использовались медиана и межквартильный разряд [Me (Q25; Q75)], а для их сравнения — U-критерий Манна–Уитни. Сравнение качественных признаков проводилось с использованием

критерия χ^2 или точного критерия Фишера. Анализ выживаемости и построение кривых Каплана–Мейера для оценки свободы от MACE и реопераций выполнялись с применением лог-ранк теста для сравнения групп. Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты

Интраоперационные показатели. Сравнительный анализ интраоперационных данных выявил различия между группами. В группе 1 (гомографт) продолжительность искусственного кровообращения была больше, чем в группе 2 (Биобенталл): $167,1 \pm 52,0$ минуты против $152,9 \pm 76$ минут соответственно ($p < 0,05$). Аналогичная закономерность наблюдалась и в отношении времени пережатия аорты: $130,0 \pm 22,6$ минуты в группе 1 против $109,8 \pm 38$ минут в группе 2 ($p < 0,05$).

Ранние послеоперационные исходы. Показатель госпитальной летальности составил 2 случая (10,5 %) в группе аортального гомографта и 2 случая (9,1 %) в группе Биобенталл, однако это различие не достигло статистической значимости ($p > 0,05$). Оба летальных исхода в группе гомографтов были связаны с прогрессированием сердечной недостаточности у пациентов, оперированных по поводу инфекционного эндокардита. В группе Биобенталл умершие пациенты имели тяжелый коморбидный фон и высокий балл по шкале EuroSCORE II. Во всех случаях непосредственной причиной явилась острая сердечно-сосудистая недостаточность. Не было выявлено достоверных межгрупповых различий и в частоте основных госпитальных осложнений, таких как повторное хирургическое вмешательство в связи с кровотечением, острый инфаркт миокарда, инсульт, острая почечная недостаточность или необходимость в экстракорпоральной мембранной оксигенации. Длительность пребывания в отделении реанимации и общая госпитализация также были сопоставимы.

Среднесрочные клинические исходы. Кумулятивная выживаемость в группе 1 к концу периода наблюдения составила 89,5 %. После выписки из стационара летальные исходы не зафиксированы. Свобода от комбинированной конечной точки MACE в течение 48 месяцев наблюдения продемонстрировала статистически незначимые различия между группами ($p = 0,864$). В группе Биобенталл все три зафиксированных события в рамках MACE были представлены острым инфарктом миокарда, развившимся в различные сроки после операции.

Реоперации. В группе 1 (гомографт) за весь период наблюдения реопераций не отмечалось. В группе 2 выполнена 1 реоперация через 27 месяцев в связи с тромбозом биологического компонента кондуита Биобенталл. Кумулятивная свобода от реопераций через 48 меся-

цев составила 100 % в группе 1 и $92,3 \pm 7,4$ % в группе 2 ($p > 0,05$).

Гемодинамические результаты. Оценка функционального состояния имплантированных клапанов выявила существенные гемодинамические преимущества аортального гомографта. Перед выпиской средний трансклапанный градиент в группе 1 был значимо ниже, чем в группе 2 ($4,1 \pm 1,8$ мм рт.ст. против $10,14 \pm 1,96$ мм рт.ст.; $p < 0,01$). Эта тенденция сохранилась и в отдаленном периоде: $4,6 \pm 1,9$ мм рт.ст. против $10,7 \pm 1,74$ мм рт.ст. соответственно ($p < 0,01$). Индекс эффективной площади отверстия, измеренный в отдаленном периоде, также был достоверно выше в группе гомографтов ($1,36 \pm 0,23$ см²/м² против $0,93 \pm 0,1$ см²/м²; $p < 0,01$). Распространенность клинически значимой аортальной недостаточности (степень 2+) в отдаленном периоде между группами значимо не различалась ($p = 0,253$). Примечательно, что гемодинамические параметры аортального гомографта в отдаленном периоде не имели статистически значимых отличий от показателей здоровых добровольцев по максимальной скорости (118 ± 10 см/с против 128 ± 37 см/с; $p = 0,053$), пиковому ($7,9 \pm 3,3$ мм рт.ст. против $7,7 \pm 4,6$ мм рт.ст.; $p = 0,839$) и среднему градиенту ($4,1 \pm 1,8$ мм рт.ст. против $3,8 \pm 2,3$ мм рт.ст.; $p = 0,567$).

Обсуждение

Результаты проведенного исследования вносят существенный вклад в сравнительную оценку двух стратегий биологической реконструкции корня аорты, применяемых в ситуациях, когда клапан-сберегающая операция невыполнима или сопряжена с неприемлемо высоким риском. Основной вывод заключается в констатации сопоставимых среднесрочных показателей общей выживаемости и свободы от серьезных нежелательных событий для аортального гомографта и кондуита Биобенталл. Это согласуется с концепцией, что обе методики являются клинически приемлемыми альтернативами механическому протезу для пациентов, стремящихся избежать пожизненной антикоагулянтной терапии [6,9].

Принципиальным отличием в структуре осложнений, выявленным в нашей работе, стал различный характер дисфункции имплантатов в среднесрочной перспективе. В группе аортального гомографта не было зафиксировано реопераций, однако у части пациентов отмечалось прогрессирование дисфункции клапана. Наши данные указывают, что более молодой возраст ($< 61,5$ лет), наличие ИБС и увеличенное время ишемии миокарда (> 130 минут) ассоциированы с риском развития дисфункции гомографта. Это может быть связано с более активными иммунными и ремоделирующими процессами у молодых пациентов, а также с ухудшением условий репарации при длительной ишемии. В противовес этому, в группе Биобенталл доминировали тромботические

и ишемические события, что указывает на иной профиль риска, связанный с наличием биологического ксенокомпонента и потенциальным протромбогенным эффектом, актуализируя вопросы оптимальной послеоперационной антитромботической стратегии.

Первое ключевое различие касается интраоперационных аспектов. Большее время искусственного кровообращения и пережатия аорты в группе гомографтов может быть связано с техническими особенностями имплантации криоконсервированного аллографта, требующей тщательного подбора размера и анатомического расположения устьев коронарных артерий.

Второе и наиболее клинически значимое отличие — гемодинамическое. Установленное превосходство аортального гомографта по ключевым параметрам — более низкому трансклапанному градиенту и большему индексу ЭПО — не является случайной находкой. Это прямое следствие его анатомического строения и отсутствия ригидного поддерживающего каркаса, что обеспечивает гидродинамические характеристики, максимально приближенные к нативному клапану. Более того, наши данные продемонстрировали, что гемодинамические показатели гомографта статистически не отличаются от таковых у здоровых добровольцев, что подчеркивает его уникальную физиологичность. Высокие градиенты, зафиксированные в группе Биобенталл, служат наглядным подтверждением феномена несоответствия «протез-пациент» (patient-prosthesis mismatch, PPM), который остается ахиллесовой пятой многих биологических протезов, особенно малых размеров [8,11]. Для молодых, физически активных пациентов или лиц с гипертрофией миокарда левого желудочка наличие даже умеренного PPM может иметь долгосрочные негативные последствия, влияя на регресс гипертрофии и функциональный статус.

Таким образом, выбор между методами трансформируется в стратегическое решение, основанное на взве-

шенной оценке. Аортальный гомографт представляется оптимальным выбором для пациентов старше 61,5 лет без значимой коронарной патологии, когда можно минимизировать время ишемии миокарда. Для таких пациентов гомографт обеспечивает не только освобождение от антикоагуляции, но и гемодинамику, максимально приближенную к нативной, с отличной долговечностью в среднесрочной перспективе. Для пациентов моложе этого возрастного порога, особенно с сопутствующей ИБС, необходимо взвешенно оценивать риск прогрессирования дисфункции трансплантата, рассматривая альтернативные методы коррекции. Операция Биобенталл сохраняет свою нишу как стандартизированная методика, особенно в ситуациях ограниченной доступности гомографтов, однако ее применение требует скрупулезного предоперационного планирования для минимизации PPM и тромботических рисков.

Заключение

Аортальный гомографт и кондуит Биобенталл демонстрируют сопоставимую и удовлетворительную среднесрочную клиническую эффективность, заслуживая места в арсенале современных методов хирургии корня аорты. Имплантация гомографта ассоциирована с исключительными гемодинамическими результатами и освобождением от антикоагулянтной терапии. Однако в среднесрочной перспективе требуется наблюдение за риском развития клапанной дисфункции, связанной с процессами ремоделирования трансплантата. Операция Биобенталл, являясь надежной технической альтернативой, требует тщательной оценки риска несоответствия «протез-пациент» и сопряжена с увеличением продолжительности искусственного кровообращения и риском тромботических событий. Окончательный выбор метода должен основываться на принципах персонализированной медицины, учитывая возраст, анатомию, коморбидный фон, образ жизни пациента и ресурсы центра.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ouzounian M, Feindel CM, Manlihot C, David C, David TE. Valve-sparing root replacement in patients with bicuspid versus tricuspid aortic valves // *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2019. Т. 158, № 1. С. 1–9.
2. David TE, Feindel CM, Webb GD, Colman JM, Armstrong S, Maganti M. Long-term results of aortic valve-sparing operations for aortic root aneurysm // *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2006. Т. 132, № 2. С. 347–354.
3. Cahill TJ, Terre JA, George I. Over 15 years: the advancement of transcatheter aortic valve replacement // 2020. 2020. Т. 9, № 6. С. 442–451.
4. Mastrobuoni S, Tamer S, de Kerchove L, El Khoury G. Valve sparing: aortic root replacement with the reimplantation technique // *Multimedia Manual of Cardio-Thoracic Surgery*. 2015.
5. Bentall H., De Bono A. A technique for complete replacement of the ascending aorta // *Thorax*. 1968. Т. 23, № 4. С. 338–339.
6. Etz CD, Homann TM, Silovitz D, et al. и др. Long-Term Survival After the Bentall Procedure in 206 Patients With Bicuspid Aortic Valve // *The Annals of Thoracic Surgery*. 2007. Т. 84, № 4. С. 1186–1194.
7. Mookhoek A, Korteland NM, Arabkhani B, et al. Bentall Procedure: A Systematic Review and Meta-Analysis // *The Annals of Thoracic Surgery*. 2016. Т. 101, № 5. С. 1684–1689.
8. Pibarot P, Dumesnil J. G. Prosthesis-patient mismatch: definition, clinical impact, and prevention // *Heart*. 2006. Т. 92, № 8. С. 1022–1029.

9. Wendt D, Raweh A, Knipp S, et al. Comparison of mid-term haemodynamic performance between the BioValsalva and the BioIntegral valved conduits after aortic root replacement // *Interact CardioVasc Thorac Surg*. 2016. Т. 23, № 1. С. 112–117.
10. Kaya A, Heijmen RH, Kelder JC, Morshuis WJ. First 102 Patients With the BioValsalva Conduit for Aortic Root Replacement // *The Annals of Thoracic Surgery*. 2012. Т. 94, № 1. С. 72–77.
11. Head SJ, Mkhles MM, Osnabrugge RL, et al. The impact of prosthesis–patient mismatch on long-term survival after aortic valve replacement: a systematic review and meta-analysis of 34 observational studies comprising 27 186 patients with 133 141 patient-years // *European Heart Journal*. 2012. Т. 33, № 12. С. 1518–1529.

© Комаров Роман Николаевич; Ткачёв Максим Игоревич (tkachev.cardiovascular@gmail.com);
Исаев Руслан Магомедович; Каракотова Альмира Муратбиевна; Варламов Георгий Аркадьевич;
Гайлаев Ильяс Данилбекович; Чойбсонов Нима–Сурун Цырен–Дашиевич; Маисян Тигран Артёмович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕРАПИИ ЖЕНЩИН СО ВТОРИЧНОЙ СТРЕСС-АССОЦИИРОВАННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АНОВУЛЯЦИЕЙ

PREDICTION OF EFFICACY OF COMPLEX THERAPY IN WOMEN WITH SECONDARY STRESS-ASSOCIATED FUNCTIONAL ANOVULATION

**E. Osadchaya
L. Tselkovich
R. Balter
T. Ivanova
V. Kotelnikov
O. Ilchenko**

Summary. There is a need for an in-depth study of predictors of therapy effectiveness and the development of personalized algorithms for the management of patients with secondary stress-associated chronic functional anovulation. The results of a case-control study involving 114 women of reproductive age were considered, predictors of the effectiveness of FA therapy at the diagnostic stage were identified and analyzed to justify a personalized approach. A two-level system for predicting the effectiveness of treatment of patients has been developed and validated.

Keywords: chronic functional anovulation, stress, diagnosis, predictive models of treatment efficacy, assisted reproductive technologies, menstrual cycle, ovulation, infertility.

Проведенные исследования доказывают, что функциональная ановуляция (ФА) — диагностируемый методом исключения после детального анализа и подтверждения отсутствия каких-либо структурных нарушений, влияющих на женскую репродуктивную функцию [1–3]. Развитие данной патологии обусловлено множеством факторов, а частота ее выявления

Осадчая Евгения Игоревна
Соискатель, Самарский государственный
медицинский университет;
ООО «Международная Био Клиника», г. Самара
japen4ela@gmail.com

Целкович Людмила Савельевна
Д.м.н., профессор, Самарский государственный
медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru

Балтер Регина Борисовна
Д.м.н., профессор, Самарский государственный
медицинский университет
regina.balter@yandex.ru

Иванова Татьяна Владимировна
К.м.н., доцент, Самарский государственный
медицинский университет
t.v.ivanova@samsmu.ru

Котельников Виталий Владимирович
К.м.н., врач акушер-гинеколог,
ООО «Международная Био Клиника»
uzi_ipo@samsmu.ru

Ильченко Олеся Андреевна
К.м.н., ассистент, Самарский государственный
медицинский университет
olesay.ilchenko@gmail.com

Аннотация. Определена потребность в углубленном изучении предикторов эффективности терапии и разработке персонализированных алгоритмов ведения пациенток со вторичной стресс-ассоциированной хронической функциональной ановуляцией. Рассмотрены результаты исследования типа «случай-контроль» с участием 114 женщин репродуктивного возраста, выделены и проанализированы предикторы эффективности терапии ФА на диагностическом этапе для обоснования персонализированного подхода. Разработана и валидизирована двухуровневая система прогнозирования эффективности лечения пациенток.

Ключевые слова: хроническая функциональная ановуляция, стресс, диагностика, прогностические модели эффективности лечения, репродуктивные технологии, менструальный цикл, овуляция, бесплодие.

неуклонно увеличивается благодаря росту сопутствующих заболеваний, среди которых наиболее распространены ожирение и сахарный диабет [4–6]. К ФА также приводят широкое использование некоторых групп препаратов, включая опиоиды и глюкокортикостероиды [7, 8]. Также негативное воздействие оказывают неправильные поведенческие привычки, в том числе, интен-

сивные тренировки, строгие диеты и длительные эмоциональные стрессы [9, 10]. Таким образом, без коррекции вышеуказанных основных причин, восстановления нормальной работы репродуктивной системы достичь крайне сложно [11, 12].

Современный подход к лечению вторичной хронической ФА представлен в отечественных клинических рекомендациях и базируется на комплексном подходе, включающем изменение образа жизни, корректировку питания, психологическое сопровождение и, при наличии проблем с фертильностью, использование *вспомогательных репродуктивных технологий* (ВРТ) [13–16].

Однако несмотря на общий консенсус по основным принципам терапии, результаты лечения остаются неоднозначными: значительное число пациенток не восстанавливают нормальные менструально-овариальные циклы даже при тщательном выполнении врачебных предписаний [17]. Механизмы устойчивости к применяемым схемам также до конца неясны. Современные протоколы как правило ориентированы на достижение беременности через ВРТ. Между тем женщины, желающие восстановить регулярную функцию яичников вне зависимости от ближайших планов по деторождению, зачастую получают недостаточное внимание [18, 19].

Все это подчеркивает необходимость дальнейших исследований факторов, определяющих успешность терапии, доказывает актуальность разработки индивидуальных подходов по ведению пациенток с данным заболеванием.

Исходя из вышеуказанного, целью данного исследования стало выявление факторов-предикторов, позволяющих прогнозировать эффективность лечения хронической функциональной ановуляции уже на стадии диагностики, чтобы обосновать индивидуальный подход к лечению данной категории пациенток.

В данной работе представлено открытое исследование, которое проведено методом случайной выборки по принципу «случай–контроль». Всего в нем приняли участие 114 женщин репродуктивного возраста — от 18 до 45 лет. Основная группа включала 54 женщины с подтвержденной хронической функциональной ановуляции, жалующихся на нарушения менструального цикла и бесплодие длительностью свыше года. Контрольная группа состояла из 60 здоровых женщин с регулярными овуляторными циклами и нормальной фертильностью.

Критерии включения в исследование:

- возраст 18–45 лет;
- отсутствие морфологических причин нарушения функции репродуктивной оси, мужского фактора бесплодия и хронической соматической патоло-

гии, нарушающей возможность вынашивания беременности;

- наличие информированного добровольного согласия на участие в исследовании.

Критериями исключения из исследования:

- органические, мужские или иммунологические факторы бесплодия;
- коморбидная патология, препятствующая наступлению и вынашиванию беременности;
- отказ от участия в исследовании.

Для подтверждения диагноза ФА все участницы прошли комплексное обследование у гинеколога-эндокринолога, а также, при наличии показаний, были проконсультированы смежными специалистами.

После верификации диагноза и оценки уровня стресса по шкале PSS все пациентки основной группы получили **немедикаментозную коррекцию**:

- консультация психолога;
- курс персонализированной терапии, в т. ч. когнитивно-поведенческая терапия и терапия принятия ответственности;
- модификация образа жизни с ограничением потребления кофеина и алкоголя;
- индивидуальная коррекция микронутриентного статуса.

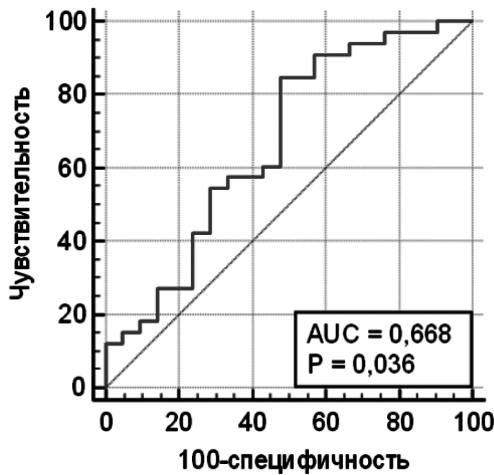
Параллельно с немедикаментозной коррекцией проводилась **гормональная терапия** с использованием двухфазных препаратов заместительной гормональной терапии на основе:

- 17β-эстрадиола (2 мг) в комбинации с Дидрогестероном (10 мг);
- Эстрадиола валерата (2 мг) с индивидуальным подбором гестагенного компонента (Норгестрел 0,5 мг, Ципротерон ацетат 1 мг или Левоноргестрел 0,15 мг).

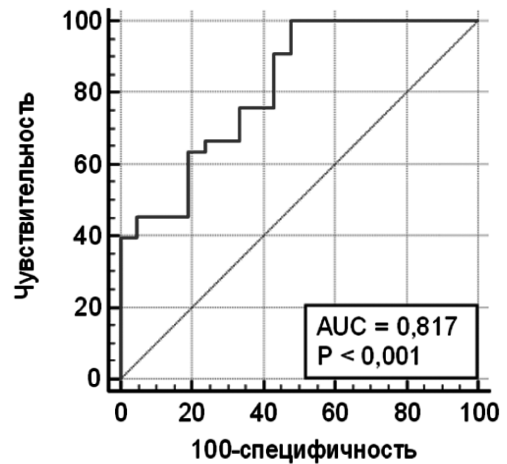
Через шесть месяцев лечения была проведена оценка эффективности терапии, проконтролирован уровень воспринимаемого стресса (PSS) и содержания тиреоидных, гипофизарных и надпочечниковых гормонов.

В работе был применен **комплексный диагностический подход**:

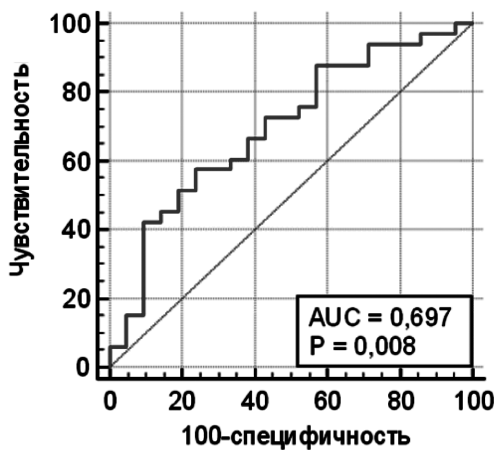
- оценка психоэмоционального статуса с помощью русскоязычной версии «Шкалы воспринимаемого стресса» (PSS-10) [20];
- исследование суточной динамики кортизола и ДГЭА в слюне методом твердофазного иммуноферментного анализа;
- определение уровня кортизола и ДГЭА-С, гипофизарных и тиреоидных гормонов в сыворотке крови методом иммунохемилюминесцентного анализа.



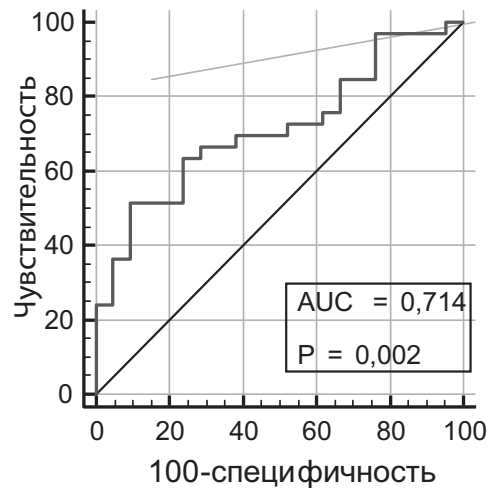
Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от динамики ДГЭА в слюне и PSS-баллов



Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от динамики кортизола и ДГЭА в слюне, PSS-баллов



Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от кортизола, ДГЭА-С, их соотношения в крови и PSS-баллов



Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от динамики кортизола в крови и PSS-баллов

Рис. 1. РОК-кривые прогноза излеченности женщин с ФА, ассоциированной с хроническим стрессом (по показателям PSS, кортизола и ДГЭА в крови и слюне)

Анализ статистической информации осуществлялся посредством программного обеспечения MedCalc версии 15.2 и Microsoft Excel. Для выявления факторов риска рассчитывалось отношение шансов (ОШ) вместе с 95 %-м доверительным интервалом (ДИ). Различия признавались статистически значимыми при $p < 0,05$. Прогностическая ценность биомаркеров стресса определялась методом ROC-анализа. Точность построенной модели оценивалась через значение площади под кривой (AUC).

Также был выполнен ROC-анализ прогностического значения уровня общего кортизола и дегидроэпандростерона сульфата (ДГЭА-С) в крови, а также суточных изменений кортизола и ДГЭА в слюне относительно возможности восстановления гормональной регуляции половой системы у пациенток с ФА (рис. 1).

Результаты анализа предсказательной ценности рассматриваемых маркеров представлены в табл. 1.

Данные в таблице говорят о том, что основное предсказательное значение в отношении восстановления овариального цикла имела шкала PSS и соотношение ДГЭА-С/кортизол. Точкой отсечения благоприятного исхода являлись 29 баллов по шкале PSS и ДГЭА-С/Кортизол=25. Тем не менее интерпретации отдельно каждого из рассматриваемых показателей для оценки клинически значимых порогов и формировании тактики лечения женщин с ФА оказалось недостаточно. Соответственно, были выделены комбинированные прогностические модели PSS с маркерами хронического стресса: кортизол и ДГЭА-С.

Для формирования прогностической комбинированной модели использована формула (табл. 2):

Таблица 1.

Прогностическая ценность показателей кортизола, ДГЭА-С в крови и стадии воспринимаемого стресса (PSS) в баллах

Показатель	AUC	95 % ДИ	Точка отсечения	Чувствительность, %	Специфичность, %	p-value
Кортизол общий	0,71	0,58–0,84	298,4 нмоль/л	73	69	0,015
ДГЭА-С	0,68	0,55–0,81	8100 нмоль/л	70	66	0,032
Соотношение ДГЭА-С/кортизол	0,76	0,64–0,88	25,0	78	74	0,006
PSS баллы	0,79	0,68-0,90	29 баллов	81	77	0,002

$$\text{Вероятность излечения} = 1/(1+e^{-(1,2-0,05 \times \text{PSS} + 0,08 \times \text{ДГЭА-С/К}_{\text{соотношение}})})$$

Таблица 2.

Комбинированная прогностическая модель

Модель	AUC	Точность, %	Чувствительность, %	Специфичность, %
PSS + Соотношение ДГЭА-С/К	0,83	81	82	80
Все параметры	0,85	83	84	82

Проделанная работа позволила вывести прогноз восстановления овуляторного менструального цикла, который основан на конкретных показателях выделенных маркеров (табл. 3).

Таблица 3.

Группы риска и вероятность восстановления овуляторного менструального цикла у женщин с стресс-ассоциированной ФА

Группа риска	PSS (баллы)	Соотношение ДГЭА/К	Вероятность излечения, %
Низкий риск	<26	>30	85–90
Средний риск	26–32	20–30	55–56
Высокий риск	>32	<20	20–30

Установлено, что высокая вероятность восстановления овуляторного менструального цикла (85–90 %) возможна у женщин с числом баллов PSS ниже 26 и соотношением ДГЭА-С/кортизол в крови более тридцати. У тех женщин, у которых количество баллов PSS превышало 32, а соотношение ДГЭА-С/кортизол в крови было менее 20, вероятность спонтанного восстановления овуляторного менструального цикла не превышала 30 %.

Также по рассмотренным маркерам были обозначены клинически значимые пороги, дающие возможность врачам-практикам ориентироваться в выборе тактики лечения пациенток с ФА (табл. 4).

Полученные результаты позволили говорить о том, что на благоприятный прогноз, помимо рассмотренных

Таблица 4.

Критические точки отсечения для практического применения прогноза выздоровления для женщин со стресс-ассоциированной ФА

Параметр	Благоприятный прогноз	Неблагоприятный прогноз
PSS баллы	<29	≥29
Соотношение ДГЭА / Кортизол	≥25	<25
Кортизол общий	<300 нмоль/л	≥300 нмоль/л
ДГЭА-С	≥8000 нмоль/л	<8000 пг/мл

выше параметров PSS и соотношения ДГЭА-С/кортизол в крови, указывали абсолютные значения общего кортизола в крови — менее 300 нмоль/л и ДГЭА-С — свыше 8000 нмоль/л.

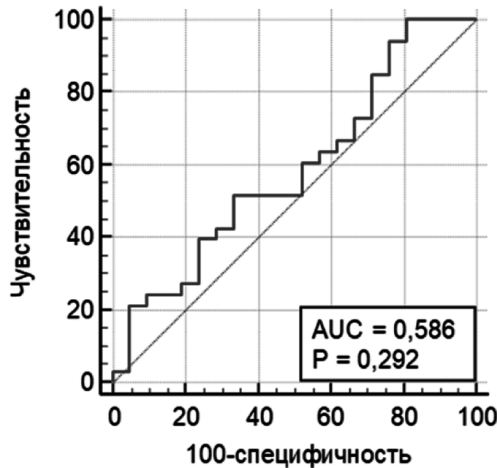
В результате полученного анализа составлена рейтинговая таблица прогностической ценности эффективности компонентов стресс-реализующей системы организма (табл. 5).

Таблица 5.

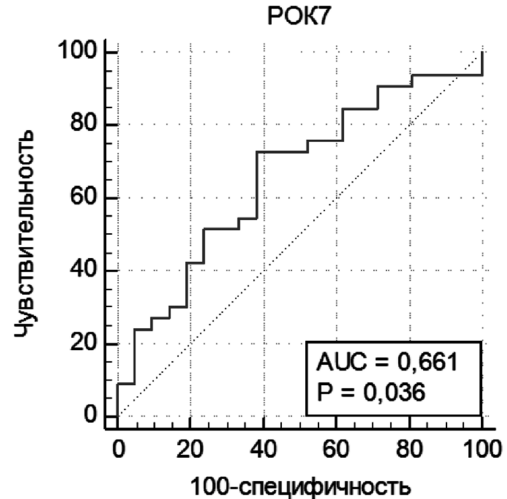
Рейтинг прогностической ценности маркеров стресс-реализующей системы организма женщин с хронической ФА

Ранг	Параметр	AUC	Клиническая значимость
1	PSS баллы	0,79	Очень высокая
2	Соотношение ДГЭА / кортизол	0,76	Высокая
3	Кортизол общий	0,71	Средняя
4	ДГЭА-С	0,68	Средняя

Наибольшая клиническая значимость отмечена у шкалы воспринимаемого стресса PSS (AUC=0,79). На втором месте оказался параметр соотношение ДГЭА/кортизол (AUC=0,76), который также оценивался как высоко эффективный маркер. Общее количество кортизола (AUC=0,71) и содержание дегидроэпиандростерона (ДГЭА-С, AUC=0,68) показали умеренную диагностическую ценность при прогнозе возобновления



Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от содержания ФСГ, ЛГ, пролактина и PSS-баллов



Прогноз излеченности женщин с ФА — в зависимости от содержания Т3, Т4 и PSS-баллов

Рис. 2. РОК-кривые прогноза излеченности женщин с ФА ассоциированным с хроническим стрессом, по комплексному показателю PSS, гипофизарных и тиреоидных гормонов в крови

регулярного овуляторного менструального цикла после терапии.

Соответственно, наиболее информативным предиктором излеченности женщин со ФА оказалась шкала воспринимаемого стресса — PSS-шкала (рекомендуемый порог <29) и отношение ДГЭА-С к уровню кортизола (рекомендуемый порог ≥ 25). Комплексная оценка указанных факторов значительно повышает точность прогностической деятельности (AUC = 0,85), что позволяет использовать данные критерии для отбора пациентов с высоким шансом положительного эффекта от лечения и оптимизации индивидуального терапевтического плана.

На следующем этапе был проведен РОК-анализ прогностической ценности гипофизарных и тиреоидных гормонов, которые непосредственно регулируют функционирование репродуктивной системы (рис. 2).

Анализируя совокупность представленного спектра гормонов вместе с показателями PSS, отмечено, что гипофизарные гормоны с показателем AUC=0,586 ($p=0,292$) имели низкую прогностическую значимость, тогда как тиреоидные гормоны, с показателем AUC=0,661 ($p=0,036$), характеризовались средней прогностической ценностью в отношении эффективности проведенного лечения.

С учетом значительной волатильности индивидуальных гормональных показателей и их взаимозависимости друг от друга, в частности, в рамках тиреоидной системы, далее был проведен дополнительный анализ прогностической ценности отдельных показателей и их комбинаций, определены оптимальные точки отсечения (табл. 6).

Свободный тироксин (Т4 св.) продемонстрировал высокую диагностическую точность, с отличным балансом чувствительности и специфичности: AUC=0,75 (95 % ДИ: 0,63–0,87), $p=0,005$, точка отсечения >9,8 пмоль/л (чувствительность 76 %, специфичность — 73 %). Высокая статистическая значимость ($p < 0,01$) подчеркивала его важность как биомаркера. Свободный трийодтиронин (Т3 св.) также показывал хорошую прогностическую способность: AUC=0,72 (95 % ДИ: 0,60–0,84), $p=0,011$, точка отсечения <4,45 пмоль/л (чувствительность 73 %, специфичность 70 %). Важно отметить, что, в отличие от Т4, низкий уровень Т3 являлся предиктором неблагоприятного клинического исхода.

Анализ уровня пролактина выявил умеренно высокие показатели прогностического потенциала: AUC=0,71 (95 % ДИ: 0,58–0,84), $p=0,018$, точка отсечения >650 мкМЕ/мл (чувствительность 70 %, специфичность 71 %). Повышенный пролактин оказался статистически значимым фактором риска отсутствия достижения ремиссии заболевания.

Показатель ТТГ в исследовании проявлял схожие качества и обладал умеренной прогностической ценностью: AUC=0,69 (95 % ДИ: 0,56–0,82), $p=0,025$, точка отсечения >4,25 мкМЕ/мл (чувствительность 67 %, специфичность 71 %). Вместе с тем, показатель был статистически значим ($p < 0,05$), а его пороговое значение соответствовало стандартному верхнему пределу нормы. Однако клиницисты могли использовать данный показатель для принятия решений.

Последний из изучаемых показателей тиреоидной системы — антитела к тиреоглобулину (АТ-ТГ): AUC=0,68 (95 % ДИ: 0,55–0,81), $p=0,035$; точка отсечения >65 МЕ/мл

Таблица 6.

Прогностическая ценность отдельных показателей тиреоидных и гипофизарных гормонов в стадии воспринимаемого стресса (PSS), баллы

Параметр	AUC	95 % ДИ	Точка отсечения	Чувствительность, %	Специфичность, %	p-value
ТТГ	0,69	0,56–0,82	>4,25 мкМЕ/мл	67	71	0,025
Т3 свободный	0,72	0,60–0,84	<4,45 пмоль/л	73	70	0,011
Т4 свободный	0,75	0,63–0,87	>9,8 пмоль/л	76	73	0,005
АТ-ТГ	0,68	0,55–0,81	>65 МЕ/мл	66	69	0,035
Пролактин	0,71	0,58–0,84	>650 мкМЕ/мл	70	71	0,018
ФСГ	0,66	0,53–0,79	<3,0 мМЕ/мл	64	67	0,048
ЛГ	0,63	0,50–0,76	<3,5 мМЕ/мл	61	65	0,087*
PSS	0,82	0,71–0,93	>29 баллов	81	78	0,001

(чувствительность 66 %, специфичность 69 %) также, как и ТТГ, показывал умеренную прогностическую способность. При этом высокий уровень антител указывал на наличие активного аутоиммунного процесса и ухудшения прогноза течения болезни.

Фолликулостимулирующий гормон (ФСГ) показал скромные результаты и минимальное прогностическое значение: AUC=0,66 (95 % ДИ: 0,53–0,79), p=0,048, точка отсечения <3,0 мМЕ/мл (чувствительность 64 %, специфичность 67 %). Лютеинизирующий гормон (ЛГ) стал наиболее слабым индикатором среди исследованных: AUC=0,63 (95 % ДИ: 0,50–0,76), p=0,087, точка отсечения <3,5 мМЕ/мл (чувствительность 61 %, специфичность 65 %) Соответственно, ФСГ не мог считаться надежным прогностическим маркером.

Основываясь на полученных результатах, была составлена рейтинговая прогностическая значимость рассматриваемых маркеров (табл. 7).

Таблица 7.

Рейтинг прогностической значимости PSS, гипофизарных и тиреоидных гормонов

Ранг	Параметр	AUC	Клиническая значимость
1	PSS баллы	0,82	Очень высокая
2	Т4 свободный	0,75	Высокая
3	Т3 свободный	0,72	Высокая
4	Пролактин	0,71	Средняя
5	ТТГ	0,69	Средняя
6	АТ-ТПО	0,68	Средняя
7	ФСГ	0,66	Умеренная
8	ЛГ	0,63	Низкая

Применительно к клинической практике можно говорить о том, что наиболее важными показателями, влияющими на прогноз выздоровления у пациенток со стресс-зависимой ФА являлись PSS и свободные тиреоидные гормоны (тироксин и трийодтиронин). Этот факт обязательно нужно учитывать при обосновании лечения и прогноза заболевания. К второстепенным, но значимым индикаторам, можно отнести пролактин, ТТГ и АТ-ТГ. Их также стоит учитывать при выборе объема и продолжительности терапии. Относительно ФСГ и ЛГ необходимо отметить, что их значимость в плане прогноза восстановления самостоятельного овуляторного цикла после проведенного лечения весьма ограничена. Следовательно, использовать их для построения прогноза необоснованно.

Далее была дана оценка комбинированным прогностическим моделям исхода болезни, включающих показатели PSS и другие важные маркеры прогноза излеченности пациенток (табл. 8).

Анализ комбинированных прогностических моделей, представленных в таблице, продемонстрировал высокую эффективность использования комплексных критериев для оценки вероятности выздоровления пациенток с хронической ФА. Наиболее информативной оказалась комбинация трёх показателей: уровня психологического напряжения (PSS), концентрации свободного тироксина и содержания пролактина. В отношении комбинации PSS + Т4 св. отмечена высокая прогностическая сила, баланс между чувствительностью и специфичностью и, как преимущество, эта модель была более проста в использовании по сравнению с полной моделью. Что касается модели PSS + пролактин (AUC = 0,83; точность = 81 %; чувствительность = 82 %, специфичность = 80 %), то она продемонстрировала сопоставимую ценность с моделью PSS + Т4 св., дополнительно подчеркивая значимость взаимосвязи уровня стресса и эндокринной регуляцией репродуктивной оси.

Таблица 8.

Комбинированные прогностические математические модели

Модель	AUC	Точность, %	Чувствительность, %	Специфичность, %	Формула расчета вероятности
PSS + Т4 св.	0,84	82	83	81	Вероятность=1/ (1+ e ^{-(1,5-0,06×PSS+0,15×Т4св)})
PSS + пролактин	0,83	81	82	80	Вероятность=1/ (1+e ^{-(1,8-0,07×PSS — 0,002×пролактин)})
Все значимые параметры	0,87	85	86	84	Вероятность=1/ (1+e ^{-(2,1-0,05×PSS + 0,12×Т4св— 0,0018×пролактин)})

Таким образом, представленные комбинированные модели превосходят одиночные отдельные параметры по предсказательной способности (AUC 0,84-0,87 против 0,63–0,82 для отдельных параметров). Постоянным элементом всех успешных вариантов оказался PSS, подтверждающий критическую роль стрессового фактора. Оптимальной признана полная трёхфазная модель, однако упрощенные двухпараметрические версии также демонстрировали высокую эффективность прогноза излеченности.

На основании проведённого анализа в клинической практике рекомендовано использовать модель PSS + Т4 св. как оптимальное сочетание точности прогноза и практичности применения.

Полученные в ходе работы результаты были использованы для формирования рекомендаций относительно стратегии терапии женщин со стресс-ассоциированной ФА (табл. 9).

Таблица 9.

Клинический прогноз и интерпретация пороговых значений PSS, гипофизарных и тиреоидных гормонов у женщин с ФА

Параметр	Благоприятный прогноз	Неблагоприятный прогноз	Клиническая интерпретация
PSS	<29 баллов	≥29 баллов	Низкий / высокий уровень стресса
Т4 свободный	≥9,8 пмоль/л	<9,8 пмоль/л	Нормальный / сниженный тиреоидный статус
Т3 свободный	≥4,45 пмоль/л	<4,45 пмоль/л	Адекватная периферическая конверсия
Пролактин	<650 мкМЕ/мл	≥650 мкМЕ/мл	Отсутствие гиперпролактинемии
ТТГ	<4,25 мкМЕ/л	≥4,25 мкМЕ/л	Эутиреоидное состояние

Данные в таблице показали, что положительный исход восстановления овуляторного менструального цикла у пациенток с хронической ФА, обусловленной

стрессовыми факторами, непосредственно зависит от нормального функционирования щитовидной железы (уровни ТТГ <4,25 мкМЕ/л, Т4 св. ≥9,8 пмоль/л и Т3 св. ≥4,45 пмоль/л), отсутствия гиперпролактинемии (пролактин <650 мкМЕ/мл) и умеренного уровня психоэмоционального напряжения (PSS <29 баллов). Указанные параметры целесообразно считать целевыми значениями для улучшения перспектив нормализации репродуктивной функции пациенток.

Также в исследовании были выделены группы риска относительно вероятности излечения, сформированные на основе показателей, обладающих прогностической значимостью (табл. 10).

В результате исследования была разработана и валидизирована **двухуровневая система стратификации прогноза** для пациенток со стресс-ассоциированной функциональной ановуляцией, основанная на комбинации взаимодополняющих биомаркеров:

- Базовая модель:** включает показатели уровня стресса (шкала PSS), свободного тироксина (Т4 св.) и пролактина, доказала свою эффективность для первичного скрининга и рутинного клинического применения, позволяет оперативно оценить состояние ключевых регулирующих систем организма.
- Углубленная модель:** сосредоточена на уровне стресса (PSS) и интегральном показателе нейро-стероидного баланса — соотношении ДГЭА и кортизола. Данное соотношение является надежным маркером аллостатической нагрузки:
 - высокое соотношение (>30) свидетельствует о сохранных адаптационных резервах и является положительным прогностическим фактором.
 - низкое соотношение (<20) свидетельствует об истощении компенсаторных механизмов и доминирование негативных эффектов кортизола, что ассоциировано со значительным снижением вероятности успешного восстановления репродуктивной функции.

Таблица 10.

Стратификация риска по вероятности излечения женщин с ФА

Группа риска	Вероятность излечения, %	Ключевые критерии			
		PSS, баллы	T4 св., пмоль/л	Пролактин, мкМЕ/мл	ДГЭА-С/К, дополнительный маркер
Низкий риск	85–90	<26	≥10,0	<600	>30
Средний риск	55–70	26–32	9,0–10,0	600–700	20–30
Высокий риск	20–35	>32	<9,0	>700	<20

Для формирования наиболее точного и персонализированного прогноза, особенно у сложных пациенток, рекомендовано совместное использование обеих моделей. Совпадение результатов стратификации по двум независимым моделям значительно повышает надежность

прогноза и четко определяет группу пациенток, нуждающихся в максимально интенсивной и комплексной терапии, направленной одновременно на коррекцию гормонального фона и управление стрессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колода, Ю.А. Найти иголку в стоге сена. Дифференциальная диагностика дисфункции яичников: информ. бюллетень / Ю.А. Колода; под ред. В.Е. Радзинского. — М.: Status Praesens. 2021. — 20 с. URL: <https://praesens.ru/files/2021/web/disfunkciya.pdf>
2. Андреева, Е.Н. Этиологические и патогенетические факторы дисфункции яичников у женщин репродуктивного периода / Е.Н. Андреева, Е.В. Шереметьева, Л.В. Адамян // Проблемы репродукции. — 2020. — № 6. — С. 34–43. DOI: 10.17116/repro20202606134
3. Gordon, C.M. Functional hypothalamic amenorrhea: An Endocrine Society Clinical Practice Guideline / C.M. Gordon, K.E. Ackerman, S.L. Berga et al. // J. Clin. Endocrinol. Metab. — 2017. — Vol. 102, No. 5. — P. 1413–1439. — DOI: 10.1210/jc.2017-00131
4. Горбатенко, Н.В. Влияние ожирения на развитие нарушения репродуктивной функции у женщин / Н.В. Горбатенко, В.Ф. Беженарь, М.Б. Фишман // Ожирение и метаболизм. — 2017. — № 1. — С. 3–8. — DOI: 10.14341/omet201713-8
5. Киракосян, Е.В. Поиск причин формирования нарушений репродуктивной системы: обзор научных исследований / Е.В. Киракосян, Т.А. Назаренко, С.В. Павлович // Акушерство и гинекология. — 2021. — № 11. — С. 18–25. — DOI: 10.18565/aig.2021.11.18-25
6. Грехов, Р.А. Репродуктивное здоровье больных ревматоидным артритом / Р.А. Грехов, Н.И. Емельянов // Современные проблемы науки и образования. — 2024. — № 1. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33183>. — DOI: 10.17513/spno.33183
7. Ахундова, Н.Э. Патогенез, клинические проявления, диагностика гипергонадотропного гипогонадизма у женщин с гиперандрогенией в репродуктивном периоде / Н.Э. Ахундова, Э.М. Алиева, Р.М. Мамедгасанов // Клиническая медицина. — 2017. — Т. 95, № 12. — С. 1101–1105. — DOI: 10.18821/0023-2149-2017-95-12-1101-1105
8. Ferdousi, M. Stress-induced modulation of pain: Role of the endogenous opioid system / M. Ferdousi, D. P. Finn // Prog Brain Res. — 2018. — Vol. 239. — P. 121–177. — DOI: 10.1016/bs.pbr.2018.07.002
9. Brown, E. Psychological, hormonal, and weight problems in functional amenorrhea / E. Brown, J. Bain, P. Lerner, D. Shaul // Can J Psychiatry. — 1983. — Vol. 28, No. 8. — P. 624–628. — DOI: 10.1177/070674378302800806
10. De Kri, K. Sex steroid metabolism and menstrual cycle disorders in exercising women. Review / K. De Kri // Sports Medicine. — 1998. — Vol. 25, No. 6. — P. 369–406. — DOI: 10.2165/00007256
11. Channon, S. A controlled trial of cognitive-behavioral and behavioral therapy for anorexia nervosa / S. Channon, P. de Silva, D. Немсли, R. Perkins // Behav Res Ther. — 1989. — Vol. 27, No. 5. — P. 529–535. — DOI: 10.1016/0005-7967(89)90087-9
12. Дели, А.Д. Психогенные стресс-зависимые факторы и механизмы формирования нарушений менструальной функции / А.Д. Дели, А.Э. Каспарова, О.Г. Литовченко, В.С. Шелудько // Вестник СурГУ. Медицина. — 2023. — № 1. — С. 64–73. — DOI: 10.35266/2304-9448-2023-1-64-73
13. Министерство здравоохранения РФ. Клинические рекомендации «Аменорея и олигоменорея» (утв. Минздравом России, 2024 г.) — URL: <https://rsc.karelia.ru/wp-content/uploads/2025/01/KP-Аменорея-и-олигоменорея.pdf>
14. Iwasa, T. Effects of low energy availability on reproductive functions and their underlying neuroendocrine mechanisms / T. Iwasa, T. Matsuzaki, K. Yano et al. // J. Clin. Med. — 2018. — Vol. 7, no. 7. — Art. No. 166. — DOI: 10.3390/jcm7070166
15. Tong, E.P. Diabetes: Metabolic and Reproductive Impairment in Women / E.P. Tong, E. Codner, J.S.E. Lavigne, H. Tide // Lancet Diabetes Endocrinol. — 2020. — Vol. 8, no. 2. — P. 134–149. — DOI: 10.35266/2304-9448-2023-1-64-73
16. Palomba, S. Lifestyle and fertility: Impact of stress and quality of life on female fertility / S. Palomba, G. Daolio, S. Romeo // Reprod Biol Endocrinol. — 2018. — Vol. 16. — Art. No. 113. — DOI: 10.1186/s12958-018-0434-y
17. Loktionova, A.S. Etiopathogenetic aspects of central (hypogonadotropic) hypogonadism in females / A.S. Loktionova, I.A. Ilovayskaya // Medical Herald of the South of Russia. — 2019. — Vol. 10, No. 4. — P. 15–27. — DOI: 10.21886/2219-8713-2019-10-4-15-27
18. Zhang, C.-m. Reproductive Outcome in Women with Hypogonadotropic Hypogonadism in IVF / C.-m. Zhang, H. Zhang, R. Yang et al. // Frontiers in Endocrinology. — 2022. — Vol. 13. — Art. No. 850126. — DOI: 10.3389/fendo.2022.850126

19. Зекцер, В.Ю. Нарушения липидного спектра и их коррекция у пациенток с гипогонадотропным гипогонадизмом / В.Ю. Зекцер, И.А. Иловайская, Е.Ю. Донима и др. // Ожирение и метаболизм. — 2006. — № 3. — С. 25–27. — DOI: 10.14341/2071-8713-5260
20. Абабков, В.А. Валидизация русскоязычной версии опросника «Шкала воспринимаемого стресса-10» / В.А. Абабков, К. Барышникова, О.В. Воронцова-Венгер и др. // Вестник СПбГУ. Серия 16: Психология. Педагогика. — 2016. — № 2. — С. 6–14. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-russkoyazychnoy-versii-oprosnika-shkala-vospriimaemogo-stressa-10/viewer>.
21. Осадчая, Е.И. Результаты эффективности лечения женщин с функциональным, вторичным гипогонадотропным гипогонадизмом на основе анализа биомаркеров стресса / Е.И. Осадчая, Р.Б. Балтер, Т.В. Иванова // Разработка и применение наукоемких технологий в интересах модернизации современного общества. — Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 147–150.
22. Осадчая, Е.И. Результаты анамнестических данных антрометрии, перенесенной гинекологической и соматической патологии после лечения женщин с ГГ / Е.И. Осадчая, Л.С. Целкович, О.А. Ильченко // Разработка и применение наукоемких технологий в интересах модернизации современного общества. — Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 151–156.

© Осадчая Евгения Игоревна (japen4ela@gmail.com); Целкович Людмила Савельевна (samaraobsgyn2@yandex.ru); Балтер Регина Борисовна (regina.balter@yandex.ru); Иванова Татьяна Владимировна (t.v.ivanova@samsmu.ru); Котельников Виталий Владимирович (uzi_ipo@samsmu.ru); Ильченко Олеся Андреевна (olesay.ilchenko@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГЕРНИОЛОГИИ

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY IN HERNIOLOGY

**O. Sergeev
A. Ksenofontov
O. Zakharov**

Summary. In light of the rapid development of artificial intelligence, researchers are actively seeking ways to apply it to the medical field as well as to surgery. The clinical use of AI already seems very clear, and more and more research is being conducted to answer relevant questions regarding the application of this technology. The speed of integration of artificial intelligence into medicine will depend directly on the cost of the (medical) workforce and the interest in collecting statistical data and then analyzing them objectively. In the near future, AI will become an integral component and tool that will provide significant assistance to surgeons in the training phase, as well as act as an additional opinion in visual diagnostics and assist in robotic surgery, being the so-called third opinion. To write this publication, PubMed and ResearchGate were searched using the keywords «artificial intelligence», «surgery» and «herniology». The purpose of this review is to review the key aspects of the application of artificial intelligence technology in surgery, focusing on the introduction of this technology in herniology.

Keywords: artificial intelligence in surgery, artificial intelligence in herniology, use of artificial intelligence technologies in surgery, surgery, machine learning, neural networks, robotic surgery, robot-assisted hernioplasty, AI in surgery.

Сергеев Олег Станиславович

кандидат медицинских наук, доцент,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет
sergeev2211@yandex.ru

Ксенофонтов Андрей Олегович

ассистент, Белгородский государственный
национальный исследовательский университет
врач-хирург, ОГБУЗ Городская больница №2 г. Белгорода
toxygo@gmail.com

Захаров Олег Владимирович

кандидат медицинских наук, доцент,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет
zakharov_o@bsuedu.ru

Аннотация. В свете стремительного развития искусственного интеллекта, исследователи активно ищут способы его применения в медицинской сфере, а также в хирургии. Клиническое использование ИИ уже представляется весьма ясным, и в настоящее время проводится все больше исследований для получения ответов на актуальные вопросы в отношении применения данной технологии. Скорость интеграции искусственного интеллекта в медицину будет напрямую зависеть от стоимости рабочей (медицинской) силы и заинтересованности в сборе статистических данных с последующим их объективным анализом. В скором времени, ИИ станет неотъемлемым компонентом и инструментом, который будет оказывать значительную помощь хирургам на этапе обучения, а также выступать в качестве дополнительного мнения при визуальной диагностике и ассистировать в роботизированных хирургических операциях, являясь, так называемым, третьим мнением. Для написания данной публикации выполнен поиск в PubMed и ResearchGate с использованием ключевых слов «искусственный интеллект», «хирургия» и «герниология». Целью настоящего обзора является рассмотрение ключевых аспектов применения технологий искусственного интеллекта в хирургии, акцентируя внимание на внедрении этой технологии в герниологию.

Ключевые слова: искусственный интеллект в хирургии, искусственный интеллект в герниологии, использование технологий искусственного интеллекта в хирургии, хирургия, машинное обучение, нейросети, роботизированная хирургия, робот-ассистированная герниопластика, ИИ в хирургии.

Введение

Искусственный интеллект (ИИ) прочно проник в область компьютерных наук и уже выполняет огромное количество задач, которые обычно требуют интеллекта человеческого уровня [1]. ИИ, используя набор определенных алгоритмов, предоставляет автоматизированным системам возможность рассуждать и выполнять когнитивные функции: распознавание объ-

ектов, решение проблем и реализация установленных задач.

Искусственный интеллект является областью науки и техники, которая занимается созданием компьютерных систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта. В медицине он используется для анализа больших объемов данных, управления системой здравоохранения и медицинскими информа-

ционными системами, диагностики заболеваний, предсказания их развития, а также определения наиболее эффективных и персонализированных методов лечения (рис. 1).

Машинное обучение (ML) — это подраздел ИИ, который фокусируется на разработке алгоритмов, позволяющих компьютерам обучаться на основе имеющихся массивов данных. ML применяется для создания моделей, которые могут предсказывать исходы лечения, определять риски развития заболеваний и анализировать медицинские изображения. Глубокое обучение (DL) — это разновидность машинного обучения (так называемое подполе ML), основанная на нейронных сетях с большим количеством слоев. Эта разновидность ИИ позволяет обрабатывать сложные данные, такие как изображения и звуки, а в дальнейшем помогает обучаться на больших объемах этих данных. DL в большей степени используется для распознавания образов на медицинских изобра-

жениях, анализа генетических данных и создания индивидуальных планов лечения.

За последние несколько лет ИИ внес значительный вклад в медицину. Это связано с его способностью анализировать огромные массивы медицинских данных, выявлять закономерности, делать точные прогнозы и помогать медицинским работникам принимать обоснованные решения. Одной из областей, где ИИ оказал огромное влияние, является диагностика заболеваний. С помощью машинного обучения ИИ может выявлять закономерности в рентгеновских снимках и томограммах, которые могут быть пропущены врачом. Это позволяет быстрее и точнее верифицировать диагнозы, что в конечном итоге, улучшит результаты лечения пациентов. Несколько исследований продемонстрировали эффективность алгоритмов ИИ в повышении точности анализа изображений. Например, использование алгоритмов глубокого обучения для анализа компьютерных томо-



Рис. 1. Уровни технической реализации искусственного интеллекта в медицине

грамм имеет точность 92 %, а специфичность 98 % в отношении выявления гепатоцеллюлярной карциномы, распространенного типа рака печени [2]. Другое исследование демонстрирует использование машинного обучения для анализа МРТ-сканов с целью идентификации и дифференциации доброкачественных и злокачественных новообразований печени с высокими показателями чувствительности и специфичности [3]. Искусственный интеллект успешно применяется для диагностики рака кожи, где конволюционная нейронная сеть продемонстрировала 91 % точность в определении злокачественных меланом. Также были разработаны алгоритмы машинного обучения, которые могут определять диабетическую ретинопатию по изображениям глазного дна сетчатки с чувствительностью 90 % и специфичностью 98,5 % [4].

Кроме того, ИИ используется для персонализации планов лечения. Анализируя данные пациента, такие как: анамнез жизни и заболевания, генетический анамнез и факторы образа жизни, искусственный интеллект может помочь врачам выбрать определенные схемы лечения, которые будут иметь высокую эффективность и при этом снизят вероятность развития нежелательных эффектов в результате отрицательного взаимодействия лекарственных средств или неверно назначенной терапии [5, 6]. Таким образом, данная разработка значительно снижает нагрузку на клиницистов, помогая им в рутинной деятельности, а также приводит к уменьшению денежных затрат на лечение и нивелированию полипрагмазии.

Изучая огромные массивы данных, ИИ позволяет находить новые лекарства на основе имеющихся биомедицинских данных. Так, биофармацевтическая компания NuMedii уже создала технологию AIDD (искусственный интеллект для обнаружения лекарств) для быстрого обнаружения связей между лекарствами и заболеваниями на системном уровне. С помощью данной технологии на протяжении 10 лет работы была извлечена информация из тысяч различных хранилищ данных и создана собственная структурированная база данных, которая охватывает сотни заболеваний и тысячи соединений. Запатентованные алгоритмы AIDD позволили ему выйти далеко за рамки традиционных подходов к поиску лекарств [7, 8]. Так, с помощью машинного обучения для поиска лекарств можно ускорить не только процесс их разработки, но и сократить время выхода на рынок, что приведет к созданию более прицельной терапии для пациентов.

Еще одна область, где ИИ оказывает значительное влияние — это ведение электронных медицинских карт [9, 10, 11]. Используя обработку текста на естественном языке (NLP) и применяя машинное обучение, ИИ может извлекать ценные сведения из электронных медицин-

ских карт, включая идентификацию пациентов с высоким риском развития острой патологии, для определения необходимости проведения соответствующего профилактического лечения [12].

В информационном мире произошел большой сдвиг в рабочем процессе, что привело к стремительному росту хирургии. Потенциальные преимущества ИИ в области хирургии многочисленны, включая способность анализировать анамнестические и лабораторно-инструментальные данные пациентов, выявлять специализированные закономерности и делать точные прогнозы. Например, ИИ может помочь выявить у пациента высокие риски развития осложнений в послеоперационном периоде и, соответственно, снизить их количество путем предложения мер по рациональной профилактике. Также, с помощью машинного обучения можно обеспечить поддержку в принятии решений в реальном времени во время операции, анализируя жизненно важные показатели и данные изображения. Благодаря искусственному интеллекту можно оптимизировать планирование оперативного вмешательства, а также предоперационную подготовку, обеспечивая тем самым точный и персонализированный подход. В герниологии искусственный интеллект может быть использован для анализа медицинских изображений, предсказания риска осложнений, определения оптимального хирургического подхода и оценки результатов операции. Однако, несмотря на значительный потенциал ИИ в герниологии, существует ряд вопросов, требующих дополнительного изучения. В частности, необходимо определить степень надежности и точности алгоритмов ИИ, а также их возможное влияние на клиническое решение и безопасность пациентов. Важным аспектом является этическая сторона применения ИИ в герниологии, включая вопросы ответственности и прозрачности алгоритмов.

Целью настоящего обзора является рассмотрение современных подходов к использованию технологий искусственного интеллекта в практической хирургии, в частности, герниологии, а также обсуждение перспектив и правовых аспектов данного направления. Данная публикация познавательна для специалистов в области хирургии и способствует дальнейшему развитию инновационных технологий в хирургической практике.

Технологии искусственного интеллекта в герниологии

В герниологии, как и в других областях медицины, искусственный интеллект используется для улучшения качества и скорости проводимой диагностики грыж, определения рисков, связанных с оперативным вмешательством, планирования хирургического вмешательства и оценки результатов проведенного лечения в послеоперационном периоде. Первые публикации

на заре применения машинного обучения в медицине демонстрируют нам, что интеграция искусственного интеллекта в герниологию началась еще в 2012 году, когда Европейское общество герниологов (EHS-GREPA) сформировало онлайн-платформу с использованием ИИ для регистрации и измерения результатов операций по грыжам передней брюшной стенки [13]. Актуальность применения данных технологий обусловлена рядом факторов, которые включают в себя растущую распространенность абдоминальных грыж, необходимость повышения точности диагностики и эффективности лечения, а также снижение риска осложнений и рецидивов.

Одной из основных технологий ИИ, которая применяется для решения задач в герниологии, является обработка цифровых медицинских изображений, таких как СКТ и МРТ. Искусственный интеллект способен анализировать медицинские изображения для определения принадлежности грыжи к конкретному пункту классификации, и может предоставить исчерпывающую информацию в отношении локализации и конфигурации грыжевых дефектов, что служит основой для стратификации пациента и отнесения его к определенной категории грыженосителей в соответствии с современной классификацией грыж передней брюшной стенки [14]. Например, используя технологии ML и CNN (сверточная нейронная сеть), был разработан полностью автоматизированный алгоритм анализа изображений органов брюшной полости, полученных методом оптической когерентной томографии, с моментальной скоростью анализа и точностью 91 % [15]. Такая технология, помимо основного назначения, позволяет оценить наличие или отсутствие сопутствующей внутрибрюшной патологии, которая может иметь определяющее значение для выбора объема операции, показаний к симультанному вмешательству или противопоказаний к реконструкции брюшной стенки. Крайне важно учитывать тот факт, что в случае, когда у пациента ширина грыжевых ворот превышает 10 см, стандартная пластика методом «sublay» с полным фасциальным закрытием дефекта может оказаться технически невыполнимой, а иногда и опасной из-за критического повышения внутрибрюшного давления (ВБД) [16]. Так, с помощью представленной модели глубокого обучения (DL), ИИ смог предложить объем и предсказать сложность хирургической реконструкции передней брюшной стенки при гигантских послеоперационных грыжах на основании результатов обработки огромного количества параметров, которые в рутинной рентгенологической практике используются крайне редко: длина и ширина дефекта, угол диастаза (между аортой и медиальными краями прямых мышц), индекс сепарации (CSI — component separation index), индекс RDR (rectus to defect ratio), а также волюметрические параметры объема грыжевого мешка и брюшной полости [17].

Кроме того, использование машинного обучения (ML) для анализа состояния мышечно-апоневротического комплекса и его составных элементов, предоставила хирургам возможность эффективно рассчитать предоперационный риск, риск рецидива грыжи, а также оценить влияние ранее перенесенных вмешательств на структуру брюшной стенки [18]. Таким образом, использование технологий ИИ в плане анализа СКТ-изображений органов брюшной полости, предоставляет инновационные, точные и высокоскоростные способы диагностики в рамках предоперационного планирования и послеоперационного ведения пациентов с грыженосительством, путем визуализации дефектов брюшной стенки, определения их размеров, конфигурации, площади и взаимоотношений с органами брюшной полости, а также других второстепенных показателей: поиск безопасного входа в брюшную полость, сопутствующая внутрибрюшная патология и последствия ранее произведенных вмешательств и иных критериев риска.

Подраздел технологии искусственного интеллекта, так называемая сверточная нейронная сеть (CNN), активно используется для увеличения степени безопасности оперативного приема в режиме реального времени. Так, данную технологию используют для интраоперационной идентификации семявыносящего протока при проведении трансабдоминальной преперитонеальной пластики [19]. Такая перспектива позволяет значительно снизить риск интраоперационных осложнений, которые связаны с ятрогенным повреждением важных анатомических структур (бедренные и надчревные сосуды, семявыносящий проток, подвздошно-паховый, подвздошно-подчревный и бедренно-половой нервы) в зоне операционного поля. Кроме того, технологии искусственного интеллекта могут применяться в прогнозировании различных исходов послеоперационного течения и осложнений при выполнении герниопластики. На основании комбинированного изучения данных медицинской карты больного, радиологических исследований и техники проведения операции, алгоритмы ИИ способны прогнозировать и определять риски возникновения инфекции мягких тканей в области послеоперационных ран, а также миграцию сетки и возможной несостоятельности степлерной фиксации [20]. С помощью моделей глубокого обучения можно оценить и определить отрицательные результаты лапароскопической герниопластики, которые связаны с длительной хронической болью, возникшей в результате повреждения нервных структур или хронической инфекцией мягких тканей [21]. В конечном итоге, интеграция искусственного интеллекта в области хирургии, реализуемая с помощью способности улучшать визуализацию операционного поля и дифференцировать анатомические ориентиры и структуры, помогает выполнять тот или иной операционный прием в рамках проведения лапароскопической герниопластики.

Все это приводит к минимизации риска повреждений важных структур в области операционного поля, тем самым сокращая койко-день пребывания в стационаре и, главное, улучшая качество жизни пациента благодаря снижению послеоперационных осложнений.

Одним из весьма интересных способов применения технологий искусственного интеллекта в рамках герниологии, является его использование в виртуальных симуляторах, которые позволяют хирургам проводить полноценную герниопластику по различным сценариям и уровням сложностей без риска для пациентов. Данные симуляторы могут использовать технологию машинного обучения и компьютерного зрения с целью проведения анализа и оценки действий хирурга, предоставляя обратную связь и рекомендации по улучшению навыков. В недавнем исследовании, дизайн которого включал программирование на Python, CNN и Raspberry Pi, было показано, что искусственный интеллект применим для разработки системы обучения хирургов лапароскопической герниопластики. Результаты этого исследования продемонстрировали, что система значительно ускоряет кривую обучения хирурга в рамках определенного типа лапароскопической герниопластики, а также обладает большим потенциалом для повышения уверенности в отношении принятия технического решения, помогая улучшить свои практические и теоретические навыки в рамках герниологической практики [22]. Аналогичное исследование, проведенное двумя годами позднее, также продемонстрировало большую эффективность использования алгоритмов машинного обучения для обучения стажеров-хирургов лапароскопической техники герниопластики [23]. Так, с помощью данного алгоритма проводилась оценка уровня техники выполнения оперативного приема обучающихся и выявлялись общие ошибки, на основе которых предоставлялись рекомендации по улучшению навыков и технической реализации лапароскопической герниопластики, начиная от правильно выбранной точки и направления диссекции париетальной брюшины, заканчивая наиболее верными точками степлерной фиксации сетки. Похожее исследование проводили с использованием модели профессионального обучения хирургов герниопластике, и после введения ее в практику выявили значительный успех в повышении технических возможностей хирургов в рамках выполнения любой лапароскопической герниопластики после завершения кривой обучения [24]. Наконец, недавно исследователи подтвердили актуальность и важность применения технологий глубокого обучения в отношении идентификации и интерпретации этапов оперативного приема при TAPP для повышения эффективности работы хирурга, оценки и улучшения его навыков, положительно влияя на кривую его обучения [25]. Несмотря на положительную сторону и актуальность подобных ИИ-регулируемых симуляторов, авторы заявляют, что данный подход все-таки требует

дополнительных исследований и более массивного объема данных для машинного обучения, чтобы получить максимальную пользу с помощью этой технологии. Несомненно, необходимо большое количество дополнительных исследований в этом направлении, чтобы обеспечить разработку систем искусственного интеллекта, которые помогут хирургам на каждом этапе герниологической практики, начиная от предоперационной подготовки, заканчивая анализом и оценкой состояния пациента в послеоперационном периоде, а также мониторинга и рецензирования технических навыков хирурга.

Этические и правовые аспекты использования искусственного интеллекта в хирургии

Вместе с возможностями, которые предоставляет искусственный интеллект в хирургической деятельности, возникают и вопросы этического и правового характера. Одним из таких вопросов является определение ответственности за принятие решений. Важно установить, насколько хирург может полагаться на рекомендации ИИ, а также в какой степени он должен принимать самостоятельные решения. Все это можно достичь, скорректировав уже имеющуюся нормативную правовую базу с учетом новых технологических достижений, используя исключительно прозрачные алгоритмы искусственного интеллекта.

Прозрачность алгоритмов ИИ действительно является важным этическим аспектом, поскольку позволяет понять, как система принимает решения и какие факторы влияют на ее работу. В хирургической практике это имеет особое значение, так как от прозрачности алгоритма зависит доверие врачей и пациентов к системе искусственного интеллекта. Для обеспечения прозрачности необходимо разрабатывать алгоритмы, которые могут не только объяснить свои решения, но и предоставлять доступ к информации о работе системы ИИ как для медицинских специалистов, так и для пациентов. Кроме того, безопасность применения технологий искусственного интеллекта в хирургии, несомненно, является одним из основных этических аспектов. Системы ИИ должны быть надежными и обеспечивать высокую точность в своей работе, чтобы минимизировать риск ошибок и осложнений для пациента. Для обеспечения безопасности необходимо проводить тщательное тестирование алгоритмов ИИ, а также разрабатывать механизмы контроля и мониторинга их работы в реальных условиях хирургической практики.

Как уже было сказано, использование технологий искусственного интеллекта в медицине предполагает обработку большого количества персональных данных пациентов. В России действует закон «О персональных данных» (№ 152-ФЗ), который регулирует обработку и защиту персональных данных. Важно обеспечить со-

блюдение требований закона и гарантировать конфиденциальность данных пациентов при использовании данной технологии в хирургии. В 2020 году был принят Федеральный закон «О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания необходимых условий для разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в субъекте Российской Федерации — городе федерального значения Москве и внесении изменений в статьи 6 и 10 Федерального закона «О персональных данных» от 24.04.2020 (№123-ФЗ), который предоставляет достаточно благоприятные условия для разработки и внедрения ИИ-технологий в медицинскую практику, в том числе и в хирургии. Кроме того, данный закон способствует обеспечению соблюдения соответствующих прав пациентов на конфиденциальность и защиту персональных данных, помогая установить более четкие правила обработки и хранения медицинских данных, включая те, которые были получены с использованием ИИ-технологий.

Несмотря на то, что в Российской Федерации на данный момент нет специального законодательства, регулирующего использование ИИ в медицине, в 2019 Указом Президента Российской Федерации «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» утверждена Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, которая предусматривает разработку нормативно-правовой базы в области ИИ. Важно отслеживать изменения в законодательстве и адаптировать практику использования технологий искусственного интеллекта в хирургии к новым требованиям.

Для использования ИИ в хирургии необходимо получение соответствующих лицензий и сертификатов. В Российской Федерации, теоретически, это может регулироваться Постановлением Правительства РФ от 30 июня 2021 года «О федеральном государственном контроле (надзоре) за обращением медицинских изделий» (№ 1066) и другими нормативными актами. Важно убедиться в том, что используемые системы ИИ будут соответствовать требованиям законодательства и пройдут все необходимые процедуры лицензирования и сертификации.

В России, как и во многих других странах, ответственность за принятие решений в хирургии лежит непосредственно на лечащем докторе, и использование ИИ не должно освобождать его от этой ответственности. Таким образом, полноценное внедрение технологий искусственного интеллекта требует разработки новых правовых и этических норм и законов, определяющих степень ответственности хирурга и системы искусственного интеллекта, а также учета возможных ошибок, связанных с недостатками алгоритмов или неправильным использованием технологии для полноценного взаимодействия между медицинскими специалистами, разработчиками технологий и обществом.

Заключение

В заключении, использование технологий искусственного интеллекта для проведения герниопластики и других хирургических операций представляет собой перспективное направление в современной хирургии. Такие ИИ-технологии как компьютерное зрение, машинное обучение и роботизированные системы, способствуют повышению точности, безопасности и эффективности хирургических вмешательств. Внедрение ИИ в хирургическую практику позволяет сократить время операции, уменьшить риск осложнений и ускорить процесс реабилитации пациентов.

Однако, несмотря на значительные преимущества, использование технологий искусственного интеллекта в хирургии также сталкивается с рядом проблем. Они включают в себя этические аспекты, стандартизацию и интеграцию технологий, а также обучение и подготовку медицинского персонала для работы с новыми системами. Для успешного внедрения такой технологии в хирургическую практику необходимо проводить дополнительные исследования, разрабатывать стандарты и руководства, а также обеспечивать непрерывное обучение и техническую поддержку специалистов. В целом, использование искусственного интеллекта в герниологии и в других разделах медицины является мощным инструментом, который может значительно улучшить качество оказываемой медицинской помощи и положительно повлиять на течение послеоперационного периода пациентов, а также снизить риски осложнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shalev-Shwartz S. 2014. Understanding Machine Learning. New York, Cambridge University Press, 449
2. Hamm C., Wang J., Savic L., Ferrante M., Schobert I., Schlachter T., Lin M., Duncan J., Weinreb J., Chapiro J., Letzen B. 2019. Deep learning for liver tumor diagnosis part I: development of a convolutional neural network classifier for multi-phasic MRI. Eur. Radiol. 29 (7): 3338–3347. doi: 10.1007/s00330-019-06205-9
3. Esteve A., Kuprel B., Novoa R., Ko J., Swetter S., Blau H., Thrun S. 2017. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. Nature. 542 (7639): 115–118. doi: 10.1038/nature21056.
4. Ting D.S., Cheung C.Y., Lim G., Tan G.S., Nguyen D., Gan A., Hamzah H., Garcia-Franco R., Yeo I., Lee S. 2017. Development and Validation of a Deep Learning System for Diabetic Retinopathy and Related Eye Diseases Using Retinal Images From Multiethnic Populations With Diabetes. JAMA. 318 (22): 2211–2223. doi: 10.1001/jama.2017.18152.

5. Han K., Cao P., Wang Y., Xie F., Ma J., Yu M., Wang J., Xu Y., Zhang Y., Wan J. 2021. A Review of Approaches for Predicting Drug–Drug Interactions Based on Machine Learning. *Front. Pharmacol.* 12 (3): 814858. doi: 10.3389/fphar.2021.814858.
6. Zhu S., Bing J., Min X., Lin C., Zeng X. 2018. Prediction of Drug–Gene Interaction by Using Metapath2vec. *Front Genet.* 9 (2): 248. doi: 10.3389/fgene.2018.00248. eCollection 2018.
7. Zhavoronkov A., Ivanenkov Y., Aliper A., Veselov M., Aladinskiy V., Aladinskaya A., Terentiev V., Polykovskiy D., Kuznetsov M., Asadulaev A., Volkov Y., Zholus A., Shayakhmetov R., Zhebrak A., Minaeva L., Zagribelnyy B., Lee L., Soll R., Madge D., Xing L., Guo T., Aspuru-Guzik A. 2019. Deep learning enables rapid identification of potent DDR1 kinase inhibitors. *Nat. Biotechnol.* 37 (9): 1038–1040. doi: 10.1038/s41587-019-0224-x.
8. Jahchan N., Dudley J., Mazur P., Flores N., Yang D., Palmerton A., Zmoos A., Vaka D., Tran K., Zhou M., Krasinska K., Riess J., Neal J., Khatri P., Park K., Butte A., Sage J. 2013. A drug repositioning approach identifies tricyclic antidepressants as inhibitors of small cell lung cancer and other neuroendocrine tumors. *Cancer Discov.* 3 (12): 1364–77. doi: 10.1158/2159-8290.CD-13-0183.
9. Miller D., Brown E. 2018. Artificial Intelligence in Medical Practice: The Question to the Answer? *Am. J. Med.* 131 (2): 129–133. doi: 10.1016/j.amjmed.2017.10.035.
10. Mohsen F., Ali H., Hajj N., Shah Z. 2022. Artificial intelligence-based methods for fusion of electronic health records and imaging data. *Sci. Rep.* 12 (1): 17981. doi: 10.1038/s41598-022-22514-4
11. Seol H., Shrestha P., Muth J., Wi C., Sohn S., Ryu E., Park M., Ihrke K., Moon S., King K., Wheeler P., Rosedahl J., Liu H., McWilliams D., Juhn Y. 2021. Artificial intelligence-assisted clinical decision support for childhood asthma management: A randomized clinical trial. *PLoS One.* 16 (8): e0255261. doi: 10.1371/journal.pone.0255261.
12. Loftus T., Tighe P., Filiberto A., Efron P., Brakenridge S., Mohr A., Rashidi P., Upchurch J., Bihorac A. 2020. Artificial Intelligence and Surgical Decision-making. *JAMA Surg.* 155 (2): 148–158. doi: 10.1001/jamasurg.2019.4917.
13. Muysoms F., Campanelli G., Champault G., DeBeaux A., Dietz U., Jeekel J., Klinge U., Köckerling F., Mandala V., Montgomery A., Conde M., Puppe F., Simmermacher R., Śmietański M., Miserez M. 2012. *EuraHS*: the development of an international online platform for registration and outcome measurement of ventral abdominal wall hernia repair. *Hern. Sur.* 16 (3): 239–50. doi: 10.1007/s10029-012-0912-7.
14. López-Cano M., Rodrigues-Gonçalves V., Verdaguer-Tremolosa M., Petrola-Chacón C., Rosselló-Jiménez C., Saludes-Serra J., Armengol-Carrasco M., Garcia-Alamino J. 2021. Prioritization criteria of patients on scheduled waiting lists for abdominal wall hernia surgery: a cross-sectional study. *Hern. Sur.* 25 (6): 1659–1666. doi: 10.1007/s10029-021-02378-9.
15. Wang Y., Wei S., Opfermann J., Kam M., Saeidi H., Hsieh M., Krieger A., Kang J. 2022. Automated OCT A-line abdominal tissue classification using a hybrid MLP-CNN classifier during ventral hernia repair. In: *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications. Proceedings of the International Scientific Conference. XXII (San Francisco, CA, USA, 20–24 Feb., 2022)*. San Francisco, Whiting School of Engineering: 33–38.
16. Naguib N., Rafique H., Rao P., Longworth T., Soukias J., Masoud A. 2015. A review of the incidence of iatrogenic hernia in both laparoscopic and open colorectal surgery: Using CT as the gold standard of detection, cohort study. *Int. J. Surg.* 19 (1): 87–90. doi: 10.1016/j.ijso.2015.05.026.
17. Elhage S., Deerenberg E., Ayuso S., Murphy K., Shao J., Kercher K., Smart N., Fischer J., Augenstein V., Colavita P., Heniford T. 2021. Development and Validation of Image-Based Deep Learning Models to Predict Surgical Complexity and Complications in Abdominal Wall Reconstruction. *JAMA Surg.* 156 (10): 933–940. doi: 10.1001/jamasurg.2021.3012.
18. Kallinowski F., Ludwig Y., Löffler T., Vollmer M., Lösel P., Görlich J., Heuveline V., Nessel R. 2020. Biomechanics applied to incisional hernia repair — Considering the critical and the gained resistance towards impacts related to pressure. *Clin. Biomech.* 82 (2): 105253. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105253.
19. Cui P., Zhao S., Chencorresponding W. 2021. Identification of the Vas Deferens in Laparoscopic Inguinal Hernia Repair Surgery Using the Convolutional Neural Network. *J. Healthc. Eng.* 13 (3): 557–567. doi: 10.1155/2021/5578089.
20. Madani A., Feldman L. 2021. Artificial Intelligence for Augmenting Perioperative Surgical Decision-Making—Are We There Yet? *JAMA Surg.* 156 (10): 941. doi: 10.1001/jamasurg.2021.3050.
21. O'Brien W., Ramos R., Gupta L., Itani L. 2021. Neural Network Model to Detect Long-Term Skin and Soft Tissue Infection after Hernia Repair. *Surg. Infect.* 22 (7): 668–674. doi: 10.1089/sur.2020.354.
22. Alonso-Silverio G., Pérez-Escamirosa F., Bruno-Sanchez R., Ortiz-Simon J., Muñoz-Guerrero R., Minor-Martinez A., Alarcón-Paredes A. 2018. Development of a Laparoscopic Box Trainer Based on Open Source Hardware and Artificial Intelligence for Objective Assessment of Surgical Psychomotor Skills. *Surg. Innov.* 25 (4): 380–388. doi: 10.1177/1553350618777045.
23. Baloul M., Yeh V., Mukhtar F., Ramachandran D., Traynor M., Shaikh N., Rivera M., Farley D. 2022. Video Commentary & Machine Learning: Tell Me What You See, I Tell You Who You Are. *J. Surg. Educ.* 79 (6): e263–e272. doi: 10.1016/j.jsurg.2020.09.022.
24. Zipper C., Friedrich U., Backhaus J., König S., Mavroveli S., Wiegering A., Olbrecht S., Puppe F., Günster S., Dietz U. 2020. Incisional hernia repair in a high-fidelity silicone model for open retro-muscular mesh implantation with preparation of the fatty triangle: validation and educational impact study. *Hern. Sur.* 24 (6): 1307–1315. doi: 10.1007/s10029-019-02094-5.
25. Takeuchi M., Collins T., Ndagijimana A., Kawakubo H., Kitagawa Y., Marescaux J., Mutter D., Perretta S., Hostettler A., Dallemagne B. 2022. Automatic surgical phase recognition in laparoscopic inguinal hernia repair with artificial intelligence. *Hern. Sur.* 26 (6): 1669–1678. doi: 10.1007/s10029-022-02621-x.

© Сергеев Олег Станиславович (sergeev2211@yandex.ru); Ксенофонтов Андрей Олегович (toxygo@gmail.com);

Захаров Олег Владимирович (zakharov_o@bsuedu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИПЕРПРОЛАКТИНЕМИЯ КАК ПРИЧИНА БЕСПЛОДНОГО БРАКА: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

HYPERPROLACTINEMIA AS A CAUSE OF INFERTILE MARRIAGE: MODERN CONCEPTS

I. Tarasova
S. Kalinchenko
L. Vorslov
V. Kononova
N. Grigoriev

Summary. Hyperprolactinemia is one of the most common endocrine causes of infertile marriage, affecting ovulation, implantation, and spermatogenesis. The review presents current data on the pathogenesis and clinical manifestations of hyperprolactinemia, methods of its diagnosis, including assessment of biologically active forms of prolactin and neuroimaging. The influence of hyperprolactinemia on the probability of pregnancy, the frequency of reproductive losses and perinatal outcomes is considered. An analysis of the literature confirms that timely diagnosis and individualized therapy can significantly increase the likelihood of pregnancy and successful completion in women, as well as improve spermatogenesis in men. The need for an interdisciplinary approach to patient management and the prospects for further research in the field of personalized medicine, including the study of the role of nutritional factors, are emphasized.

Keywords: hyperprolactinemia, infertile marriage, prolactin, prolactinoma, reproductive function, anovulation, spermatogenesis, dopamine agonists, macroprolactinemia, Omega-3 index.

Тарасова Ирина Дмитриевна

Врач акушер-гинеколог, эндокринолог,
ООО «Клиника профессора Калининко», Москва
tarasova.science@yandex.ru

Калинченко Светлана Юрьевна

доктор медицинских наук, профессор,
ФНМО МИ РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва
kalinchenko@list.ru

Ворслов Леонид Олегович

кандидат медицинских наук, доцент,
ФНМО МИ РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва
levors@mail.ru

Кононова Валерия Игоревна

Врач-ординатор,
ФНМО МИ РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва
valeriyamuah@gmail.com

Григорьев Николай Николаевич

Врач эндокринолог, уролог, андролог, ООО «Дельта»
clinica-delta@mail.ru

Аннотация. Гиперпролактинемия является одной из наиболее распространённых эндокринных причин бесплодного брака, оказывая влияние на овуляцию, имплантацию и сперматогенез. В обзоре представлены современные данные о патогенезе и клинических проявлениях гиперпролактинемии, методах ее диагностики, включая оценку биологически активных форм пролактина и нейровизуализацию. Рассматривается влияние гиперпролактинемии на вероятность наступления беременности, а также частоту репродуктивных потерь и перинатальные исходы. Анализ литературы подтверждает, что своевременная диагностика и индивидуализированная терапия позволяют существенно повысить вероятность наступления и успешного завершения беременности, а также улучшить показатели сперматогенеза. Подчёркивается необходимость междисциплинарного подхода к ведению пациентов и перспективность дальнейших исследований в области персонализированной медицины, включая изучение роли нутритивных факторов.

Ключевые слова: гиперпролактинемия, бесплодный брак, пролактин, пролактиннома, репродуктивная функция, ановуляция, сперматогенез, дофаминовые агонисты, макропролактинемия, Омега-3 индекс.

Введение

Бесплодие представляет собой одну из наиболее актуальных медико-социальных проблем современного здравоохранения, затрагивая от 10 до 15 % супружеских пар репродуктивного возраста. В последние десятилетия отмечается устойчивая тенденция к росту распространённости нарушений репродуктивной функции, что связывают с изменением образа жизни, увели-

чением частоты эндокринных и метаболических заболеваний, стрессовых факторов, а также неблагоприятным воздействием внешней среды [1, 2].

Среди эндокринных причин бесплодия особое место занимает гиперпролактинемия (ГПРЛ) — синдром, характеризующийся стойким повышением концентрации пролактина в сыворотке крови выше физиологических значений. По данным некоторых исследований,

гиперпролактинемия выявляется у 18–40 % женщин с эндокринными формами бесплодия, а также у 5–10 % женщин репродуктивного возраста без выраженной клинической симптоматики [3, 4].

Физиологическая роль пролактина чрезвычайно многогранна. Он участвует в регуляции репродуктивной системы, метаболизма, иммунного ответа, оказывает модулирующее действие на психоэмоциональное состояние. Однако его патологическое повышение нарушает нормальную функцию гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси, что у женщин приводит к ановуляции и бесплодию, а у мужчин — к гипогонадизму и нарушению сперматогенеза [5–10].

Значимость проблемы подчёркивается и тем, что гиперпролактинемия нередко сопровождается другими эндокринными патологиями — гипотиреозом, синдромом поликистозных яичников, метаболическим синдромом, что усугубляет нарушения фертильности и снижает эффективность репродуктивных технологий [11, 12].

Таким образом, гиперпролактинемия является одним из ключевых звеньев патогенеза бесплодного брака, требующего междисциплинарного подхода к диагностике и лечению.

Физиология и механизмы регуляции пролактина

Пролактин (ПРЛ) является полипептидным гормоном, синтезируемым лактотропными и лактосоматотропными клетками передней доли гипофиза. Его молекула по структуре схожа с гормоном роста и плацентарным лактогеном. Несмотря на традиционное восприятие пролактина как «гормона лактации», современное представление о нем значительно шире: известно более 300 биологических эффектов ПРЛ, включающих регуляцию репродуктивной функции, иммунного ответа, ангиогенеза, нейропротекции и метаболизма [13, 14].

Секреция пролактина находится преимущественно под ингибирующим контролем дофаминергической системы гипоталамуса (см. рисунок 1). Дофамин, выделяясь из нейронов аркуатного ядра, связывается с D2-рецепторами на поверхности лактотропных клеток, подавляя транскрипцию гена пролактина и его секрецию. В то же время тиреотропин-рилизинг-гормон (ТРГ) и эстрогены способны стимулировать продукцию пролактина, что объясняет его повышение при гипотиреозе и в период беременности [15, 16, 17].

Выработка пролактина подвержена выраженным циркадным колебаниям. Максимальные уровни регистрируются ночью и в ранние утренние часы, минимальные — днём. Секреция гормона возрастает при стрессе, физических нагрузках, во время полового акта, а также в период беременности и лактации [18, 19].

В сыворотке крови выявляют несколько изоформ гормона:

- мономерный пролактин (биологически активный, составляет 80–85 % от общей фракции),
- большой-пролактин (Big-PRL) и гигантский-пролактин (Big-Big-PRL, или макропролактин), обладающие значительно меньшей биологической активностью.

Феномен макропролактинемии сопровождается повышенными лабораторными показателями ПРЛ при отсутствии типичных клинических проявлений гиперпролактинемии. Правильная идентификация этого состояния позволяет избежать гипердиагностики и некорректной терапии [20, 21].

Пролактин участвует в регуляции гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси. Повышение его концентрации подавляет секрецию гонадотропин-рилизинг-гормона (ГнРГ) гипоталамусом, что приводит к снижению уровня лютеинизирующего (ЛГ) и фолликулостимулирующего гормонов (ФСГ). В результате нарушается овуляция, уменьшается секреция прогестерона, развивается недостаточность лютеиновой фазы и ановуляторное бесплодие. У мужчин аналогичный механизм обуславливает гипогонадизм, снижение тестостерона и нарушение сперматогенеза [22–26].

Этиология и патогенез гиперпролактинемии

Гиперпролактинемия (ГППЛ) является синдромом, объединяющим широкий спектр состояний, при которых происходит стойкое или транзиторное повышение уровня пролактина в сыворотке крови выше референсных значений. Этиологические факторы можно условно разделить на физиологические, патологические и ятрогенные [27, 28, 29].

К числу естественных состояний, сопровождающихся гиперпролактинемией, относятся беременность, лактация, физическая нагрузка, стрессовые воздействия, ночной сон и половой акт [30, 31].

Наиболее значимой патологической причиной гиперпролактинемии является пролактинома — гормонально-активная аденома гипофиза, встречающаяся у 40–60 % пациентов с данным синдромом. Различают микропролактиномы (размером менее 10 мм) и макропролактиномы (10 мм и более). Пролактиномы традиционно рассматриваются как гормонально-активные аденомы гипофиза, для которых характерна автономная гиперсекреция пролактина. Опухолевый рост приводит к автономной гиперсекреции пролактина, а при больших размерах — к компрессии окружающих структур, что сопровождается неврологическими нарушениями [32, 33].

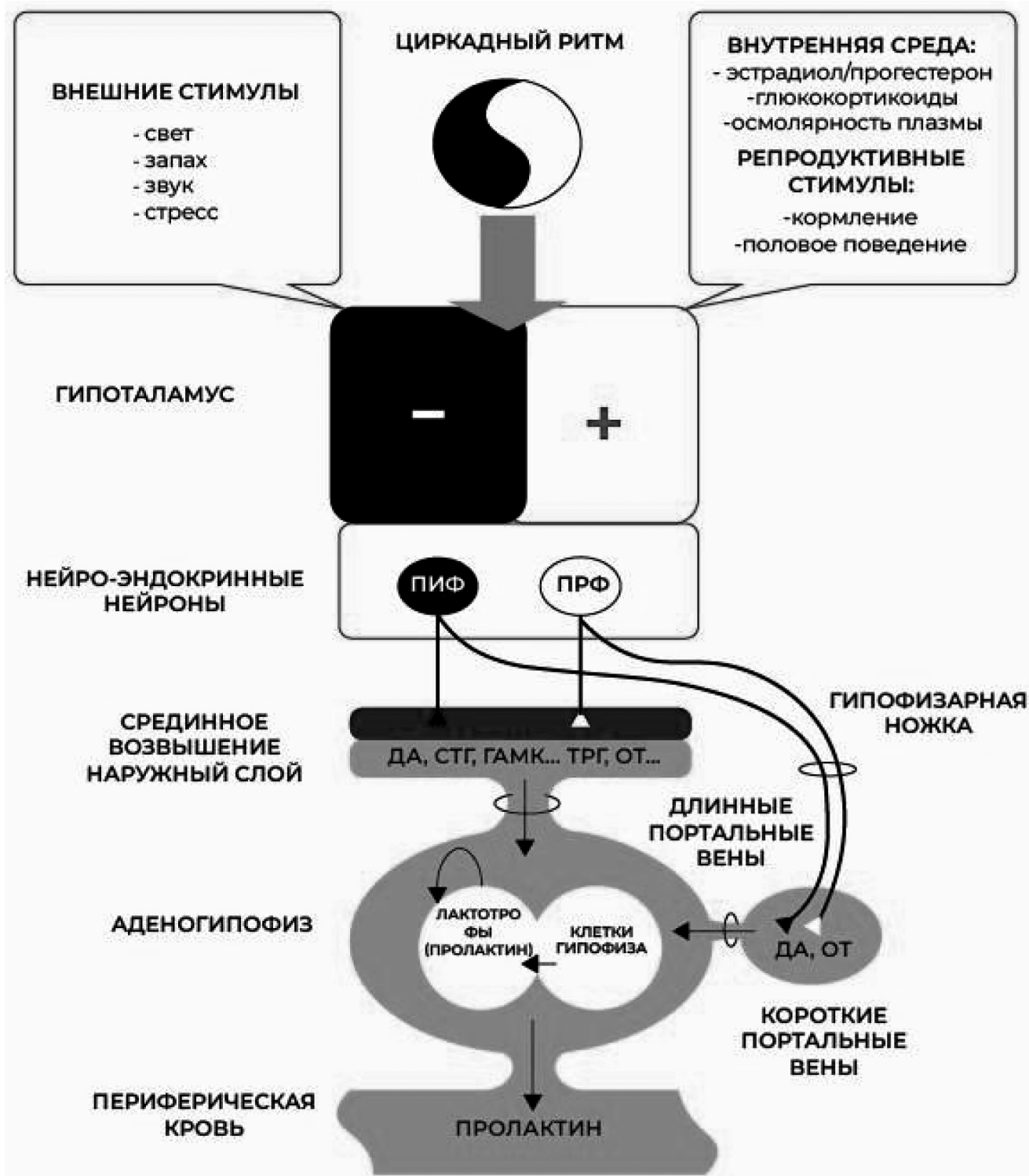


Рис. 1. Регуляция секреции пролактина

Примечание: ПИФ — пролактин-ингибирующие-факторы; ПРФ — пролактин-релизинг-факторы; ДА — дофамин; СТГ — соматотропный гормон; ГАМК — гамма-аминомасляная кислота; ТРГ — тиреотропин-релизинг-гормон; ОТ — окситоцин.

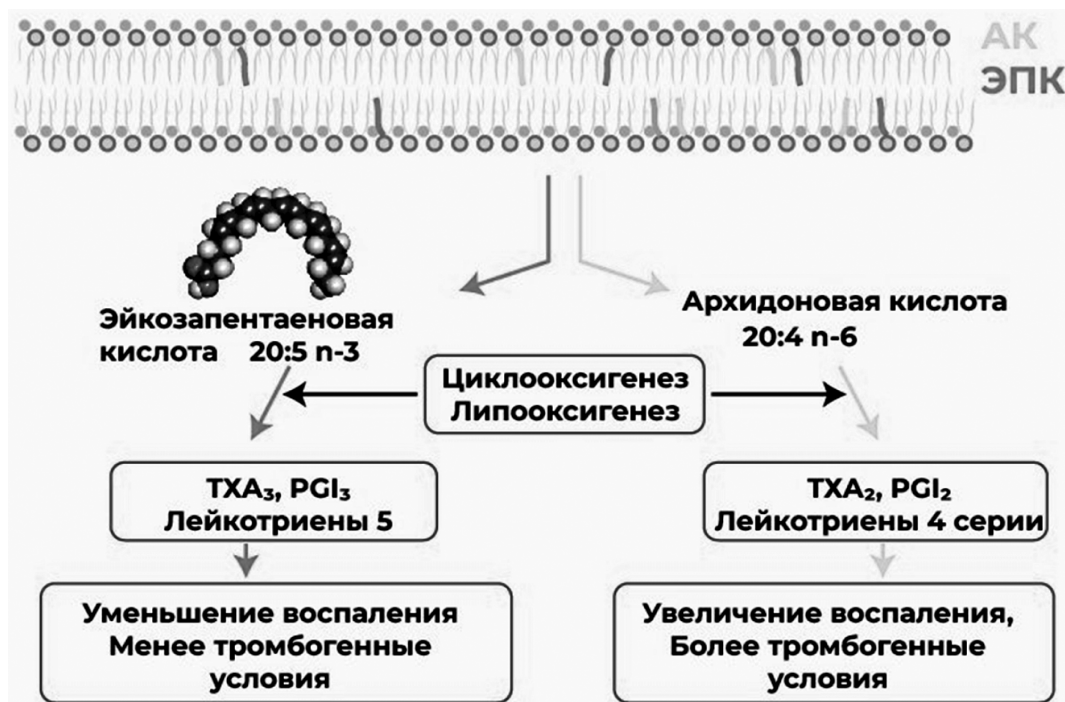


Рис. 3. Производные жирных кислот и их действие

Клинические проявления и влияние на репродуктивную функцию

Клиническая картина гиперпролактинемии чрезвычайно вариабельна и определяется как степенью повышения уровня гормона, так и длительностью его воздействия на органы-мишени. При этом у части пациентов заболевание может протекать бессимптомно и выявляться лишь при обследовании по поводу бесплодия или нарушений менструального цикла.

У женщин гиперпролактинемия чаще всего проявляется нарушениями менструального цикла — от олиго— и опсоменореи до полной аменореи.

Характерным симптомом является ановуляторное бесплодие, которое обусловлено подавлением секреции гонадотропинов и снижением овариальной функции [38, 39].

Дополнительные проявления включают:

- галакторию (спонтанное выделение молозива или молока из молочных желёз), наблюдаемую примерно у 30-70 % пациенток;
- симптомы — сухость влагалища, диспареунию, снижение либидо;
- снижение минеральной плотности костной ткани, связанное с хронической гипоэстрогенией.

У мужчин заболевание встречается реже, но имеет не менее серьёзные последствия. Основными симптомами являются:

- снижение либидо и эректильная дисфункция;
- бесплодие, связанное с олигоспермией и нарушением подвижности сперматозоидов;
- гинекомастия и, в отдельных случаях, галакторея;
- признаки гипогонадизма — снижение мышечной массы, остеопороз, депрессивные расстройства.

При макропролактиномах, превышающих в размере 1 см, возможно развитие головных болей и нарушений зрения, связанных с компрессией хиазмы зрительных нервов. Эти проявления нередко становятся ведущими и требуют не только эндокринологической, но и нейрохирургической оценки [40, 41].

Таким образом, гиперпролактинемия оказывает системное влияние на репродуктивное здоровье обоих полов, снижая вероятность естественного зачатия и осложняя течение беременности.

Гиперпролактинемия и репродуктивные исходы

Гиперпролактинемия оказывает значительное влияние не только на наступление беременности, но и на её дальнейшее течение, а также на исходы для матери и плода.

Повышенный уровень пролактина нарушает овуляторные циклы, препятствует формированию полноценного жёлтого тела и снижает продукцию прогестерона. Эти механизмы объясняют трудности наступления беременности при нелеченной гиперпролактинемии. По данным современных исследований, нормализация

пролактина на фоне терапии агонистами дофамина позволяет восстановить овуляцию у большинства женщин и увеличить частоту наступления беременности до 60–70 % [42].

Даже при наступлении зачатия у женщин с гиперпролактинемией повышен риск самопроизвольных выкидышей на ранних сроках. Это связывают с недостаточностью лютеиновой фазы, нарушениями имплантации и дисбалансом иммунной регуляции. Назначение агонистов дофамина до и в начале беременности снижает риск потерь и повышает вероятность доношивания.

Современные клинические рекомендации допускают продолжение терапии каберголином на ранних сроках у женщин с макропролактиномами, угрожающими зрению. В остальных случаях препараты агонистов дофамина отменяются после наступления беременности, поскольку физиологическая гиперпролактинемия необходима для подготовки молочных желёз к лактации [43].

Беременные с пролактиномами требуют особого наблюдения, так как у них существует риск роста опухоли, особенно при макроаденомах. В таких случаях проводится регулярный контроль зрения и при необходимости возобновляется медикаментозная терапия.

Большинство исследований не выявили увеличения риска врожденных пороков развития или неблагоприятных перинатальных исходов у детей, зачатых на фоне терапии агонистами дофамина. Каберголин и бромкриптин продемонстрировали высокий профиль безопасности в проспективных наблюдениях.

У мужчин нормализация уровня пролактина сопровождается улучшением показателей сперматогенеза, повышением концентрации и подвижности сперматозоидов, что значительно увеличивает вероятность зачатия. Важно отметить, что эффект проявляется постепенно и может потребовать нескольких месяцев терапии [44].

Таким образом, гиперпролактинемия оказывает многоуровневое влияние на репродуктивные исходы, начиная от снижения вероятности зачатия и повышенного риска ранних потерь до необходимости индивидуализованного ведения беременности. Современная терапия позволяет минимизировать эти риски и повысить вероятность успешного исхода как для матери, так и для ребёнка.

Заключение

Гиперпролактинемия представляет собой одну из ведущих эндокринных причин бесплодного брака, оказывая многоуровневое воздействие на репродуктивную систему как женщин, так и мужчин. Повышение уровня пролактина нарушает процессы овуляции, сперматогенеза и имплантации, создавая серьезные препятствия для наступления и успешного завершения беременности.

Современные достижения в диагностике позволяют не только своевременно выявлять патологию, но и дифференцировать клинически значимую гиперпролактинемия от макропролактинемии, что снижает риск гипердиагностики и неоправданного лечения. Важным дополнением к традиционному алгоритму становится оценка нутритивного статуса, в частности, определение Омега-3 индекса методом ВЭЖХ МС/МС. Низкий уровень Омега-3 ПНЖК может быть самостоятельным фактором риска развития гиперпролактинемии за счет негативного влияния на дофаминергическую регуляцию, что открывает новые возможности для превентивной и адъювантной нутритивной коррекции.

Несмотря на достигнутые успехи, остаются нерешенными вопросы, касающиеся оптимальной тактики ведения пациентов с гиперпролактинемией и репродуктивными планами, длительного наблюдения за женщинами с пролактиномами в период беременности и лактации, а также применения новых репродуктивных технологий в этой когорте пациентов. Требуют дальнейшего изучения протоколы применения препаратов Омега-3 ПНЖК у пациентов с гиперпролактинемией и бесплодием.

Перспективы исследований связаны с изучением молекулярных механизмов регуляции секреции пролактина, поиском биомаркеров прогноза эффективности терапии и разработкой персонализированных подходов к лечению. Внедрение оценки Омега-3 индекса в клиническую практику представляется одним из таких перспективных направлений. Очевидно, что междисциплинарное взаимодействие эндокринологов, репродуктологов, гинекологов, нутрициологов и нейрохирургов является ключевым условием для успешного восстановления репродуктивного здоровья и улучшения репродуктивных исходов у данной группы пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Е.Н. Гиперпролактинемия у женщин репродуктивного возраста: что должен помнить врач / Е.Н. Андреева, Е.В. Шереметьева, О.Р. Григорян // Акушерство и гинекология. — 2021. — № 9. — С. 204–210. <https://dx.doi.org/10.18565/aig.2021.9.204-210>
2. Вагапова Г.Р. Репродуктивные нарушения у женщин с гиперпролактинемией: патогенез, клинические проявления, диагностика / Г.Р. Вагапова // Акушерство и гинекология. — 2018. — № 2. — С. 19–26. <https://dx.doi.org/10.18565/aig.2018.2.19-26>
3. Petersenn S. Diagnosis and management of prolactin-secreting pituitary adenomas: a Pituitary Society international Consensus Statement / S. Petersenn, M. Fliseriu, F.F. Casanueva et al. // Nat Rev Endocrinol. — 2023. — Vol. 19. — № 12. — P. 722–740. <https://doi.org/10.1038/s41574-023-00886-5>
4. Almalki M.H. Impulse control disorders in patients with dopamine agonist-treated pituitary adenomas: a cross-sectional multicenter study / M.H. Almalki, M.A. Alsuraikh, E. Almalki et al. // Pituitary. — 2024. — Vol. 27. — № 2. — P. 197–203. <https://doi.org/10.1007/s11102-024-01383-2>
5. Калинин С.Ю. Анализ распространенности дефицита Омега-3 полиненасыщенных жирных кислот среди жителей разного пола в московском регионе / С.Ю. Калинин, Л.О. Ворслов, Л.А. Аветисян и др. // Вопросы диетологии. — 2018. — Т. 8. — № 2. — С. 10–15. <https://doi.org/10.20953/2224-5448-2018-2-10-15>
6. Жуков А.Ю. Омега-3 индекс: современный взгляд и место в клинической практике / А.Ю. Жуков, Л.О. Ворслов, Л.О. Давидян // Вопросы диетологии. — 2017. — Т. 7. — № 2. — С. 69–74. <https://doi.org/10.20953/2224-5448-2017-2-69-74>
7. Калинин С.Ю. Мифы и правда о гиперпролактинемии. Избранные лекции / С.Ю. Калинин, Л.Ю. Ворслов. — 2-е изд. — М.: Практическая медицина, 2025. — 116 с.
8. Dzialach L. Prolactin-secreting pituitary adenomas: male-specific differences in pathogenesis, clinical presentation and treatment / L. Dzialach, J. Sobolewska, Z. Zak et al. // Front. Endocrinol. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1338345. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1338345>
9. Lu Z. Pharmacological treatment strategies for antipsychotic-induced hyperprolactinemia: a systematic review and network meta-analysis / Z. Lu, Y. Sun, Y. Zhang et al. // Transl Psychiatry. — 2022. — Vol. 12. — № 1. — Art. 267. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-02027-4>
10. Practice Committee of the American Society for Reproductive Medicine. Fertility evaluation of infertile women: a committee opinion // Fertil Steril. — 2021. — Vol. 116. — № 5. — P. 1255–1265. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2021.08.038>
11. Tworoger S.S. Prolactin and breast cancer risk / S.S. Tworoger, S.E. Hankinson // Cancer Lett. — 2006. — Vol. 243. — № 2. — P. 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2006.01.032>
12. Li Q. Effects of aripiprazole on prolactin levels and differences in effectiveness in patients with schizophrenia: a post-hoc analysis of the real-world data of a multicenter study / Q. Li, Y.A. Su, X. Liao et al. // Front Psychiatry. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1383173. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2024.1383173>
13. Дзеранова Л.К. Гиперпролактинемия и беременность: основные достижения и нерешенные вопросы / Л.К. Дзеранова, Н.С. Быканова, Е.А. Пигарова // Вестник репродуктивного здоровья. — 2011. — № 1. — С. 16–21. <https://doi.org/10.14341/brh2011116-21>
14. Yang H. The Association Between Prolactin and Metabolic Parameters in PCOS Women: A Retrospective Analysis / H. Yang, J. Di, J. Pan et al. // Front. Endocrinol. — 2020. — Vol. 11. — Art. 263. <https://doi.org/10.3389/fendo.2020.00263>
15. Hu Y. Establishment of reference intervals of monomeric prolactin to identify macroprolactinemia in Chinese patients with increased total prolactin / Y. Hu, J. Ni, B. Zhang et al. // BMC Endocr Disord. — 2021. — Vol. 21. — № 1. — Art. 197. <https://doi.org/10.1186/s12902-021-00861-z>
16. Iancu M.E. Prolactin Relationship with Fertility and In Vitro Fertilization Outcomes—A Review of the Literature / M.E. Iancu, A.I. Albu, D.N. Albu // Pharmaceuticals (Basel). — 2023. — Vol. 16. — № 1. — Art. 122. <https://doi.org/10.3390/ph16010122>
17. Кононова В.И. Дефицит Омега-3 ПНЖК как причина гиперпролактинемии: презентация лекции // Факультет непрерывного медицинского образования Медицинского института Российского университета дружбы народов. — Москва: ФПК МИ РУДН, 2025. — 31 слайд.
18. Иловайская И.А. Умеренная гиперпролактинемия в клинической практике: диагностические «ловушки» и терапевтическая тактика / И.А. Иловайская, Е.В. Кручинина // Альманах клинической медицины. — 2024. — Т. 52. — № 1. — С. 45–54. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2024-52-009>
19. Ларина А.А. Гиперпролактинемия и беременность (обзор литературы) / А.А. Ларина, О.Р. Григорян, Е.Н. Андреева и др. // Проблемы репродукции. — 2013. — № 3. — С. 13–17.
20. Гаспарян С.А. Когнитивные и психоэмоциональные нарушения у женщин периода менопаузального перехода: возможности медикаментозной коррекции / С.А. Гаспарян, А.М. Чотчаева, С.М. Карпов // Проблемы Эндокринологии. — 2023. — Т. 69. — № 1. — С. 86–95. <https://doi.org/10.14341/probl13205>
21. Зароченцева Н.В. Гиперпролактинемия и репродуктивное здоровье женщин / Н.В. Зароченцева, Я.З. Зайдиева, М.А. Чечнева и др. // Российский вестник акушера-гинеколога. — 2024. — Т. 24. — № 1. — С. 41–46. <https://doi.org/10.17116/rosakush20242401141>
22. Себко Т.В. Гиперпролактинемия / Т.В. Себко, Л.А. Хейдар, С.С. Конеева // Российский медицинский журнал. — 2016. — Т. 22. — № 5. — С. 250–259. <https://doi.org/10.18821/0869-2106-2016-22-5-250-259>
23. Жилина А.Н. Фармакорезистентная пролактинома. Сложности диагностики и лечения, поиск пути решений. Клинический случай / А.Н. Жилина, Ю.Е. Мельникова, Ю.А. Чижова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 1 (127). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.50>
24. Рудакова Е.Б. Женское бесплодие: традиционные методы лечения и экстракорпоральное оплодотворение у пациенток с эндокринными нарушениями / Е.Б. Рудакова, Т.В. Стрижова, Е.А. Федорова и др. // Лечащий врач. — 2020. — № 3. <https://doi.org/10.26295/OS.2020.38.18.006>
25. Дедов И.И. Клинические рекомендации «Гиперпролактинемия» (проект) / И.И. Дедов, Г.А. Мельниченко, Л.К. Дзеранова и др. // Ожирение и метаболизм. — 2023. — Т. 20. — № 2. — С. 170–188. <https://doi.org/10.14341/omet13002>
26. Дзеранова Л.К. Эволюция планирования беременности при гиперпролактинемии / Л.К. Дзеранова, С.Ю. Воротникова, Е.А. Пигарова // Ожирение и метаболизм. — 2024. — Т. 21. — № 2. — С. 188–194. <https://doi.org/10.14341/omet13144>
27. Адамян Л.В. Синдром гиперпролактинемии: от теории к практике / Л.В. Адамян, М.И. Ярмолинская, Е.В. Сулова // Проблемы репродукции. — 2020. — Т. 26. — № 2. — С. 27–33. <https://doi.org/10.17116/repro20202602127>

28. Тигина О.Д. Гиперпролактинемия как предиктор репродуктивных неудач / О.Д. Тигина, О.В. Пачулия, О.Н. Беспалова // Женское здоровье и репродукция. — 2025. — № 2 (67). <https://doi.org/10.31550/2712-8598-2025-2-3-ZhZiR>
29. Аметов А.С. Клинические случаи: гиперпролактинемия у мужчин и женщин в разные периоды жизни / А.С. Аметов, Е.Ю. Пашкова // Эндокринология. Новости. Мнения. Обучение. — 2021. — Т. 10. — № 1. — С. 34–40. <https://doi.org/10.33029/23049529-2021-10-1-34-40>
30. Григорян О.Р. Гиперпролактинемия в практике гинеколога: этиология, патогенез, клиника, диагностика, лечение / О.Р. Григорян, А.А. Ларина, Е.Н. Андреева и др. // Проблемы репродукции. — 2013. — № 4. — С. 14–20.
31. Иловайская И.А. Гиперпролактинемия без опухоли гипофиза: дифференциальная диагностика и тактика ведения пациентов / И.А. Иловайская // РМЖ. — 2015. — № 8. — С. 450.
32. Дзеранова Л.К. Метаболические эффекты пролактина / Л.К. Дзеранова, Н.Г. Мокрышева, И.И. Бармина и др. // Вестник репродуктивного здоровья. — 2008. — № 3-4. — С. 29–33. <https://doi.org/10.14341/brh20083-429-33>
33. Дегтярева А.В. Гипераммониемия в практике неонатолога / А.В. Дегтярева, Е.В. Соколова, Е.Ю. Захарова и др. // Российский вестник перинатологии и педиатрии. — 2020. — Т. 65. — № 6. — С. 98–107. <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2020-65-6-98-107>
34. Денисова Т.Г. Определение уровня стресса у пациенток с гиперпролактинемией / Т.Г. Денисова, Ф.В. Орлов, Е.А. Денисова и др. // Acta medica Eurasica. — 2022. — № 1. — С. 19–24. <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2022-1-19-24>
35. Petersenn S. Diagnosis and management of prolactin-secreting pituitary adenomas: a Pituitary Society international Consensus Statement / S. Petersenn, M. Fleseriu, F.F. Casanueva et al. // Nat Rev Endocrinol. — 2023. — Vol. 19. — P. 722–740. <https://doi.org/10.1038/s41574-023-00886-5>
36. Hemli J.M. Galactorrhea Following Minimally Invasive Reoperative Mitral Valve Replacement: An Unexpected Complication / J.M. Hemli, S.K. Uppal, K. Seetharam et al. // Innovations (Phila). — 2020. — Vol. 15. — № 2. — P. 177–179. <https://doi.org/10.1177/1556984520909800>
37. Iancu M.E. Prolactin Relationship with Fertility and In Vitro Fertilization Outcomes—A Review of the Literature / M.E. Iancu, A.I. Albu, D.N. Albu // Pharmaceuticals (Basel). — 2023. — Vol. 16. — № 1. — Art. 122. <https://doi.org/10.3390/ph16010122>
38. Gul Y. High Prolactin and Anemia as Factors in Female Infertility: A Cross-Sectional Study in Infertile Women of Balochistan, Pakistan / Y. Gul, N. Sadiq, S. Iqbal et al. // Cureus. — 2025. — Vol. 17. — № 5. — Art. e84368. <https://doi.org/10.7759/cureus.84368>
39. Wang Y. Elevated prolactin levels before endometrial transformation negatively impact reproductive outcomes in frozen embryo transfer cycles under hormone replacement therapy / Y. Wang, J. Li, X. Chen // BMC Pregnancy and Childbirth. — 2025. — Vol. 25. — Art. 245. <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07307-7>
40. Montgomery J. Prevalence of hyperprolactinemia in schizophrenia: association with typical and atypical antipsychotic treatment / J. Montgomery, E. Winterbottom, M. Jessani et al. // J Clin Psychiatry. — 2004. — Vol. 65. — № 11. — P. 1491–1498. <https://doi.org/10.4088/jcp.v65n1108>
41. Koniaries K. Macroprolactinemia: a mini-review and update on clinical practice / K. Koniaries, C. Benadiva, L. Engmann et al. // F S Rep. — 2023. — Vol. 4. — № 3. — P. 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.xfre.2023.05.005>
42. Kutlesic R. Prolactin and Hyperprolactinaemia in Endometriosis-Related Infertility: Are There Clinically Significant Connections? / R. Kutlesic, M. Kutlesic, J. Milosevic-Stevanovic et al. // Journal of Clinical Medicine. — 2024. — Vol. 13. — № 19. — Art. 5868. <https://doi.org/10.3390/jcm13195868>
43. Aslam S. Association of hyperprolactinemia in females with infertility / S. Aslam, M.K. Naz, R. Bibi et al. // Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology. — 2025. — Vol. 32. — № 1. — P. 954–960. <https://doi.org/10.53555/wdhyun31>
44. Szukiewicz D. Current Insights in Prolactin Signaling and Ovulatory Function / D. Szukiewicz // Int J Mol Sci. — 2024. — Vol. 25. — № 4. — Art. 1976. <https://doi.org/10.3390/ijms25041976>

© Тарасова Ирина Дмитриевна (tarasova.science@yandex.ru); Калинченко Светлана Юрьевна (kalinchenko@list.ru);
Ворслов Леонид Олегович (levors@mail.ru); Кононова Валерия Игоревна (valeriyamuah@gmail.com);
Григорьев Николай Николаевич (clinica-delta@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ ДИВЕРТИКУЛА ПИЩЕВОДА

CLINICAL CASE OF ESOPHAGEAL DIVERTICULA

A. Khmara
M. Polidanov
E. Osintsev
O. Konopatskova
E. Gorbunova
A. Akopyan

Summary. Esophageal diverticula, especially Zenker's diverticula, require timely diagnosis and choice of optimal treatment tactics due to the risk of aspiration complications and decreased quality of life in elderly patients. **Goal.** To demonstrate the features of diagnosis and surgical treatment of a major Zenker diverticulum in a patient with severe concomitant cardiological pathology. **Materials and methods.** Clinical observation of a 76-year-old patient with a 5×4 cm diverticulum. The diagnosis included radiography with barium suspension and endoscopy. An open diverticulectomy with a transcervical access with a cricopharyngeal muscle myotomy was performed. **Results.** The operation was performed successfully, the symptoms (regurgitation, dysphagia) were completely stopped. Postoperative period without complications, discharge on the 9th day. A true diverticulum with chronic esophagitis has been histologically confirmed. **Conclusion.** With large diverticulae (>4 cm), open diverticulectomy remains the method of choice even in elderly patients, provided careful preoperative preparation and an interdisciplinary approach.

Keywords: Zenker's diverticulum, diverticulectomy, dysphagia, barium swallow study, elderly age, comorbid cardiac pathology, chronic esophagitis.

Хмара Артём Дмитриевич
к.м.н., врач-хирург, ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского» Минздрава России
premdania@yandex.ru

Полиданов Максим Андреевич
специалист, ассистент,
ЧУОО ВО «Университет «Реавиз»
maksim.polidanoff@yandex.ru

Осинцев Евгений Юрьевич
д.м.н., профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского» Минздрава России
dr_osintsev@mail.ru

Конопацкова Ольга Михайловна
д.м.н., профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского» Минздрава России
sergejkapralov@yandex.ru

Горбунова Елена Сергеевна
к.м.н., ассистент, ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный медицинский университет
им. В.И. Разумовского» Минздрава России
sergejkapralov@yandex.ru

Акопян Ани Вардановна
ординатор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского»
Минздрава России
anivard2001@mail.ru

Аннотация. Дивертикулы пищевода, особенно дивертикул Ценкера, требуют своевременной диагностики и выбора оптимальной тактики лечения из-за риска аспирационных осложнений и снижения качества жизни у пациентов пожилого возраста. **Цель.** Продемонстрировать особенности диагностики и хирургического лечения крупного дивертикула Ценкера у пациента с тяжёлой сопутствующей кардиологической патологией. **Материалы и методы.** Клиническое наблюдение пациента 76 лет с дивертикулом размером 5×4 см. Диагностика включала рентгенографию с бариевой взвесью и эндоскопию. Выполнена открытая дивертикулэктомия трансцервикальным доступом с миотомией крикофарингеальной мышцы. **Результаты.** Операция проведена успешно, симптоматика (регургитация, дисфагия) полностью купирована. Послеоперационный период без осложнений, выписка на 9-е сутки. Гистологически подтверждён истинный дивертикул с хроническим эзофагитом. **Заключение.** При крупных дивертикулах (>4 см) открытая дивертикулэктомия остаётся методом выбора даже у пациентов пожилого возраста при условии тщательной предоперационной подготовки и междисциплинарного подхода.

Ключевые слова: дивертикул Ценкера, дивертикулэктомия, дисфагия, рентгенография с бариевой взвесью, пожилой возраст, сопутствующая кардиопатология, хронический эзофагит.

Введение

Дивертикул пищевода представляет собой локальное выпячивание его стенки, формирующееся из-за ослабления мышечного слоя на фоне хронически повышенного внутрипросветного давления [1]. Такие деформации могут возникать на любом участке, однако наиболее типичной локализацией являются верхний и средний отделы. Первое упоминание о подобных «противоестественных карманах» принадлежит английскому анатому А. Ладлоу (1794 г.) [2]. Фундаментальная классификация, сохранившая свою значимость, была разработана Э.Л. Кингом в 1912 году, а первые успешные хирургические операции выполнены уже в XX веке [3].

Данная патология относится к числу наиболее распространенных доброкачественных заболеваний пищевода [4]. Нередко дивертикулы выявляются случайно во время обследования по поводу других нарушений пищеварительного тракта, таких как ахалазия кардии, грыжа пищеводного отверстия диафрагмы (ГПОД), хронический холецистит, желчнокаменная болезнь, язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки [5–8]. Ориентировочная заболеваемость составляет 2–3 случая на 100000 человек в год [7,9–11]. Болезнь имеет выраженную возрастную зависимость: пик диагностики приходится на период 60–80 лет [12–14]. Большинство исследований подтверждает преобладание патологии среди мужчин, с соотношением мужского и женского пола примерно 1.5–2:1 [15–17]. Приобретенные дивертикулы составляют около 40 % от всех случаев [10,18,19]. В 90 % ситуаций это одиночные образования, множественные дивертикулы встречаются значительно реже [11,20].

Цель исследования

Демонстрация успешного опыта лечения дивертикула пищевода, а также рассмотрение современных аспектов диагностики и лечения дивертикулов пищевода.

Перед публикацией материалов клинического наблюдения от пациента было получено письменное информированное добровольное согласие на использование персональных данных и медицинской информации в научных целях с соблюдением требований Федерального закона № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» и № 152-ФЗ «О персональных данных».

Клиническое наблюдение

Пациент Х., 76 лет, поступил в хирургическое отделение Университетской клинической больницы 25 июня 2024 года. Основные жалобы включали периодическую регургитацию непереваренных остатков пищи спустя

1–2 часа после еды с выраженным гнилостным запахом, усиливающимся при наклонах головы и туловища, а также постоянное ощущение «комка» в области шеи. По данным анамнеза, подобные симптомы беспокоили пациента в течение двух лет. В связи с постепенным нарастанием дискомфорта при глотании твердой пищи больной самостоятельно ограничил рацион протёртыми блюдами, однако к специалисту не обращался до момента появления социального дискомфорта из-за неприятного запаха изо рта.

Прогрессирование дисфагии при глотании твердых продуктов и появление социального дискомфорта из-за неприятного запаха изо рта стали поводом для обращения к терапевту по месту жительства.

Из сопутствующих заболеваний: ишемическая болезнь сердца, постинфарктный кардиосклероз (инфаркт миокарда передней стенки левого желудочка в 2010 г.), артериальная гипертензия 3-й стадии, 1-й степени, риск 4, хроническая сердечная недостаточность I функционального класса по классификации NYHA. Также выявлены ультразвуковые признаки желчнокаменной болезни (данные УЗИ органов брюшной полости от 07.06.2024).

При поступлении состояние пациента расценено как удовлетворительное: сознание ясное, положение в постели активное. Кожные покровы обычной окраски, периферическая гемодинамика стабильна (АД 146/84 мм рт. ст., ЧСС 68 уд/мин). При пальпации шейной области — безболезненная, мягкая ткань, лимфоузлы не пальпируются.

Ключевым диагностическим этапом стало проведение рентгенографии пищевода с бариевой взвесью 27 февраля 2024 г., которая выявила мешковидное выпячивание размером 5×4 см на задней стенке пищевода на уровне седьмого шейного позвонка (С7) с узким соустьем (около 3 мм). Отмечалась задержка контрастного вещества в полости дивертикула более 5 минут после завершения глотательного акта, а также признаки локального воспаления слизистой на уровне С5–С7 (утолщение складок, неровность контуров). Эндоскопическое исследование (ЭГДС) подтвердило наличие устья дивертикула диаметром 4 мм в области глоточно-пищеводного перехода и застой пищевых масс в его полости. Биопсия слизистой пищевода исключила дисплазию или опухолевый процесс.

На основании клинической картины и данных визуализации установлен диагноз: K22.5 Дивертикул пищевода (дивертикул Ценкера) с признаками хронического локального эзофагита.

С учётом выраженной симптоматики, крупных размеров дивертикула (>4 см) и риска развития аспира-

ционных осложнений (пневмония, абсцесс лёгкого) принято решение о плановом хирургическом лечении. Учитывая возраст пациента и тяжёлый кардиологический анамнез, перед операцией проведена консультация кардиолога с коррекцией терапии (оптимизация режима приёма β -блокаторов, ингибиторов АПФ). Проба с 6-минутной ходьбой показала переносимость физической нагрузки >300 м, что позволило допустить пациента к плановому вмешательству под общей анестезией. 26 июня 2024 г. выполнена открытая дивертикулэктомия трансцервикальным доступом с миотомией крикофарингеальной мышцы и дренированием околопищеводного пространства. Длительность операции — 85 минут. Интраоперационно подтверждён истинный дивертикул с сохранением всех слоёв стенки, прилежащий к задней поверхности глоточно-пищеводного перехода. Осложнений во время вмешательства не возникло.

На первые сутки после операции пациент получал парентеральное питание и профилактическую антибактериальную терапию (цефуросим 1,5 г 3 раза в сутки). Отмечались умеренные боли в шейной ране, купированные ненаркотическими анальгетиками. На вторые сутки начато пероральное питание по щадящей схеме (жидкие протёртые блюда). К 29 июня рана была сухой, без признаков воспаления, болезненность при пальпации минимальна. 04 июля 2024 г. послеоперационная рана зажила первичным натяжением, швы удалены. Пациент выписан в удовлетворительном состоянии с рекомендациями соблюдать механически щадящую диету в течение 4 недель и продолжить кардиологическое наблюдение.

Гистологическое исследование резецированного препарата подтвердило морфологическую картину стенки истинного дивертикула пищевода с признаками хронического эзофагита вне фазы обострения, без признаков дисплазии или неопластического процесса.

Обсуждение

Основой патогенеза дивертикула пищевода как правило является комбинация двух факторов: слабости мышечной оболочки и стойкого повышения давления внутри пищевода. В зависимости от преобладающего механизма выделяют пульсионные, тракционные и смешанные дивертикулы [13,21]. Пульсионные — наиболее частый тип — формируются при возрастании внутрипищеводного давления вследствие нарушений моторики (например, ахалазии или эзофагоспазма), что приводит к «пролабированию» слизистой через слабый участок мышечного каркаса [22]. Тракционные дивертикулы являются результатом внешней тяги, когда стенка пищевода фиксируется рубцами после перенесённых воспалительных процессов в средостении (медиастинит, туберкулез) [15, 16, 23]. С клинито-топографической точки зрения дивертикулы традиционно делят на глоточно-

пищеводные (дивертикул Ценкера), бифуркационные (среднепищеводные) и эпифренальные (наддиафрагмальные) [17, 18]. Размеры образований варьируют в широких пределах — от минимальных, клинически незначимых выпячиваний, до гигантских мешков диаметром в несколько сантиметров [19, 24].

«Золотым стандартом» диагностики остается рентгенологическое исследование с бариевой взвесью (контрастная эзофагография) [20, 21]. Этот метод позволяет достоверно оценить локализацию, размеры, форму дивертикула, а также наличие в нем застойных явлений [22]. Эзофагогастродуоденоскопия (ЭГДС) играет важную роль в исключении сопутствующих заболеваний (эзофагита, новообразований), однако выполняется с повышенной осторожностью ввиду риска перфорации дивертикулярного мешка [23–25].

В практике дивертикулы часто являются инциденталомой, обнаруживаемой при инструментальном исследовании. При увеличении до критических размеров дивертикулы могут провоцировать ярко выраженную клиническую картину, имитирующую злокачественные новообразования пищевода, что создаёт трудности при дифференциальной диагностике [24]. Изучение данной патологии представляет несомненную клиническую значимость, обусловленную необходимостью раннего выявления, профилактики потенциальных осложнений (аспирация, перфорация, кровотечение) и обоснованного выбора тактики ведения пациента — от наблюдения до хирургической коррекции. В последние десятилетия широкое внедрение малоинвазивных хирургических методик (видеоторакоскопических, лапароскопических) существенно изменило подходы к лечению, особенно бифуркационных и эпифренальных дивертикулов [25]. Несмотря на это, открытые хирургические вмешательства сохраняют свою значимость при дивертикуле Ценкера, больших размерах образований или сложной анатомической локализации.

Клинито-морфологическая характеристика дивертикулов пищевода базируется на преобладающем механизме их формирования, который напрямую определяет локализацию, симптоматику и, как следствие, лечебную стратегию.

Несмотря на доброкачественную природу дивертикулов пищевода, их наличие часто диктует необходимость хирургического вмешательства. Это обусловлено высоким риском развития угрожающих жизни осложнений, включая дивертикулит, перфорацию с последующим развитием флегмоны шеи или медиастинита, прогрессирующую дисфагию, а также, хотя и редко, малигнизацию. Выбор оптимального хирургического метода является комплексной задачей и зависит от локализации дивертикула, сопутствующей патологии, а также технических

возможностей и опыта конкретного медицинского центра. В современной практике применяются как традиционные открытые, так и малоинвазивные видеоассистированные (торако-/лапароскопические) подходы [25].

Открытые операции, такие как дивертикулэктомия через торакотомия или лапаротомия, по-прежнему сохраняют роль «золотого стандарта» в сложных клинических ситуациях. К ним относят гигантские дивертикулы, рецидивные случаи после эндоскопического лечения или подозрение на злокачественное перерождение, требующее расширенного доступа [19]. Неоспоримым преимуществом открытого доступа является отличная визуализация операционного поля, обеспечивающая точный контроль гемостаза и надежное ушивание тканей. Однако эти операции сопряжены с высокой травматичностью, что закономерно приводит к выраженному послеоперационному болевому синдрому и более длительному периоду реабилитации пациента [22, 25].

В качестве современной и эффективной альтернативы открытым вмешательствам выступают малоинвазивные видеоторакоскопические и лапароскопические методики. Выполняемые через 3–4 мини-доступа, они минимизируют повреждение тканей. Использование современного инструментария (30° оптики, ультразвуковых диссекторов) повышает безопасность и точность манипуляций.

Согласно данным современных клинических исследований, внедрение малоинвазивных хирургических технологий обеспечивает ряд значимых преимуществ перед традиционными открытыми вмешательствами: интенсивность послеоперационного болевого синдрома снижается в среднем на 50–60 %, продолжительность пребывания пациента в стационаре сокращается до 3–5 суток, а частота развития легочных осложнений (ателектазы, пневмонии) уменьшается до 5–8 % против 15–25 % при открытых доступах [23, 24]. Внедрение этих технологий, как отмечают Пучков К.В. и соавт., особенно важно при лечении эпифренальных дивертикулов, где обязательным элементом операции является продольная миотомия для устранения причины дискинезии [25]. К недостаткам можно отнести техническую сложность, требующую от хирурга специальных навыков и наличия соответствующего оборудования.

Вне зависимости от выбранного доступа, хирургическое лечение сопряжено с риском осложнений. К интраоперационным относят перфорацию пищевода (1–4 %) и кровотечение (2–7 %). Среди послеоперационных наиболее значимы несостоятельность швов (3–7 %), развитие медиастинита (1–2 %) и формирование стриктур пищевода (5–12 %) [4, 18].

Таким образом, выбор тактики лечения должен быть строго индивидуализирован. Хотя эндоскопические и видеоассистированные методы становятся предпочтительными для большинства случаев дивертикула Ценкера и многих эпифренальных дивертикулов, открытые операции сохраняют свою актуальность в сложных и рецидивных ситуациях. Окончательное решение основывается на тщательной оценке всех клинических, анатомических и технических факторов.

Представленный случай демонстрирует классическую клиническую манифестацию дивертикула Ценкера — наиболее частой формы приобретённых дивертикулов пищевода, возникающей вследствие дискоординации глотательного рефлекса и гипертонуса верхнего пищеводного сфинктера. Регургитация непереваренной пищи с гнилостным запахом является патогномоничным симптомом, обусловленным застоем содержимого в полости дивертикула и его бактериальной колонизацией.

Выбор открытой дивертикулэктомии обоснован размером образования (>4 см), при котором эндоскопические методы (например, дивертикулотомия по методике Dohlman или DIVES) ассоциированы с повышенным риском рецидива [5]. Несмотря на возраст и сопутствующую кардиопатологию, тщательная предоперационная подготовка позволила минимизировать периоперационные риски. Отсутствие послеоперационных осложнений и быстрое восстановление функции глотания подтверждают целесообразность хирургической тактики у пациентов с выраженной симптоматикой даже в пожилом возрасте.

Заключение

Выбор метода хирургического лечения дивертикула пищевода сегодня строго индивидуализирован. Для ценкеровских дивертикулов эндоскопические техники (ESD и FESD) являются методами первого выбора, демонстрируя оптимальное соотношение эффективности, безопасности и скорости реабилитации. Эпифренальные и крупные дивертикулы средней трети требуют комплексного подхода, где видеоассистированные методики (VATS, лапароскопия) с миотомией и коррекцией моторных нарушений вытеснили открытые операции. Открытые вмешательства сохраняют свою актуальность в сложных, рецидивных случаях и при онконастороженности. Дальнейшее развитие связано с совершенствованием эндоскопического инструментария, внедрением методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноусов А.Ф., Богопольский П.М., Курбанов Ф.С. Хирургия пищевода: Руководство для врачей. М.: Медицина. 2000; 352 с.
2. Ludlow A. A case of obstructed deglutition from a preternatural dilatation of, and bag formed in, the pharynx. *Medical Observations and Inquiries*. 1769; № 3. С. 85–101.
3. Cassivi S.D., Deschamps C., Nichols F.C. et al. Diverticula of the esophagus. *Surg Clin North Am*. 2005; Vol. 85. № 3. С. 495–503
4. Herbella F.A., Patti M.G. Modern pathophysiology and treatment of esophageal diverticula. *Langenbecks Arch Surg*. 2012; Vol. 397. № 1. P. 29–35.
5. Шестаков А.Л., Безалтынных А.А., Нарезкин Д.В. и др. Современное состояние торакоскопической хирургии доброкачественных заболеваний пищевода. *Новости хирургии*. 2020; Т. 28. № 6. С. 730–738.
6. do Nascimento FA, Lemme EM, Costa MM. Esophageal diverticula: pathogenesis, clinical aspects, and natural history. *Dysphagia*. 2006; Vol. 21. № 3. P. 198–205.
7. Law R, Katzka DA, Baron TH. Zenker's Diverticulum. *Clin Gastroenterol Hepatol*. 2014; Vol. 12. № 11. P. 1773–1782.
8. Ferreira Ferreira LE, Simmons DT, Baron TH. Zenker's diverticula: pathophysiology, clinical presentation, and flexible endoscopic management. *Dis Esophagus*. 2008; Vol. 21. № 1. P. 1–8.
9. Zaninotto G, Portale G, Costantini M, Zanatta L, Salvador R, Ruol A. Therapeutic strategies for epiphrenic diverticula: systematic review. *World J Surg*. 2011; Vol. 35. № 7. P. 1447–1453.
10. Nehra D, Lord RV, DeMeester TR, Theisen J, Peters JH, Crookes PF, Bremner CG. Physiologic basis for the treatment of epiphrenic diverticulum. *Ann Surg*. 2002; Vol. 235. № 3. P. 346–354.
11. Kaye MD. Oesophageal motor dysfunction in patients with diverticula of the mid-thoracic oesophagus. *Thorax*. 1974; Vol. 29. № 6. P. 666–672.
12. Constantinoiu S., Constantin A., Predescu D., et al. Tratamentul chirurgical al diverticilor esofagiene. *Chirurgia (Bucur)*. 2011; Vol. 106(1):37–43.
13. Benacci J.C., Deschamps C., Trastek V.F., et al. Epiphrenic diverticulum: results of surgical treatment. *Ann Thorac Surg*. 1993; Vol. 55. № 5. P. 1109–1113.
14. Ивашкин В.Т., Маев И.В., Трухманов А.С. и др. Рекомендации Российской гастроэнтерологической ассоциации по диагностике и лечению гастроэзофагеальной рефлюксной болезни. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2020; Т. 30. № 4. С. 70–97.
15. Arana E, Latorre FF, Díaz C. Divertículos gigantes de esófago medio apareciendo como masas mediastínicas en radiografías de tórax [Giant diverticula of the mid-esophagus appearing as mediastinal masses in thoracic radiography]. *Arch Bronconeumol*. 1995; Vol. 31. № 1. P. 44–45.
16. Prachand V. Epiphrenic Diverticulum of the Esophagus. From Pathophysiology to Treatment. *Journal of Gastrointestinal Surgery*. 2010; <https://doi.org/10.1007/S11605-010-1216-9>.
17. Bizzotto A, Iacopini F, Landi R, Costamagna G. Zenker's diverticulum: exploring treatment options. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2013; Vol. 33. № 4. P. 219–229.
18. Королева И.М. Лучевые технологии в гастроэнтерологии: «старое» и «новое» в диагностике. *Consilium Medicum*. 2017; № 8. С. 48–53.
19. Albers D.V., Kondo A., Bernardo W.M., et al. Endoscopic versus surgical approach in the treatment of Zenker's diverticulum: systematic review and meta-analysis. *Endosc Int Open*. 2016; Vol. 4. № 6. P. E678–86.
20. Ishaq S., Hassan C., Antonello A., et al. Flexible endoscopic treatment for Zenker's diverticulum: a systematic review and meta-analysis. *Gastrointest Endosc*. 2016; Vol. 83(6):1076–1089.e5.
21. Ivanov Y.V., Sazonov D.V., Panchenkov D.N., et al Zenker's diverticulum: modern approaches to surgical treatment. *Journal of Clinical Practice*. 2016; Vol. 7. № 3. P. 17–23.
22. Chan DSY, Foliaki A, Lewis WG, et al. Systematic Review and Meta-analysis of Surgical Treatment of Non-Zenker's Oesophageal Diverticula. *J Gastrointest Surg*. 2017; Vol. 21. № 6. P. 1067–1075.
23. Navgale S.S., Dharap S.B., Wankhede S., et al Laparoscopic Management of Esophageal Epiphrenic Diverticulum. *Cureus*. 2024; Vol. 16. № 8. P. e66663.
24. Маев И.В., Бордин Д.С., Баркалова Е.В., и др. Особенности параметров суточной рН-импедансометрии и манометрии пищевода высокого разрешения у пациентов с пищеводом Баррета на фоне приема ингибиторов протонной помпы. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2023; Т. 33. № 1. С. 24–39.
25. Федоров И.Ф., Сигал Е.И., Славин Л.Е. Эндоскопическая хирургия: руководство для врачей. ГЭОТАР-Медиа, 2009; 540 с.

© Хмара Артём Дмитриевич (premdania@yandex.ru); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Осинцев Евгений Юрьевич (dr_osintsev@mail.ru); Конопацкова Ольга Михайловна (sergejkapralov@yandex.ru);
Горбунова Елена Сергеевна (sergejkapralov@yandex.ru); Акопян Ани Вардановна (anivard2001@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Afanasyev A. — Postgraduate student, BMSTU

Akopyan A. — Resident, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky of the Ministry of Health of the Russian Federation

Aksenova S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University» (Saransk, Russia)

Andreev A. — Lead Specialist, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow, Russia

Asaliev I. — Post-graduate student, Moscow City University (MCU)

Azizova D. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University

Badanov A. — Lead Developer at Amberdata LLC; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MSTU STANKIN»

Balter R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Bogdasarova R. — Postgraduate Student, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Borisova O. — Candidate of pedagogical sciences, Associate professor, Moscow State Technological university «STANKIN»

Choibsonov N.-S. — I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Dakieva L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ingush State University

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Dobrynina T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow City University (MCU)

Our authors

Dolakov I. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ingush State University, surgeon

Egorov V. — PhD in Engineering, Associate Professor, Penza State University

Fedorova O. — Doctor of Biological Sciences, Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Filatov A. — Postgraduate Student, Moscow State University of Technology Russia

Gailaev I. — I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Gezgieva R. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ingush State University, surgeon

Gorbunova E. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky of the Ministry of Health of the Russian Federation

Grigoriev N. — Endocrinologist, urologist, andrologist, Delta LLC

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Ilchenko O. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Samara State Medical University

Isaev R. — PhD, assistant, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Ivanova T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Samara State Medical University

Kachanov F. — PhD student, MIREA – Russian Technological University

Kalinchenko S. — MD, Professor, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Kalutsky I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Polytechnic University; Associate Professor, RTU MIREA

Karakotova A. — Cardiovascular Surgeon, Postgraduate Student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Karyakin A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik

Khairutdinova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University

Khaliman I. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Melitopol State University

Khmara A. — Candidate of Medical Sciences, surgeon, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky of the Ministry of Health of the Russian Federation

Khozina E. — senior lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University» (Saransk, Russia)

Komarov R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Kononova V. — Resident physician, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Konopatskova O. — Doctor of Medicine Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky of the Ministry of Health of the Russian Federation

Kotelnikov V. — Candidate of Medical Sciences, Obstetrician-Gynecologist at the International Bio Clinic LLC, Russia, Samara

Ksenofontov A. — Assistant, Belgorod State National Research University; Surgeon at OGBUZ "City Hospital No. 2 of Belgorod"

Kuandykova D. — Assistant, Kazan (Volga Region) Federal University

Kumaksheva T. — senior lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University» (Saransk, Russia)

Larina E. — Doctor of Biological Sciences, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Lazunin K. — Senior Lecturer, MIREA - Russian Technological University

Maisian T. — I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Muratova L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University

Mysakov N. — Post-graduate student, Moscow City University (MCU)

Orlova E. — Candidate of Agricultural Sciences, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Osadchaya E. — Applicant, Samara State Medical University International Bio Clinic LLC

Osintsev E. — Doctor of Medicine Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky of the Ministry of Health of the Russian Federation

Patieva B. — Ingush State University

Polidanov M. — specialist, assistant, University «Reaviz», Saint Petersburg, Russian Federation

Polonikov I. — Postgraduate at the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEP), Moscow, Russia

Rozhnova V. — Assistant, Kerch State Maritime Technological University

Ryabova T. — candidate of biological sciences, Associate Professor Birk branch of Ufa University of Science and Technology

Sakovich N. — Doctor of technical sciences, associate professor, Bryansk State Agrarian University

Sergeev O. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

Shakhrinova N. — candidate of biological sciences, Associate Professor, Birk branch of Ufa University of Science and Technology

Sharlaev E. — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Altay State Technical University named after I.I. Polzunov

Shipulin G. — PhD in Law, Associate Professor at RTU MIREA; Associate Professor, Moscow Polytechnic University

Shornikov A. — Assistant Professor, Moscow Polytechnic University

Shvets Yu. — Senior Researcher, Candidate of Economic Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Moscow

Sidoryak N. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Melitopol State University

Sosenushkin S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, FGBOU VO «MSTU «STANKIN»

Sotskov V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik

Strelchenko Yu. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University» (Saransk, Russia)

Taran V. — candidate of cultural studies (ICT), Head of Laboratory for computer design and applied informatics «SPLASH».

Tarasova I. — Obstetrician-gynecologist, endocrinologist, Professor Kalinchenko Clinic LLC, Moscow, Russia

Tkachev M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Torshkhoeva A. — Federal State Budgetary Educational Institution «Russian University of Medicine» of the Ministry of Health of Russia

Trishin A. — Graduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Moscow Polytechnic University»

Tselkovich L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Tyryshkin S. — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Altay State Technical University named after I.I. Polzunov

Varlamov G. — I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

Verezubova N. — Candidate of economic sciences, associate professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Vorslov L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Vasilyeva O. — MD, PhD Associate professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University» (Saransk, Russia); Ophthalmologist Limited Liability Company «Dr. Kurenkov Clinic» (Moscow, Russia)

Yakovleva O. — Candidate of Agricultural Sciences, associate professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Yapparova E. — candidate of biological sciences, Associate Professor, Birsik branch of Ufa University of Science and Technology

Zakharov O. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

Zhludko G. — Applicant, Sechenov Institute

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением “.doc”, или “.rtf”, шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускаются.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).