

**АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
«ACADEMY OF NATURAL HISTORY»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL
JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL
RESEARCH**

Журнал основан в 2007 году
The journal is based in 2007
ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,593

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,299

№ 9 2025
Научный журнал
Scientific journal

Журнал International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований) зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте www.rae.ru

The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

к.м.н. Н.Ю. Стукова

Ответственный секретарь

к.м.н. М.Н. Бизенкова

EDITOR

Natalia Stukova

Senior Director and Publisher

Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. Абдуллаев А. (Душанбе); к.б.н. Алиева К.Г. (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. Алоев В.З. (Чегем-2); д.б.н., проф. Андреева А.В. (Уфа); к.географ.н., доцент Аничкина Н.В. (Липецк); к.ф.-м.н. Барановский Н.В. (Томск); д.б.н., доцент Белых О.А. (Иркутск); д.т.н., проф. Бурмистрова О.Н. (Ухта); д.т.н., доцент Быстров В.А. (Новокузнецк); д.м.н., проф. Гарбуз И.Ф. (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. Геворкян Э.А. (Москва); д.х.н., проф. Гурбанов Г.Р. (Баку); д.ветеринар.н., доцент Ермолина С.А. (Киров); к.т.н. Есенаманова М.С. (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.м.н. Жураковский И.П. (Новосибирск); д.т.н., доцент Ибраев И.К. (Темиртау); к.т.н., доцент Исмаилов З.И. (Баку); д.б.н., с.н.с. Кавцевич Н.Н. (Североморск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.б.н. Кокорева И.И. (Алматы); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); к.б.н., доцент Коротченко И.С. (Красноярск); к.с.-х.н., доцент Кряжева В.Л. (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент Кульков В.Г. (Волжский); д.б.н. Ларионов М.В. (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент Леонтьев Д.Ф. (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., с.н.с. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Несветаев Г.В. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. Никитин С.Н. (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент Олешко О.А. (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. Партоев К. (Душанбе); к.п.н., доцент Попова И.Н. (Москва); д.т.н., проф. Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент Розыходжаева Г.А. (Ташкент); д.г.-м.н. Сакиев К.С. (Бишкек); д.т.н., проф. Сугак Е.В. (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. Трефилов Б.Б. (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент Хайдаров А.Г. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals directory» в целях информирования мировой научной общественности.

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) –
головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,593.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,299.

Учредитель, издатель и редакция:

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя: 410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

ISSN 1996-3955

Тел. редакции – 8-(499)-705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова

Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина

Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 30.09.2025

Дата выхода номера – 30.10.2025

Формат 60х90 1/8

Типография

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространяется по свободной цене

Усл. печ. л. 6,0

Тираж 500 экз.

Заказ МЖПиФИ 2025/9

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОБУЧЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ТРЕНАЖЕРЕ С УЧЕТОМ
ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И СЦЕНАРНЫХ ФАКТОРОВ
Дадашев Ф.Г., Аллахвердиев А.Р., Гусейнов Н.Э., Дадашева К.Г., Асадов Э.З. 5
- РЕСУРСЫ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КУПЫРЯ ЛЕСНОГО
В СООБЩЕСТВАХ КАРЕЛИИ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ
Морозова К.В., Евсеева Д.А. 10

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ЗУБНЫМИ ВРАЧАМИ В КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКЕ: ДИНАМИКА И КАДРОВЫЕ ВЫЗОВЫ
Кыдыкбаева Н.Ж., Маратова А.М. 15

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

- РОЛЬ ВИТАМИНА D В КОРРЕКЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО ОБМЕНА
ПОСЛЕ ПАРАТИРЕОИДЭКТОМИИ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ
ПОЗДНЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВИЧНОГО ГИПЕРПАРАТИРЕОЗА
Айзетулова Г.Р., Осипов В.Ф., Балтримас В.С., Фролова А.С. 21

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА УРОЖАЙНОСТЬ
И ПРОДУКТИВНОСТЬ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ ПРИ ИНОКУЛЯЦИИ
СЕМЯН В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА
Монгуш Л.Т. 26

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСКУССТВЕННОЙ
НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРОТИВ КЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА
В КОНТРОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ
Ананченко И.В., Баранков К.А., Михайлиди А.А. 32

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- О ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ
Сенницкий В.Л. 37

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ СОЧЕТАННОЙ
ГИДРОФОБИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ПЕКТИНА
Серикова Л.В., Худайбергенова Э.М. 42

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLES

- MODEL FOR PREDICTING LEARNING EFFECTIVENESS
IN AN INTELLIGENT TRAINER BASED
ON PSYCHOPHYSIOLOGICAL AND SCENARIO FACTORS
Dadashev F.G., Allakhverdiev A.R., Guseynov N.E., Dadasheva K.G., Asadov E.Z. 5

- RESOURCES AND MORPHOLOGICAL FEATURES
OF *ANTHRISCUS SYLVESTRIS* IN COMMUNITIES
OF KARELIA AND THE MURMANSK REGION
Morozova K.V., Evseeva D.A. 10

MEDICAL SCIENCES

ARTICLE

- AVAILABILITY OF DENTAL THERAPIST IN THE KYRGYZ
REPUBLIC: DYNAMICS AND STAFFING CHALLENGES
Kydykbaeva N.Zh., Maratova A.M. 15

CLINICAL CASE

- THE ROLE OF VITAMIN D IN THE CORRECTION OF MINERAL
METABOLISM AFTER PARATHYROIDECTOMY: A CLINICAL CASE
OF LATE DIAGNOSIS OF PRIMARY HYPERPARATHYROIDISM
Ayzetullova G.R., Osipov V.F., Baltrimas V.S., Frolova A.S. 21

AGRICULTURAL SCIENCES

ARTICLE

- STUDY OF THE INFLUENCE OF BIOLOGICAL PRODUCTS
ON THE YIELD AND PRODUCTIVITY OF PERENNIAL GRASSES
DURING SEED INOCULATION IN THE REPUBLIC OF TYVA
Mongush L.T. 26

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLE

- ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF ARTIFICIAL
NEURAL NETWORKS VERSUS CLASSICAL APPROACHES
IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTAL MONITORING
Anantchenko I.V., Barankov K.A., Mikhailidi A.A. 32

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

ARTICLE

- ON THE ROTATIONAL MOTION OF A HYDRO-MECHANICAL
SYSTEM WITH A VISCOUS LIQUID
Sennitskiy V.L. 37

CHEMICAL SCIENCES

ARTICLE

- SYNTHESIS AND PROPERTIES OF PRODUCTS OF COMBINED
HYDROPHOBIZATION OF PECTIN STRUCTURE
Serikova L.V., Khudaybergenova E.M. 42

СТАТЬИ

УДК 159.9.07:004.04

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ТРЕНАЖЕРЕ С УЧЕТОМ
ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И СЦЕНАРНЫХ ФАКТОРОВ**¹Дадашев Ф.Г., ²Аллахвердиев А.Р., ¹Гусейнов Н.Э., ²Дадашева К.Г., ¹Асадов Э.З.¹Научно-исследовательский институт при Национальной Академии Авиации, Баку;²Институт физиологии имени академика Абдуллы Гараева, Баку, e-mail: ali_doctor@mail.ru

Современные требования к профессиональной подготовке специалистов в различных сферах деятельности диктуют необходимость внедрения интеллектуальных тренажеров нового поколения, обладающих способностью к адаптации под индивидуальные особенности обучаемого. Это особенно актуально в условиях, где необходим высокий уровень надежности и точности, таких как подготовка к действиям с огнестрельным оружием. Целью настоящего исследования является разработка прогностической модели оценки эффективности обучения, которая учитывает как психофизиологические характеристики обучающегося, так и параметры сценариев, реализуемых в рамках тренажерной подготовки. В качестве материалов и методов исследования были использованы данные, отражающие психофизиологическое состояние участников тренировочного процесса – в частности, показатели работоспособности, уровня стресса, вегетативного баланса и индивидуальной минуты. Дополнительно анализировались особенности выполнения заданий различной степени сложности в условиях виртуального тренажера. На основании предварительного анализа собранных данных были выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на успешность освоения учебных сценариев. Для построения прогностической модели была использована технология нечеткой логики, которая позволяет эффективно интегрировать как количественные, так и качественные параметры, включая индивидуальные особенности обучающихся и специфику учебных задач. Модель показала высокую степень точности в оценке потенциальной эффективности обучения за счет комплексного подхода к обработке информации. Разработанная модель может быть эффективно интегрирована в интеллектуальные системы тренажерной подготовки, обеспечивая адаптацию учебного процесса под конкретного пользователя в режиме реального времени. Это способствует значительному повышению качества персонализированной подготовки, особенно в условиях интенсивного освоения практических навыков, связанных с обращением с огнестрельным оружием, где цена ошибки особенно высока.

Ключевые слова: интеллектуальный тренажер, психофизиологические показатели, сценарии, огнестрельное оружие, обучение

**MODEL FOR PREDICTING LEARNING EFFECTIVENESS
IN AN INTELLIGENT TRAINER BASED
ON PSYCHOPHYSIOLOGICAL AND SCENARIO FACTORS**¹Dadashev F.G., ²Allakhverdiev A.R., ¹Guseynov N.E., ²Dadasheva K.G., ¹Asadov E.Z.¹National Aviation Academy, Baku;²A.I. Karaev Institute of Physiology, Baku, e-mail: ali_doctor@mail.ru

Modern professional training requirements across various fields necessitate the implementation of next-generation intelligent trainers capable of adapting to the individual characteristics of learners. This need is especially critical in contexts requiring a high level of reliability and precision, such as training for handling firearms. The aim of this study is to develop a predictive model for assessing learning effectiveness that takes into account both the psychophysiological characteristics of the trainee and the parameters of the training scenarios. The study materials and methods include data reflecting the psychophysiological state of participants in the training process – specifically, indicators of work capacity, stress level, autonomic balance, and individual minute. Additionally, features of task performance of varying difficulty levels within a virtual trainer environment were analyzed. Based on preliminary analysis of the collected data, the most significant factors influencing successful mastery of training scenarios were identified. Fuzzy logic technology was used to construct the predictive model, allowing effective integration of both quantitative and qualitative parameters, including individual learner traits and specifics of training tasks. The model demonstrated a high degree of accuracy in assessing potential learning effectiveness through a comprehensive approach to data processing. The developed model can be effectively integrated into intelligent training systems, providing real-time adaptation of the training process to the individual user. This significantly enhances the quality of personalized training, especially in the intensive acquisition of practical skills related to handling firearms, where the cost of error is particularly high.

Keywords: intelligent trainer, psychophysiological indicators, scenarios, firearms, training

Введение

Обучение обращению с огнестрельным оружием требует не только отработки технических навыков, но и учета индивидуальных психофизиологических особенностей обучаемого, таких как уровень стресса, внимание, эмоциональная устойчивость и ско-

рость принятия решений в нестабильных условиях [1; 2]. Традиционные методы подготовки, как правило, основаны на стандартизированных программах и не обеспечивают должной гибкости в учете индивидуальных различий, что может снижать общую эффективность обучения.

Одним из перспективных направлений повышения качества подготовки является использование интеллектуальных систем [3, с. 13], способных анализировать широкий спектр входных данных и адаптировать процесс обучения под конкретного пользователя [4; 5]. В рамках данного исследования рассматривается применение экспертно-консультативной системы на основе нечеткой логики [6; 7], которая позволяет обрабатывать как количественные, так и качественные параметры, включая психофизиологические характеристики обучающихся и параметры тренировочных сценариев различной сложности [8].

Работа посвящена разработке модели прогнозирования эффективности обучения в интеллектуальном тренажере для работы с огнестрельным оружием. Такая модель учитывает индивидуальные особенности обучаемого и сценарные факторы, обеспечивая обоснованные рекомендации по адаптации учебного процесса и повышению его результативности [9; 10].

Цель исследования – разработать и протестировать модель прогнозирования эффективности обучения в интеллектуальном тренажере с учетом психофизиологических и сценарных факторов с применением экспертно-консультативной системы на базе нечеткой логики.

Материалы и методы исследования

Экспертно-консультативная система с применением нечеткой логики является

ся ядром интеллектуального тренажера. На рис. 1 представлена разработанная авторами структурно-функциональная схема экспертной системы.

В рамках интеллектуальной модели, направленной на адаптацию процесса обучения к индивидуальным особенностям, особое значение приобретает вектор психофизиологических параметров, обозначаемый как $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, где каждая компонента отражает ключевые характеристики текущего функционального состояния пользователя:

– x_1 – уровень стресса (С), как интегральный показатель эмоционального напряжения и реактивности нервной системы;

– x_2 – работоспособность (Р), отражающая общий психофизиологический ресурс, включающий в себя показатели внимания, устойчивости к утомлению и когнитивной активности;

– x_3 – вегетативный баланс (ВБ), определяющий соотношение активности симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы и характеризующий уровень внутренней физиологической стабильности;

– x_4 – индивидуальная минута (ИМ) по методу Франца Халберга, представляющая собой субъективно-временной параметр, отражающий индивидуальные различия в ощущениях и интерпретации времени, что имеет значение при управлении учебным темпом и когнитивной нагрузкой.

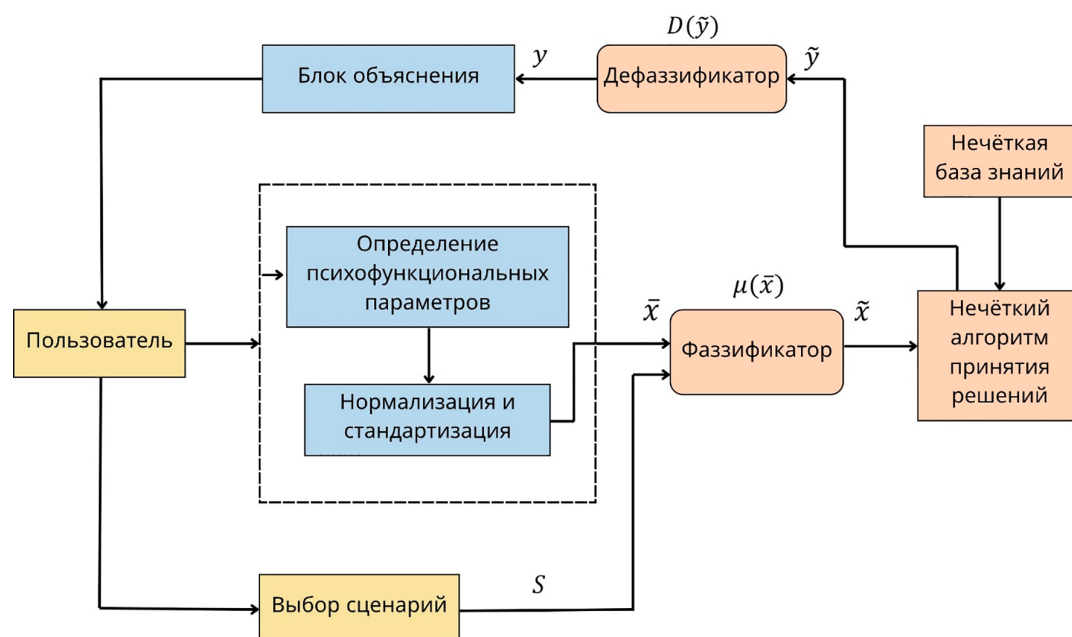


Рис. 1. Структурно-функциональная схема экспертной системы
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

База нечетких знаний

№	С	Р	ВБ	ИМ	СС	УР
1	низкий	высокая	сбалансирован	нормальная	средняя	высокий
2	средняя	средний	сбалансирован	нормальная	средняя	средний
3	высокая	низкая	дисбаланс	медленная	высокая	низкий
4	высокая	средний	гипербаланс	быстрая	низкая	высокий
5	низкий	средняя	сбалансирован	нормальная	высокая	средний
6	высокая	высокий	гипербаланс	быстрая	высокая	средний
7	низкая	низкий	сбалансирован	нормальная	низкая	средний

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

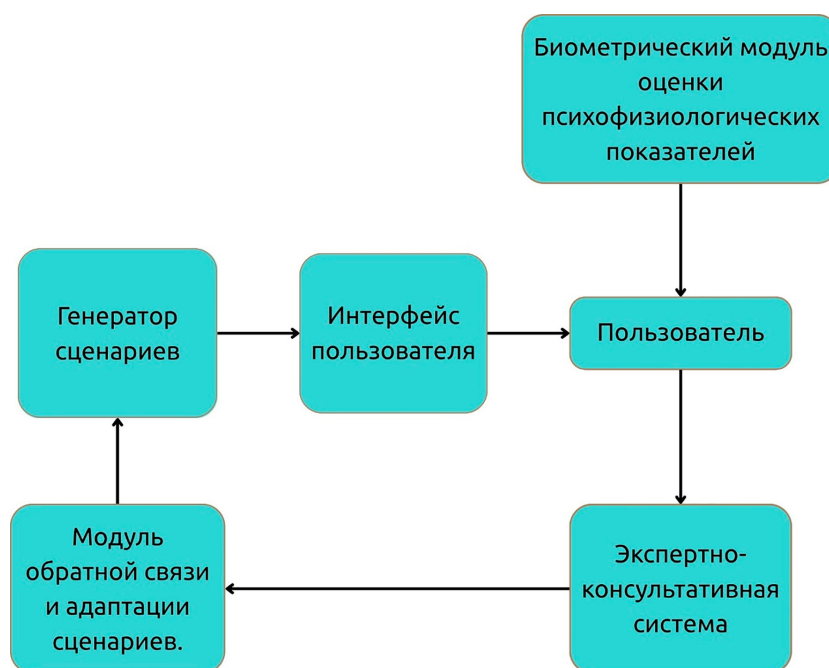


Рис. 2. Основные модули функциональной схемы интеллектуального тренажера
Модули функциональной схемы интеллектуального тренажера,
составленной авторами в ходе проведенного исследования

Таким образом, вектор X представляет собой обобщенную модель психофизиологического профиля обучаемого на текущий момент и используется как входной набор признаков для дальнейшего анализа и принятия решений в интеллектуальной системе. Указанные параметры определяются с использованием валидизированной психометрической методики – цветового теста Люшера [11], результаты которого проходят этап числовой калибровки и преобразования с применением специализированного алгоритма интерпретации. Это позволяет обеспечить сопоставимость данных между пользователями и их динамическую отслеживаемость в процессе обучения.

Совместно с номинальной величиной уровня сложности сценария (СС) в диапазоне от 1 до 3 данные психофизиологические показатели подаются на вход фаззификационного блока интеллектуальной системы. Основной функцией данного блока является преобразование количественных входных параметров в соответствующие лингвистические переменные, формализованные с применением нечетких множеств, что позволяет учитывать как индивидуальные особенности пользователя, так и структурную неопределенность входной информации.

Такой подход обеспечивает возможность гибкого моделирования сложных взаимосвязей между внутренним состоя-

нием обучаемого и внешними условиями обучения, создавая базу для адаптивного управления процессом обучения с учетом когнитивно-психофизиологических характеристик субъекта.

В таблице представлены примеры правил из базы знаний. Общая база содержит 81 нечеткое правило, каждое из которых разработано и утверждено экспертами в данной предметной области на основе их профессионального опыта и анализа практических данных.

Использовался алгоритм Мамдани для вывода результата и дефаззификации с центроидным методом [12; 13. с. 217].

Полученное нечеткое множество по выходу преобразуется в числовое значение – уровень результата (УР) обучения – агрегированная функция принадлежности выходного значения.

Блок объяснения выполняет ключевую функцию интерпретации и обоснования полученных прогнозных решений, формируемых на основе нечеткой логики. Его задача заключается в предоставлении пользователю развернутых пояснений, отражающих причинно-следственные связи между входными психофизиологическими параметрами, условиями сценария и итоговым выводом системы. Благодаря использованию базы нечетких знаний данный модуль обеспечивает прозрачность логических рассуждений, тем самым повышая доверие к интеллектуальной системе и ее адаптивным рекомендациям.

На рис. 2 показаны основные модули интеллектуального тренажера, разработанного авторами данной статьи, включающие следующие компоненты:

- генератор сценариев с параметрами сложности (уровень задач, временные ограничения, наличие отвлекающих факторов);
- биометрический модуль оценки психофизиологических показателей;
- экспертно-консультативная система на основе нечеткой логики для прогнозирования эффективности обучения;
- модуль обратной связи и адаптации сценариев.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ психофизиологических данных и показателей выполнения заданий выявил ключевые факторы, существенно влияющие на эффективность обучения в интеллектуальной тренажерной системе. Среди психофизиологических показателей наибольшую корреляцию с успешностью выполнения задач продемонстрировали работоспособность и вегетативный баланс. Участники

с более высоким уровнем работоспособности и сбалансированной вегетативной нервной системой показали значительно лучшие результаты при выполнении сложных сценариев, связанных с обращением с огнестрельным оружием.

Уровень стресса выступил важным фактором, модифицирующим результаты обучения. Умеренный стресс способствовал повышению концентрации и вовлеченности, тогда как чрезмерный стресс негативно сказывался на точности и скорости реакции. Эти результаты согласуются с законом Йеркса – Додсона [14; 15], который описывает оптимальный уровень возбуждения для достижения максимальной производительности. Параметр индивидуальной минуты, отражающий базовую физиологическую вариабельность, также позволил получить ценные данные о специфике адаптации обучающихся и их устойчивости к усталости.

Сложность заданий варьировалась в рамках интеллектуального тренажера, и результаты показали, что адаптивная подстройка уровня сложности сценариев значительно улучшает усвоение материала и перенос навыков. При использовании прогностической модели, которая в реальном времени корректировала параметры тренировки на основе психофизиологической обратной связи, обучающиеся демонстрировали более высокую скорость освоения навыков и общую успешность по сравнению с контрольной группой без адаптации.

Применение нечеткой логики для построения модели позволило эффективно интегрировать разнородные данные и учитывать неопределенность и вариабельность физиологических реакций человека. Такой подход обеспечил более точное прогнозирование эффективности обучения по сравнению с традиционными линейными моделями. Валидизация модели с использованием методов кросс-валидации показала точность выше 85 %, что подтверждает ее устойчивость и применимость в реальных условиях тренировки.

Учет как физиологических, так и сценарных факторов позволяет реализовать динамическую персонализацию тренировочного процесса. Такая адаптивность особенно важна при подготовке по обращению с огнестрельным оружием, где критически важны точность и умение принимать решения в стрессовых ситуациях. Модель, обеспечивая корректировку интенсивности и сложности упражнений в режиме реального времени, позволяет оптимально распределить когнитивную нагрузку и повысить эффективность усвоения навыков.

В целом проведенное исследование демонстрирует, что интеграция психофизиологического мониторинга и адаптивных алгоритмов на основе сценариев существенно повышает качество и эффективность профессиональной подготовки. В дальнейшем планируется расширить модель за счет включения дополнительных биометрических данных и применить ее в других сферах с высокими требованиями к надежности и оперативности обучения.

Выводы

1. В настоящем исследовании разработана модель прогнозирования эффективности обучения, основанная на интеграции психофизиологических параметров обучающихся и характеристик тренировочных сценариев. Такая интеграция позволяет реализовать индивидуализированный подход к подготовке, ориентированный на актуальное функциональное состояние каждого пользователя.

2. Использование экспертно-консультативной системы, функционирующей на базе нечеткой логики, обеспечило возможность комплексной обработки как количественных, так и качественных показателей. Это позволило формализовать знания экспертов и сформулировать достоверные прогнозы обучаемости в условиях неполноты и неопределенности исходной информации.

3. Результаты численного моделирования подтвердили высокую степень согласованности между предсказанным уровнем усвоения навыков и фактическими результатами обучаемых, что свидетельствует о высокой валидности и прикладной значимости предложенной модели в контексте тренажерной подготовки.

4. Внедрение разработанной модели в интеллектуальные тренажеры, ориентированные на обучение действиям с огнестрельным оружием, способствует повышению эффективности учебного процесса за счет персонализированной адаптации сценариев, учета индивидуального психофизиологического статуса и точной оценки динамики профессионального роста обучаемого.

Список литературы

1. Кутыгин Ю.А. Психологический аспект при обучении стрельбе из стрелкового оружия. VIII Международная научная конференция. М., 2016. С. 60–61. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/conf/ped/archive/191/10553/> (дата обращения: 12.07.2025).

2. Мефодьева Ю.А., Беляков С.В. Психологические аспекты при выполнении упражнений учебных стрельб // Образование. Наука. Научные кадры. 2019. № 2. С. 226–228. DOI: 10.24411/2073-3305-2019-10120.

3. Grosan C., Abraham A. Intelligent Systems: A Modern Approach. Springer Berlin Heidelberg. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. P. 450. DOI: 10.1007/978-3-642-21004-4.

4. Анарова Ш.А., Бекназарова С.С., Каюмова Г.А. Адаптивные и интеллектуально-обучающие системы: методика создания и внедрения // Perspectives of Higher Education Development. 2024. Т. 16. № 2. С. 111–116. DOI: 10.34920/phe.2024.16.13.

5. Harley J.M., Bouchet F., Hussain M.S., Azevedo R., Calvo R.A. A multi-componential analysis of emotions during complex learning with an intelligent multi-agent system // Computers in Human Behavior. 2015. Vol. 48. P. 615–625. DOI: 10.1016/j.chb.2015.02.013.

6. Hwang G., Sung H., Chang S. A fuzzy expert system-based adaptive learning approach to improving students' learning performances by considering affective and cognitive factors // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2020. Vol. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.caeai.2020.100003.

7. Еремеев А.П., Сергеев М.Д., Петров В.С. Интеграция методов обучения с подкреплением и нечеткой логики для интеллектуальных систем реального времени // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 600–606. DOI: 10.15827/0236-235X.144.600-606.

8. Sahar Y., Wagner M., Barel A., Shoval S. Stress-Adaptive Training: An Adaptive Psychomotor Training According to Stress Measured by Grip Force // Sensors. 2022. Vol. 22. P. 1–13. DOI: 10.3390/s22218368.

9. Аллахвердиев А.Р., Гусейнов Н.Э., Дадашева К.Г., Дадашев Ф.Г., Асадов Э.З. Психофизиологические основы оптимизации процесса обучения в интеллектуальном тренажере // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2024. № 6. С. 5–9. DOI: 10.17513/mjrfi.13636.

10. Huseynov N.E., Dadashov F.H., Asadov E.Z., Hasanov H.B. Using multi-agent technologies to generate dynamic scenarios in an intelligent simulator. Технологии Искусственного Интеллекта и Аэрокосмические Проблемы. II Международная научно-практическая конференция. Баку, 2024. С. 17–24. [Электронный ресурс]. URL: <https://icaiap.com/en/archive> (дата обращения: 12.07.2025).

11. Сугоняев К.В. Можно ли оценивать черты личности с помощью цветового теста Люшера? // Психология. Психофизиология. 2019. Т. 12. № 2. С. 41–59. DOI: 10.14529/jpps190204.

12. Силич В.А., Силич М.П., Аксенов С.В. Алгоритм построения нечеткой системы логического вывода Мамдани, основанный на анализе плотности обучающихся примеров // Доклады ТУСУР. 2013. № 3 (29). С. 76–82. URL: <https://journal.tusur.ru/ru/arhiv/3-2013/algoritim-postroeniya-nechetkoy-sistemy-logicheskogo-vyvoda-mamdani-osnovannyu-na-analize-plotnosti-obuchayuschih-primerov> (дата обращения: 08.07.2025).

13. Броневиц А.Г., Лепский А.Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия. М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2022. С. 264. DOI: 10.17323/978-5-7598-2317-9.

14. Anderson G.S., Di Nota P.M., Metz G.A.S., Andersen J.P. The Impact of Acute Stress Physiology on Skilled Motor Performance: Implications for Policing // Frontiers Psychology. 2019. Vol. 10. P. 1–11. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02501.

15. Hancock P.A., Ganey N.H.C. From the Inverted-U to the Extended-U: The Evolution of a Law of Psychology. Journal of Human Performance in Extreme Environments. 2003. Vol. 7, Is. 1. P. 5–14. DOI: 10.7771/2327-2937.1023.

РЕСУРСЫ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КУПЫРЯ ЛЕСНОГО В СООБЩЕСТВАХ КАРЕЛИИ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Морозова К.В., Евсеева Д.А.

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»,
Петрозаводск, e-mail: mkv25@bk.ru

Для расширения ассортимента лекарственных растительных средств актуальным является изучение широко распространенных дикорастущих лекарственных растений, применяемых в народной медицине. Цель исследования – выявить ресурсы и изучить морфологические особенности купыря лесного (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.) в растительных сообществах Карелии и Мурманской области. Исследование выполнено в еловых, луговых, прибрежных и синантропных биотопах. В биотопах методом высушивания до постоянной массы определяли влажность, потенциометрическим методом – кислотность почв. На учетных площадках в естественных границах зарослей *Anthriscus sylvestris* определяли проективное покрытие вида, массу генеративных побегов с соцветиями и нижних листьев, высоту растений, площадь нижних листьев и длину их главных жилок. Установлено, что в синантропных биотопах в условиях затенения под кронами древесных видов на умеренно увлажненных и слабокислых почвах *Anthriscus sylvestris* занимает большой процент проективного покрытия, формирует значительные ресурсы, отличается крупными по высоте растениями и крупными по площади нижними листьями. В еловых биотопах на умеренно увлажненных, но сильнокислых почвах у этого вида проективное покрытие, ресурсы и значения морфологических параметров существенно ниже. В хорошо освещенных синантропных, луговых и прибрежных биотопах на кислых и слабокислых почвах проективное покрытие у растений сходное и накапливается большая масса сырья. При этом высота растений в синантропных биотопах больше, чем в прибрежных биотопах, а площадь нижних листьев и длина главной жилки меньше. В луговых биотопах на наиболее сухих почвах растения этого вида характеризуются наименьшими морфологическими параметрами.

Ключевые слова: *Anthriscus sylvestris*, ресурсы, морфология, Карелия, Мурманская область

RESOURCES AND MORPHOLOGICAL FEATURES OF *ANTHRISCUS SYLVESTRIS* IN COMMUNITIES OF KARELIA AND THE MURMANSK REGION

Morozova K.V., Evseeva D.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: mkv25@bk.ru

To expand the range of herbal medicines, it is important to study widespread wild medicinal plants used in folk medicine. The aim of the study was to identify resources and study the morphological features of the *Anthriscus sylvestris* in the plant communities of Karelia and the Murmansk region. The study was performed in spruce, meadow, coastal, synanthropic biotopes. Moisture was determined in soil by drying to a constant mass, acidity – by the potentiometric method in biotopes. The projective cover of the species, the mass of shoots with inflorescences and lower leaves, the height of plants, the area of the leaves and the length of main veins were determined within the natural boundaries of the thickets. In synanthropic biotopes *Anthriscus sylvestris* occupies a large percentage of the projective cover under the crowns of woody species on moderately moist and slightly acidic soils. It forms significant resources and has large plants and lower leaves. In spruce biotopes on moderately moist, highly acidic soils these indicators are significantly lower in this species. In well-lit synanthropic, meadow, coastal biotopes on acidic and slightly acidic soils the projected cover in plants is similar, accumulating a large mass of raw material. The height of plants in synanthropic biotopes is greater than in coastal biotopes. The area of leaves and the length of the main vein are smaller. In meadow biotopes on the driest soils the species is characterized by the lowest morphological parameters.

Keywords: *Anthriscus sylvestris*, resources, morphology, Karelia, Murmansk region

Введение

Купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.) из семейства Сельдерейные (Apiaceae) –бореальный европейский вид, широко распространенный в лесах, особенно в смешанных, широколиственных и мелколиственных, по берегам водоемов, на лугах и в синантропных биотопах [1–3]. Этот вид имеет большое значение как в формировании видового разнообразия разных типов сообществ, так и в качестве пищевого, медоносного, лекарственного и декоративного растения [4; 5]. В пищу употребляют све-

жие и отварные корни, свежие листья добавляют в салаты и заваривают в виде чая [6]. Эфирное масло *A. sylvestris* используют для ароматизации напитков и пищевых продуктов, оно также является перспективным природным источником веществ инсектицидного и репеллентного действия [7]. Вегетативные органы *A. sylvestris* в виде настоев применяют в народной медицине как успокаивающее, обезболивающее, спазмолитическое, противовоспалительное, антисептическое, антиоксидантное, противогрибковое, антибактериальное и антигель-

минтное средство [6]. Фармакологическое действие органов этого вида обусловлено их химическим составом, например наличием лигнанов, флавоноидов, терпенов и их производных, витамина С [8; 9]. Широкий ареал, формирование большой массы вегетативных органов, концентрация разных групп биологически активных веществ, применение в неофициальной медицине свидетельствует об актуальности проведения ресурсоведческого и морфологического исследования дикорастущего лекарственно-го растения *A. sylvestris*.

Цель исследования – выявить ресурсы и изучить морфологические особенности купыря лесного (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.) в растительных сообществах Карелии и Мурманской области.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в 2022–2024 гг. в г. Петрозаводске в прибрежных, синантропных, еловых биотопах, в окрестностях с. Деревянное в луговых и прибрежных биотопах (Республика Карелия), в г. Кандалакше в синантропных и еловых биотопах, в окрестностях с. Лувеньга в луговых биотопах (Мурманская область). Синантропные биотопы отличались условиями светового режима – хорошо освещенные и затененные кронами *Sorbus aucuparia* L. В естественных границах конкретных зарослей *A. sylvestris* заложено 14 трансект длиной от 12 до 24 м и описано 142 учетных площадок размером 1×1 м в выявленных маршрутным методом биотопах. В каждой заросли выявляли видовой состав сосудистых растений, фиксировали их проективное покрытие, измеряли высоту 10–25 растений *A. sylvestris*, делали прикопки глубиной до 15 см для взятия проб почвы для химического анализа. На каждой учетной площадке устанавливали проективное покрытие *A. sylvestris*, после чего у его растений срезали нижние листья и генеративные побеги с соцветиями длиной до 15 см. В лаборатории выбирали по 15 листьев из исследуемых биотопов для расчета их площади с помощью компьютерной программы Ruller и измерения линейкой длины главной жилки. Собранные листья и верхние части побегов взвешивали, сушили в хорошо проветриваемой лаборатории без проникновения прямых солнечных лучей и затем также взвешивали [10]. Содержание влажности в образцах почвы определяли методом высушивания до постоянной массы, кислотность – потенциометрическим методом [11] в трехкратных повторностях из каждого биотопа. Статистическую обработку результатов выполняли в программе

Statgraphics for Windows, для установления достоверных различий параметров проводили регрессионный анализ. Достоверных различий в изучаемых параметрах *A. sylvestris*, произрастающего в условиях Карелии и Мурманской области, не установлено, поэтому для анализа полученные результаты объединили в выборки по биотопам.

Результаты исследования и их обсуждение

В еловых, прибрежных, луговых, синантропных биотопах с участием купыря лесного зарегистрировано 42 вида из 17 семейств (Asteraceae, Fabaceae, Ranunculaceae, Rosaceae, Poaceae и др.). Виды *Achillea millefolium* L., *Aegopodium podagraria* L., *Angelica sylvestris* L., *Dactylis glomerata* L., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Trifolium pratense* L. занимают 15–25 % проективного покрытия. Проективное покрытие от 1 до 5 % определено у 17 видов, например, у *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Phleum pratense* L., *Ranunculus acris* L., *Tanacetum vulgare* L., *Veronica chamaedrys* L. Высокие растения *A. sylvestris* с крупными нижними листьями затеняют другие виды, поэтому биотопы с его участием характеризуются небольшим видовым составом. Ряд исследователей [12] указывают, что этот вид в большей степени влияет на рост злаков, заглушая их надземными вегетативными побегами. При этом стержневая корневая система *A. sylvestris*, расположенная в глубине почвы в отличие от видов с поверхностной корневой системой, снижает конкуренцию видов за почвенные ресурсы [12].

По данным некоторых авторов [5] *A. sylvestris* активно расселяется на незадернованных или слабо задернованных богатых по плодородию почвах умеренного увлажнения, в хорошо освещенных или слабо затененных местообитаниях. Согласно проведенному исследованию в луговых биотопах *A. sylvestris* произрастает на более сухих почвах, так как их влажность в 2,5 ниже, чем в еловых, прибрежных и синантропных биотопах (табл. 1).

В ельниках разнотравных под кронами *Picea abies* (L.) Н. Karst формируются сильнокислые почвы, что отмечают и другие авторы [13], в луговых и незатененных синантропных биотопах – кислые почвы, в прибрежных и затененных синантропных биотопах – слабокислые почвы. Почвы лугов образовались на естественных природных почвах с кислой реакцией в основном под влиянием таких природных процессов, как поступление органического вещества с опадением листвы и промывным водным режимом [11; 14].

Таблица 1

Характеристика почв биотопов с участием *Anthriscus sylvestris*

Биотопы		Влажность почв, %	Кислотность почв
Синантропные	незатененные	35,7±6,3 ^a	5,2±0,1 ^a
	затененные	37,3±5,0 ^a	6,3±0,2 ^b
Прибрежные		47,0±7,6 ^a	6,4±0,2 ^b
Луговые		26,7±0,3 ^b	5,1±0,1 ^a
Еловые разнотравные		44,5±7,0 ^a	3,5±0,1 ^c

Примечание. Значения параметров в столбцах с разными буквами значимо различаются ($p < 0,05$).
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

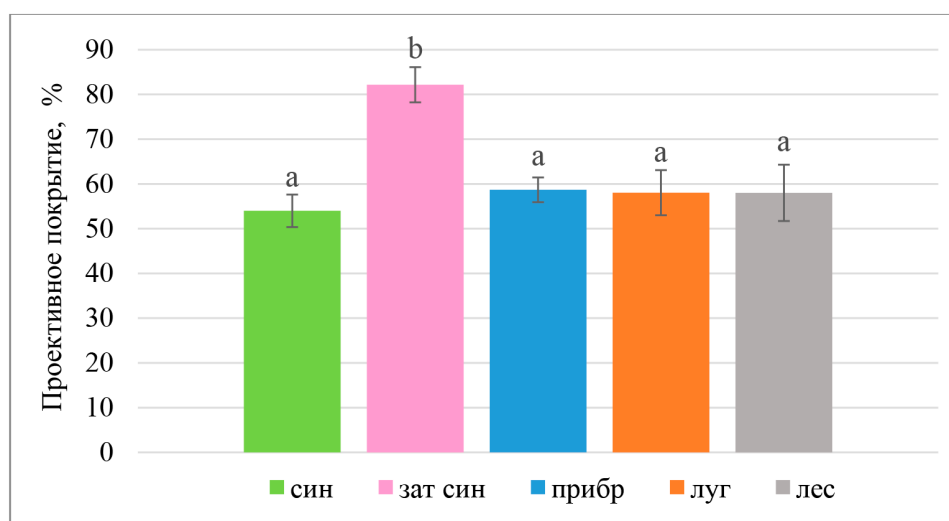


Рис. 1. Проективное покрытие *Anthriscus sylvestris* в биотопах: син – синантропные, зат син – затененные синантропные, прибр – прибрежные, луг – луговые, лес – лесные
Примечание. Значения параметров с разными буквами значимо различаются ($p < 0,05$)
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Почвы на территории городов отличаются ростом профиля за счет интенсивного аэрационного напыления, приводящего к уменьшению кислотности почв [14, с. 18], что отмечено по результатам проведенного исследования в затененных синантропных биотопах, где *A. sylvestris* занимает значительное проективное покрытие (82,2±4,0%). В других исследуемых биотопах проективное покрытие вида снижается почти в 1,5 раза (рис. 1). По данным литературы [3] на влажных лугах значение этого параметра у *A. sylvestris* достигает 70–88%, на суходольных лугах составляет 12–17%, в синантропных биотопах – в среднем 23%.

Наименьшие значения параметров ресурсоведческой оценки сырья *A. sylvestris* установлены в еловых разнотравных биотопах (табл. 2).

Ряд авторов [15] выявили отрицательное влияние *Picea abies* на рост и развитие изучаемого вида из-за подкисления почв в результате большого количества опада хвои под кронами деревьев. В затененных синантропных биотопах у *A. sylvestris* масса свежесобранных и воздушно-сухих генеративных побегов достоверно выше. Масса нижних листьев сырая и воздушно-сухая у растений вида в исследуемых биотопах изменяется в более узком диапазоне.

Наибольшая высота (127,6±2,0 см) у растений *A. sylvestris* определена в синантропных биотопах при затенении, а при высоком освещении в таких биотопах высота у растений снижается (рис. 2). Значимых отличий в значении этого морфологического параметра у вида в прибрежных и еловых биотопах не установлено. В луговых биотопах зарегистрированы наиболее низкие растения (92,1±3,2 см).

Таблица 2

Масса генеративных побегов и нижних листьев *Anthriscus sylvestris* в биотопах

Биотопы		Масса сырая, г/м ²		Масса воздушно-сухая, г/м ²	
		Генеративных побегов с соцветиями	Нижних листьев	Генеративных побегов с соцветиями	Нижних листьев
Синантропные	незатененные	64,4±5,0 ^a	50,0±7,6 ^a	19,0±1, ⁶ a	10,8±2, ⁴ a
	затененные	86,6±4, ⁶ b	66,4±7, ² a	28,1±1,0 ^b	11,1±2,4 ^a
Прибрежные		70,0±2,4 ^{ac}	46,4±5,6 ^{ab}	17,1±3,3 ^a	9,7±1,2 ^a
Луговые		53,3±6,1 ^{ad}	34,5±9,6 ^b	14,6±2,6 ^a	6,0±0,6 ^b
Еловые разнотравные		23,2±6, ⁴ p	30,0±2,7 ^b	5,1±1, ¹ c	4,7±0,2 ^{bc}

Примечание. Значения параметров с разными буквами значимо различаются ($p < 0,05$).
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

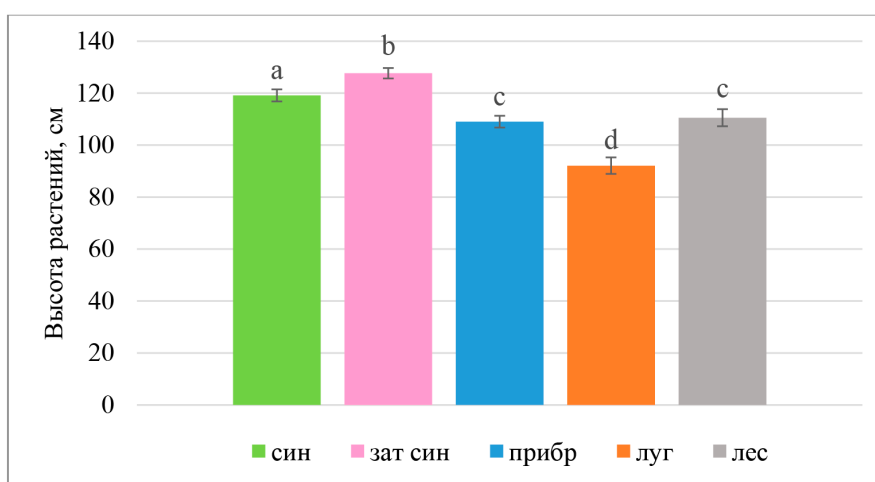


Рис. 2. Высота растений *Anthriscus sylvestris* в биотопах: син –синантропные, зат син –затененные синантропные, прибр –прибрежные, луг –луговые, лес –лесные
Примечание. Значения параметров с разными буквами значимо различаются ($p < 0,05$)
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

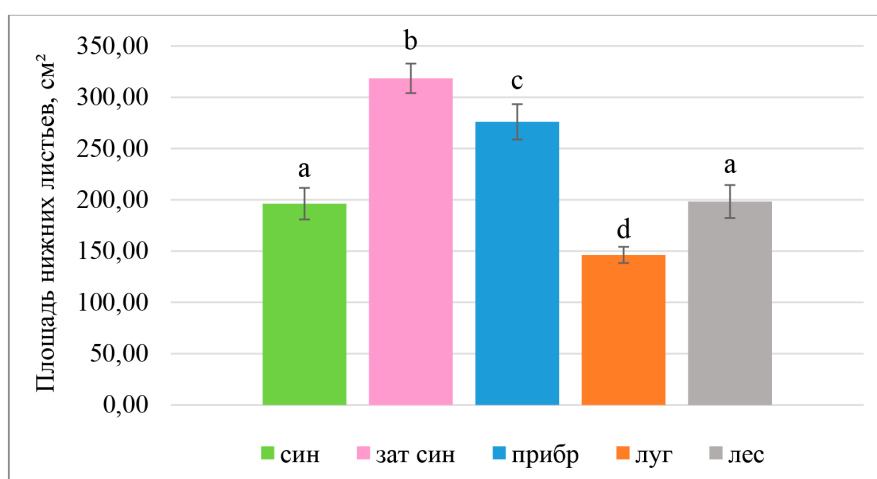


Рис. 3. Площадь нижних листьев *Anthriscus sylvestris* в биотопах: син –синантропные, зат син –затененные синантропные, прибр –прибрежные, луг –луговые, лес –лесные
Примечание. Значения параметров с разными буквами значимо различаются ($p < 0,05$)
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

В затененных синантропных биотопах *A. sylvestris* отличается крупными по размерам нижними листьями – площадь $318,4 \pm 14,4$ см², длина главной жилки $21,3 \pm 0,3$ см. Несколько меньшие листья обнаружены у растений в прибрежных экотопах ($276,0 \pm 17,2$ см², $18,1 \pm 0,4$ см соответственно). В данных биотопах нижние листья *A. sylvestris* затеняются листьями *Aegopodium podagraria* и *Filipendula ulmaria*, проективное покрытие которых достигало 20–25%. В синантропных биотопах в условиях высокой освещенности и в еловых биотопах у *A. sylvestris* площадь листьев и длина их главных жилок одинаковая (рис. 3).

В луговых биотопах площадь листьев ($146,2 \pm 7,8$ см²) и длина главной жилки ($12,7 \pm 0,3$ см), как и высота растений, наименьшие. Уменьшение размеров листьев у растений в хорошо освещенных биотопах способствует снижению их транспирации. Изменение площади нижних листьев у *A. sylvestris* в разных условиях произрастания в основном происходит за счет их длины, которая варьирует от 10,0 до 21,6 см, а ширина изменяется от 9,0 до 15,0 см.

Заключение

В синантропных биотопах в условиях затенения под пологом крон древесных видов на умеренно увлажненных и слабокислых почвах *A. sylvestris* занимает большой процент проективного покрытия, формирует значительные ресурсы, отличается крупными по высоте растениями и крупными по площади нижними листьями. В еловых биотопах на умеренно увлажненных, но сильноокислых почвах проективное покрытие, ресурсы и морфологические параметры у вида существенно ниже. В хорошо освещенных синантропных, луговых и прибрежных биотопах на кислых и слабокислых почвах проективное покрытие у *A. sylvestris* сходное и накапливается большая масса сырья. При этом высота растений в синантропных биотопах больше, чем в прибрежных, а площадь нижних листьев и длина главной жилки меньше. В луговых биотопах на наиболее сухих почвах растения характеризуются наименьшими морфологическими параметрами. Таким образом, данное исследование показало перспективность дальнейшего изучения *A. sylvestris* в разных условиях произрастания для выявления ресурсов.

Список литературы

1. Рыжкова Н.И., Крышень А.М., Геникова Н.В., Преснухин Ю.В., Ткаченко Ю.Н. Сравнительный анализ структуры напочвенного покрова в культурах лиственницы и зональных ельников на границе средней и южной подзон тайги // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 12. С. 25–38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-struktury-napochvennogo-pokrova-v-kulturah-listvennitsy-i-zonalnykh-elnikov-na-granitse-sredney-i-yuzhnoy-podzon-taygi> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.17076/eco517.
2. Сулова Е.Г. Леса Московской области // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 119–190. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesa-moskovskoy-oblasti> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.24411/2542-2006-2019-10029.
3. Бекетова О.А., Комаров И.В. Растительные сообщества нарушенных местообитаний тайги и подтайги земледельческой части Красноярского края // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (157). С. 3–9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rastitelnye-soobshchestva-narushennykh-mestoobitaniy-taygi-i-podtaygi-zemledelcheskoy-chasti-krasnoyarskogo-kрая> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-4-3-9.
4. Курманов Р.Г. Медоносные растения семейства зонтичные: вклад в пыльцевые спектры медов мира, России и Республики Башкортостан // Теоретический и практический потенциал современной науки. 2019. С. 8–19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=kufvnp> (дата обращения: 22.07.2025). EDN: KUFVNP.
5. Чудновская Г.В. Полезные растения семейства *Apiaceae* (Сельдерейные) города Иркутска и Иркутского района Иркутской области // Современные проблемы охотоведения. Материалы национальной конференции с международным участием, посвященной 70-летию охотоведческого образования в ИСХИ –Иркутском ГАУ (Иркутск, 27–31 мая 2020 г.). Иркутск: Издательство Иркутского ГАУ им. А.А. Ежовского, 2020. С. 276–283. [Электронный ресурс]. URL: <https://pps.kaznu.kz/ru/Main/FileShow2/169772/72/3/877/0/> (дата обращения: 02.03.2024). EDN: PYYKHQ.
6. Баширова Р.М., Мустафин А.Г. Потенциальные источники подофиллотоксина в башкирской флоре // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. № 2. С. 69–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26179719> (дата обращения: 30.07.2025). EDN: WAXDYR.
7. Раловец А.Д. Содержание веществ с инсектицидными и репеллентными свойствами в растениях семейства зонтичные (*Umbelliferae*) флоры Беларуси // Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства. 2014. Т. 2. № 7. С. 314–318. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/coderzhanie-veschestv-s-insektitsidnymi-i-repellentnymi-svoystvami-v-rasteniayah-semeystva-zontichnye-umbelliferae-flory-belarusi> (дата обращения: 30.07.2025). EDN: TBISQNH.
8. Лебедев Я.П., Баширова Р.М., Фархутдинов Р.Г. Липофильные соединения корней купыря лесного *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3–4. С. 75–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36293978> DOI: 10.31040/2222-8349-2018-4-3-75-79 (дата обращения: 23.07.2025). EDN: YLJUNV.
9. Харченко В.А., Молдован А.И., Голубкина Н.А., Гинс М.С., Шафигуллин Д.Р. Сравнительная оценка содержания некоторых биологически активных соединений в лесном купыре *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. и садовом кервеле *Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm // Овощи России. 2020. № 5. С. 81–87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44156488> DOI: 10.18619/2072-9146-2020-5-81-87 (дата обращения: 23.07.2025).
10. Карпунин М.Ю. Температурный режим сушки лекарственных растений // Вестник биотехнологии. 2017. № 2 (12). С. 12. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29656399_75034615.pdf (дата обращения: 22.07.2025). EDN: YYZGDH.
11. Дубровина И.А. Особенности профилейного распределения и запасы биогенных элементов в осушенных торфяных почвах // Трансформация экосистем. 2023. Т. 6. № 2. С. 49–63. DOI: 10.23859/estr-220601.
12. Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. К вопросу о структуре лугового растительного сообщества // Ботанический журнал. 2011. Т. 96. № 1. С. 3–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16448126> (дата обращения: 22.07.2025).
13. Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Артемкина Н.А. Влияние ели на кислотность и содержание элементов питания в почвах северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1355–1367. DOI: 10.7868/S0032180X16110071.
14. Федорец Н.Г., Медведева М.В. Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 96 с. ISBN 5-9274-0161-9.
15. Ипатов В.С., Журавлева Е.Н., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. Фитогенное поле *Picea abies*, *P. obovata* (Pinaceae) // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 4. С. 558–568. EDN: OIFMWN.

СТАТЬЯ

УДК 614.2(575.2)

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ЗУБНЫМИ ВРАЧАМИ В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ: ДИНАМИКА И КАДРОВЫЕ ВЫЗОВЫ

Кыдыкбаева Н.Ж., Маратова А.М.

*Кыргызский государственный медицинский институт переподготовки
и повышения квалификации имени С.Б. Даниярова, Бишкек,
e-mail: kydykbaeva2006@gmail.com*

Цель исследования – оценить динамику обеспеченности населения зубными врачами в разрезе регионов за 2018–2023 гг., выявить кадровые диспропорции и определить основные вызовы и направления совершенствования кадровой политики в сфере стоматологической помощи. Использованы официальные статистические данные по всем регионам страны, проведено сравнение по абсолютному числу специалистов и уровню обеспеченности на 10 тыс. населения. Особое внимание уделено территориальным диспропорциям и устойчивости кадрового потенциала в различных административных единицах. Результаты анализа выявили устойчивый рост численности зубных врачей в целом по республике, при этом сохраняются значительные различия между регионами. Наиболее высокие показатели обеспеченности зубными врачами зафиксированы в Иссык-Кульской и Нарынской областях, тогда как в Бишкеке и Оше наблюдается крайне низкая укомплектованность специалистами среднего звена. Рассмотрены возможные причины выявленных дисбалансов и предложены направления совершенствования кадровой политики стоматологической службы страны. Зубные врачи, как специалисты среднего звена, играют ключевую роль в профилактике и лечении неосложненных стоматологических заболеваний. Недостаточная численность и неравномерное распределение этих кадров ограничивает доступность первичной стоматологической помощи, особенно в сельских и отдаленных областях страны.

Ключевые слова: стоматологическая помощь, кадровая обеспеченность, зубные врачи, специалисты среднего звена, региональный дисбаланс, темпы прироста и убыли

AVAILABILITY OF DENTAL THERAPIST IN THE KYRGYZ REPUBLIC: DYNAMICS AND STAFFING CHALLENGES

Kydykbaeva N.Zh., Maratova A.M.

*Kyrgyz State Medical Institute for Retraining and Advanced Training
named after S.B. Daniyarov, Bishkek, e-mail: kydykbaeva2006@gmail.com*

The aim of the study is to assess the dynamics of the provision of the population with dental therapist by regions for the period 2018–2023, identify personnel imbalances and determine the main challenges and areas for improving personnel policy in the field of dental care. Official statistics for all regions of the country were used, a comparison was made by the absolute number of specialists and the level of provision per 10,000 population. Particular attention is paid to territorial disparities and the sustainability of human resources in various administrative units. The results of the analysis revealed a steady increase in the number of dental therapist in the republic as a whole, while significant differences between regions remain. The highest rates of provision with dental therapist were recorded in the Issyk-Kul and Naryn regions, while in the cities of Bishkek and Osh there is an extremely low staffing of mid-level specialists. Possible reasons for the identified imbalances are considered and directions for improving the personnel policy of the country's dental service are proposed. Dental therapist, as mid-level specialists, play a key role in the prevention and treatment of uncomplicated dental diseases. Insufficient numbers and uneven distribution of these personnel limit the availability of primary dental care, especially in rural and remote areas of the country.

Keywords: dental care, dental therapist, mid-level specialists, regional imbalance, growth and decline rates

Введение

Эффективное управление кадровыми ресурсами здравоохранения (КРЗ) является ключевым элементом обеспечения качества медицинской помощи и эффективного функционирования системы здравоохранения. Планирование КРЗ играет важную роль в достижении целей устойчивого развития, определенных в рамках международных инициатив, таких как Цели развития тысячелетия и Цели устойчивого раз-

вития, в частности, в сфере здравоохранения. В связи с этим мировые сообщества, включая такие организации, как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Организация Объединенных Наций (ООН), разрабатывают различные инструменты и методики, направленные на поддержку и внедрение эффективных систем кадрового планирования, которые могут быть адаптированы и использованы правительствами разных стран [1–3].

Роль кадрового планирования (КП) заключается в обеспечении сбалансированности предложения и спроса на медицинские кадры – гарантии наличия достаточного, но не избыточного числа квалифицированных специалистов в нужных местах и в нужное время для удовлетворения потребностей в медицинских услугах. Это важно как для устойчивого функционирования системы здравоохранения в целом, так и для обеспечения доступности и качества медицинской помощи для населения [4–6].

Дисбаланс между имеющимися кадровыми ресурсами и потребностями населения в медицинских услугах – важная проблема, характерная для систем здравоохранения как в развивающихся, так и в развитых странах. Однако особенно остро она проявляется в развивающихся странах, где проблемы кадрового обеспечения обусловлены недостаточностью финансовых ресурсов, а также отсутствием комплексной кадровой политики и механизмов привлечения высококвалифицированных специалистов. В таких странах, как правило, наблюдается дефицит кадров, что приводит к снижению качества медицинских услуг, дефициту рабочих мест, а также срыву срока оказания специализированной помощи [7–9].

Основными проблемами, с которыми сталкиваются страны в процессе кадрового планирования, являются: недостаток точных и актуальных данных о потребностях в медицинских кадрах [10, 11], несогласованность действий в области кадрового планирования, а также отсутствие политической и организационной поддержки этой сферы. В таких условиях часто применяется более простое, но недостаточно эффективное регулирование кадрового состава через ежегодные корректировки штатных расписаний и стандартов численности персонала, что приводит к недостаточной гибкости в обеспечении потребностей здравоохранения [12].

На сегодняшний день в Кыргызской Республике (КР) оказание стоматологической помощи осуществляется как в государственном, так и в частном секторах здравоохранения, причем основная часть населения получает стоматологические услуги в государственных стоматологических поликлиниках и в стоматологических отделениях, кабинетах организаций здравоохранения первичного уровня. Вопросы кадрового обеспечения в стоматологии, нормирования труда, учета и отчетности остаются актуальными для системы здравоохранения страны. В условиях дефицита и текучести квалифицированных кадров из государственной сети

неизбежно возникнет проблема кадрового обеспечения, которое оказывает непосредственное влияние на уровни доступности и качества оказываемых медицинских услуг населению [13]. В Кыргызской Республике стоматологическая помощь в государственном секторе традиционно оказывается двумя категориями специалистов: врач-стоматологи – специалисты с высшим медицинским образованием (диплом врача, последипломная подготовка) и зубные врачи – специалисты со средним медицинским (специальным) образованием (медицинские колледжи). Такое разграничение закреплено в национальной статистической отчетности. Официальный учет кадров ведется по форме государственного статистического сборника «Здоровье населения и деятельность организаций здравоохранения Кыргызской Республики» центра электронного здравоохранения при министерстве здравоохранения Кыргызской Республики (ЦЭЗ при МЗ КР) [14]. В связи с этим использование термина «зубные врачи» является корректным и отражает действующую национальную классификацию специалистов. Более того, именно наличие отдельного статистического учета данной категории кадров предопределило постановку цели настоящего исследования

Цель исследования – оценить динамику обеспеченности населения зубными врачами в разрезе регионов за 2018–2023 гг., выявить кадровые диспропорции и определить основные вызовы и направления совершенствования кадровой политики в сфере стоматологической помощи.

Материалы и методы исследования

Базой исследования стали сборники «Здоровье населения и деятельность организаций здравоохранения Кыргызской Республики» за период с 2018 по 2023 г. ЦЭЗ при МЗ КР [14]. Выбор периода с 2018 по 2023 г. обусловлен доступностью и валидностью официальных данных. В связи с этим для проведения анализа была логично выбрана шестилетняя динамика (2018–2023 гг.), которая позволяет оценить изменения кадрового обеспечения стоматологической помощи за репрезентативный и заверченный период времени.

В исследовании использовались аналитический метод – для выявления общих тенденций обеспеченности населения зубными врачами; сравнительный метод – для оценки межрегиональных различий и динамики за исследуемый период; статистический метод – для расчета средних значений, темпов прироста и снижения, а также построения динамических рядов.

Результаты исследования и их обсуждение

На национальном (республиканском) уровне число зубных врачей стабильно выросло с 620 в 2018 г. до 721 в 2023 г., темп прироста: +11%. Однако показатель обеспеченности на 10 тыс. населения остается в пределах 1,0, за исключением небольшого снижения в 2021 г. (0,9). Это свидетельствует о том, что прирост числа специалистов идет вровень с ростом численности населения (табл. 1, 2).

Баткенская область: отмечен рост количества зубных врачей с 50 до 76, обеспеченность увеличилась: с 1,0 до 1,3 в 2018–2023 гг. соответственно на 10 тыс. населения, темп прироста +30%. Значительное улучшение обеспеченности с учетом региональных особенностей, таких как географическая отдаленность и плотность населения.

По Джалал-Абадской области в указанные периоды произошел существенный рост абсолютного количества зубных врачей с 112 до 195, обеспеченность с 0,9 до 1,3, темп прироста +44%. Максимальный прирост для данной области в разрезе регионов, уверенная положительная динамика.

Иссык-Кульская область: снижение количества с 136 до 126 зубных врачей, обеспеченность упала с 2,8 до 2,3 за все годы, темп убыли -18%. Несмотря на снижение, коэффициент обеспеченности остается самым высоким по стране.

В Нарынской области незначительный рост с 43 до 51 врача, коэффициент обеспеченности стабилен и даже вырос

от 1,5 в 2018 г. до 1,6 в 2023 г., темп прироста составил +7%, что приравнивается к обеспеченности выше средней по стране и относительно устойчивому кадровому обеспечению в разрезе регионов.

По Ошской области также отмечен незначительный рост абсолютного количества зубных врачей с 143 в 2018 г. до 146 в 2023 г., относительно стабильные показатели в 2018 г. 1,1, а в 2023 г. – 1,0, темп убыли -9%. Небольшое снижение, колебания вокруг среднего уровня ~1,0 зубной врач на 10 тыс. населения.

Таласская область: незначительный рост числа врачей с 23 до 26 врачей, обеспеченность составила 0,7 в 2018 г. и 0,9 в 2023 г., темп прироста +29%. Прибавка значительная, но уровень обеспеченности остается ниже среднего.

По Чуйской области отмечены незначительные колебания в сторону уменьшения абсолютного числа зубных врачей с 93 до 90, несмотря на близость к столице обеспеченность в 2018 г. составляла 1,0 и с 2023 г. остается на уровне 0,8, темп убыли -20%, то есть имеет место отчетливая тенденция к снижению.

По г. Бишкек число зубных врачей за все годы стабильно 9 до 8, в 2018 – 0,8, в 2023 – 0,1, темп убыли -88% (в резком минусе). Критическое падение обеспеченности. В г. Ош существенное сокращение количества зубных врачей с 16 до 1. Обеспеченность в 2018 г. составляла 0,5, а в 2023 г. 0,01, темп убыли -80%. Один из худших показателей по стране, динамика отрицательная.

Таблица 1

Динамика обеспеченности зубными врачами (2018–2023 гг.)

Регионы	Зубные врачи					
	Абсолютное число / на 10 тыс. населения					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кыргызская Республика	620/1,0	639/1,0	633/1,0	618/0,9	698/1,0	721/1,0
Баткенская область	50/1,0	53/1,0	56/1,0	64/1,1	76/1,3	76/1,3
Джалал-Абадская область	112/0,9	125/1,0	138/1,1	140/1,1	171/1,3	195/1,3
Иссык-Кульская область	136/2,8	143/2,9	132/2,6	128/2,5	135/2,5	126/2,3
Нарынская область	43/1,5	42/1,5	44/1,5	43/1,5	50/1,6	51/1,6
Ошская область	143/1,1	144/1,1	129/0,9	127/0,9	141/1,0	146/1,0
Таласская область	23/0,9	23/0,9	21/0,8	20/0,7	25/0,9	26/0,9
Чуйская область	93/1,0	81/0,8	88/0,9	76/0,8	89/0,8	90/0,8
г. Бишкек	9/0,1	11/0,1	11/0,1	9/0,1	8/0,1	8/0,1
г. Ош	10/0,3	16/0,5	14/0,4	10/0,1	1/0,01	1/0,01

Источник: данные приведены полностью из официального сборника «Здоровье населения и деятельность организаций здравоохранения Кыргызской Республики» ЦЭЗ при МЗ КР [14].

Таблица 2

Ранжирование регионов (2018–2023 гг.)

Ранг	Регион	2018	2023	Темп прироста/убыли (%)	Средний коэффициент
1	Иссык-Кульская область	2,8	2,3	-18 %	~2,63
2	Нарынская область	1,5	1,6	+7 %	~1,53
3	Баткенская область	1,0	1,3	+30 %	~1,12
4	Джалал-Абадская область	0,9	1,3	+44 %	~1,10
5	Кыргызская Республика	1,0	1,0	–	~0,98
6	Ошская область	1,1	1,0	-9 %	~0,88
7	Чуйская область	1,0	0,8	-20 %	~0,85
8	Таласская область	0,7	0,9	+29 %	~0,83
9	г. Бишкек	0,8	0,1	-88 %	~0,42
10	г. Ош	0,5	0,1	-80 %	~0,25

Источник: составлено авторами на основе сборника «Здоровье населения и деятельность организаций здравоохранения Кыргызской Республики» ЦЭЗ при МЗ КР [14].

В основу анализа результатов ранжирования регионов положены как исходные значения на начало и конец периода, так и динамика изменений, рассчитанная через абсолютные и относительные показатели. Для сопоставимости дополнительно приведен средний коэффициент обеспеченности за 6 лет (табл. 2).

Лидирующую позицию в рейтинге занимает Иссык-Кульская область, где уровень обеспеченности традиционно превышает среднереспубликанский показатель ~2,63. Однако, несмотря на устойчивое лидерство, отмечается снижение значений на 18 %, что указывает на негативную тенденцию в кадровом составе региона. Второе место занимает Нарынская область, где зафиксирован небольшой рост (+7 %), что свидетельствует о сохранении стабильной кадровой ситуации (~1,53). На третьем месте расположилась Баткенская область, где обеспеченность увеличилась на 30 %, что можно расценивать как позитивную динамику, хотя абсолютные показатели остаются относительно низкими (~1,12). Наибольший рост обеспеченности зафиксирован в Джалал-Абадской области (+44 %), что позволило региону подняться в рейтинге (~1,10) и продемонстрировать положительные результаты кадровой политики. В то же время среднереспубликанский показатель в целом оставался на уровне 1,0 (~0,98), что отражает отсутствие заметных изменений в обеспеченности на национальном уровне. Снижение обеспеченности наблюдается в Ошской и Чуйской областях, где показатели уменьшились на 9 % (~0,88) и 20 % (~0,85) соответственно, что требует принятия мер

для стабилизации кадрового потенциала. Таласская область, несмотря на невысокие исходные значения, продемонстрировала прирост на 29 %, что указывает на позитивные сдвиги, но регион все еще остается среди низко обеспеченных в региональном разрезе с коэффициентом ~0,83.

Наиболее тревожная ситуация отмечается в городах республиканского значения, так анализ данных по Бишкеку и Ошу показал, что в этих городах резкое снижение численности зубных врачей связано не столько с естественной убылью кадров или же внешней миграцией стоматологов за рубеж, оттоком из государственной сети в частные клиники, сколько по факту с управленческими решениями руководителей стоматологических поликлиник за данные периоды. Оказалось, что без предварительного мониторинга и анализа потребностей населения были уволены (или попали под сокращение) специалисты среднего звена, то есть зубные врачи, и их места были укомплектованы молодыми врачами-стоматологами с высшим образованием. Так, в Бишкеке уровень обеспеченности снизился с 0,8 до 0,1 (-88 %), а в Оше – с 0,5 до 0,1 (-80 %), в результате получили критически низкие средние коэффициенты обеспеченности ~0,42 и ~0,25 соответственно. Это указывает на серьезный кадровый дефицит в крупных городах, где спрос на стоматологическую помощь традиционно наиболее высок. Формальным основанием сокращения или увольнения зубных врачей служил факт временной приостановки подготовки зубных врачей в медицинских колледжах и исключения данной специальности из перечня образовательных

программ, без учета общего количества уже дипломированных и работающих зубных врачей по республике.

Данное кадровое перераспределение привело к существенным негативным последствиям: в первую очередь к срыву программ первичной профилактики стоматологических заболеваний, традиционно реализуемых зубными врачами, которые имели опыт и навыки профилактической работы с населением. Приток молодых врачей-стоматологов, сосредоточенных преимущественно на лечебных мероприятиях, не смог компенсировать дефицит услуг на уровне первичной профилактики и программ государственных гарантий. И, как оказалось на практике, отсутствие системного подхода к кадровой политике в условиях ограниченных ресурсов привело к усугублению существующего дисбаланса и риску дальнейшего ухудшения показателей стоматологического здоровья населения в указанных городах на первичном уровне здравоохранения. По международным стандартам зубной врач и врач-стоматолог рассматриваются как единая команда, и только их слаженная работа в тандеме позволит достичь устойчивых успехов в реализации национальных программ по укреплению стоматологического здоровья населения.

Таким образом, анализ демонстрирует наличие существенных межрегиональных диспропорций в обеспеченности зубными врачами. Если в отдельных областях фиксируются умеренные темпы роста, то в крупных городах наблюдается резкое падение показателей, что может негативно сказаться на доступности стоматологической помощи для населения.

Полученные данные подчеркивают необходимость территориального перераспределения кадровых ресурсов, усиления механизмов планирования и стимулирования стоматологических специалистов для укомплектования кадров в дефицитных зонах. Отмеченный дисбаланс связан с прекращением подготовки зубных врачей в системе среднего специального образования после 2018 г. и низкой привлекательностью работы в отдаленных регионах. Наблюдается явная концентрация кадров в определенных областях при кадровом дефиците в крупных городах, что парадоксально для урбанизированных территорий.

Заключение

Проведенный анализ обеспеченности зубными врачами за 2018–2023 гг. выявил значительные различия в уровне кадрового обеспечения между регионами. Наиболее благополучными остаются Иссык-Кульская

и Нарынская области, где обеспеченность стабильно превышает среднереспубликанские значения. Вместе с тем сохраняется острый дефицит специалистов среднего звена в крупнейших городах страны – Бишкеке и Оше, прежде всего за счет комплектации врачами-стоматологами стоматологических поликлиник, однако это вызывает обеспокоенность с точки зрения всеобщего охвата прикрепленного населения и полноценной реализации программ государственных гарантий на первичном уровне здравоохранения для обеспечения доступности и качества стоматологической помощи в условиях высокой плотности населения.

Положительная динамика в ряде областей: Джалал-Абадской, Баткенской, Таласской – указывает на успехи в кадровом укреплении, однако это локальные улучшения, не компенсирующие общую территориальную диспропорцию. Негативные темпы снижения количества зубных врачей в Чуйской области и особенно в городах республиканского подчинения требуют срочных управленческих решений на уровне Министерства здравоохранения.

Для устранения выявленных проблем необходима разработка государственной кадровой стратегии, предусматривающей:

- разработку региональных программ кадрового стимулирования, пересмотр политики распределения ресурсов между специалистами высшего и среднего звена с учетом реальной потребности;
- внедрения нормативов планирования кадров в зависимости от демографической структуры и заболеваемости;
- усиления привлекательности государственной службы с целью уменьшения оттока в частные клиники для стоматологов и зубных врачей в городах и стимулирующих мер для уязвимых территорий, повышение привлекательности работы в сельских и малонаселенных районах и областях.
- оптимизацию отчетности и мониторинга по фактическому месту работы специалистов, усиления взаимодействия с образовательными учреждениями по целевой подготовке кадров.

В целом, несмотря на общий рост числа специалистов со средним специальным образованием (зубных врачей), региональные различия требуют внимания и возможного перераспределения ресурсов. Результаты данного исследования, надеемся, будут основой для принятия обоснованных решений в области стратегического развития и планирования кадровой политики стоматологической службы в республике, так как устранение кадровых вызовов в стоматологии яв-

ляется ключевым условием для повышения доступности и качества стоматологической помощи населению.

Список литературы

1. Омеляновский В.В., Безденежных Т.П., Алхасов Т.Г., Лукьянцева Д.В. Международный опыт планирования кадровых ресурсов здравоохранения // Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2019. № 3. С. 32–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mezhdunarodnyy-opyt-planirovaniya-kadrovyyh-resurov-zdravoohraneniya/viewer> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.31556/2219-0678.2019.37.3.032-045.
2. World Health Assembly. Resolution WHA69.19. Global strategy on human resources for health: Workforce 2030. Geneva: WHO, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA69/A69_R19-en.pdf (дата обращения: 15.07.2025).
3. World Health Organization. Global strategy on human resources for health: Workforce 2030. Geneva: WHO, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/250368/9789241511131-eng.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
4. World Health Organization. National health workforce accounts: a handbook. Geneva: WHO, 2017. С. 4–5. [Электронный ресурс]. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/259360/9789241513111-eng.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
5. Lopes M.A., Almeida Á.S., Almada-Lobo B. Handling healthcare workforce planning with care: where do we stand? // Human Resources for Health. 2015. Vol. 13, Is. 38. DOI: 10.1186/S12960-015-0028-0.
6. Kroezen M., Van Hoegaerden M., Batenburg R. The Joint Action on Health Workforce Planning and Forecasting: Results of a European programme to improve health workforce policies // Health Policy. 2018. Vol. 122, Is. 2. P. 87–93. DOI: 10.1016/j.healthpol.2017.12.002.
7. Koppelman J., Singer-Cohen R.A. Workforce Strategy for Reducing Oral Health Disparities: Dental Therapists // American Journal of Public Health. 2017. Vol. 107, Suppl. 1. P. S13–S17. DOI: 10.2105/AJPH.2017.303747.
8. Gallagher J.E., Mattos Savage G.C., Crummey S.C., Sabbah W., Varenne B., Makino Y. Oral Health Workforce in Africa: A Scarce Resource. // Int J Environ Res Public Health. 2023. Vol. 28, Is. 20 (3). P. 2328. DOI: 10.3390/ijerph20032328.
9. Balasubramanian M., Hasan A., Ganbavale S., Alolayan A., Gallagher J.E. Planning the future oral health workforce: a rapid review of supply, demand and need models, data sources and skill mix considerations // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, Is. 6. Article 2891. DOI: 10.3390/ijerph18062891.
10. Evans D., Mills I., Burns L., Bryce M., Hanks S. The dental workforce recruitment and retention crisis in the UK // Br Dent J. 2023. Vol. 234, Is. 8. P. 573–577. DOI: 10.1038/s41415-023-5737-5.
11. Jip Janssen, Ave Pöld, Md Monirul Islam, Orsolya Németh, Jostein Grytten, Noel Woods & Stefan Listl. How to ensure an appropriate oral health workforce? Modelling future scenarios for the Netherlands // Human Resources for Health. 2024. VOL. 22. Art. 73. DOI: 10.1186/s12960-024-00957-2.
12. Birch S., Ahern S., Brocklehurst P. et al. Planning the oral health workforce: Time for innovation // Community Dent Oral Epidemiol. 2021. Vol. 49, Is. 1. P. 17–22. DOI: 10.1111/cdoe.12604.
13. Кыдыкбаева Н.Ж. Структурный и динамический анализ государственной сети, кадрового потенциала в контексте аккредитации в Кыргызской Республике // Научное обозрение. Медицинские науки. 2025. № 1. С. 29–33. DOI: 10.17513/srms.1431.
14. Здоровье населения и здравоохранение в Кыргызской Республике. [Электронный ресурс]. URL: <https://stat.gov.kg/ru/publications/sbornik-zdorove-naseleniya-i-zdravoohraneniye-v-kyrgyzskoj-respublike/> (дата обращения: 04.07.2025).

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

УДК 616.447-089.87

РОЛЬ ВИТАМИНА D В КОРРЕКЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО ОБМЕНА ПОСЛЕ ПАРАТИРЕОИДЭКТОМИИ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ ПОЗДНЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕРВИЧНОГО ГИПЕРПАРАТИРЕОЗА

^{1,2}Айзетулова Г.Р., ^{1,2}Осипов В.Ф., ²Балтримас В.С., ²Фролова А.С.

¹БУ «Республиканский клинический госпиталь для ветеранов войн» Министерства здравоохранения Чувашии, Чебоксары, e-mail: Daniyarchik2010@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары

Цель исследования – изучение роли витамина D в коррекции минерального обмена после паратиреоидэктомии на примере описания клинического случая поздней диагностики первичного гиперпаратиреоза. В статье представлен клинический случай пациентки 63 лет с остеопорозом. Больная длительное время наблюдалась по поводу рецидивирующих переломов (лучевой кости, голеностопного сустава) и прогрессирующего остеопороза, однако гиперпаратиреоз был верифицирован лишь через 20 лет от начала симптоматики. При поступлении выявлена выраженная гиперкальциемия, гипофосфатемия и значительное повышение паратгормона. Сцинтиграфия с однофотонной эмиссионной компьютерной томографией подтвердила наличие аденомы левой верхней паращитовидной железы размером 15×6×16 мм. После успешной паратиреоидэктомии с интраоперационным мониторингом паратгормона отмечена быстрая нормализация кальций-фосфорного обмена. В послеоперационном периоде пациентке назначен колекальциферол в дозе 2800 МЕ в сутки в течение 6 месяцев после операции. В течение 12 месяцев после операции зафиксировано статистически значимое увеличение минеральной плотности кости в поясничных позвонках и в шейке бедра. Таким образом, этот случай подчеркивает необходимость контроля уровня витамина D у пациентов с гиперпаратиреозом после оперативного вмешательства для оптимизации костного ремоделирования и снижения риска переломов.

Ключевые слова: первичный гиперпаратиреоз, паратиреоидэктомия, гипокальциемия, витамин-D-дефицит, минеральный обмен

THE ROLE OF VITAMIN D IN THE CORRECTION OF MINERAL METABOLISM AFTER PARATHYROIDECTOMY: A CLINICAL CASE OF LATE DIAGNOSIS OF PRIMARY HYPERPARATHYROIDISM

^{1,2}Ayzetullova G.R., ^{1,2}Osipov V.F., ²Baltrimas V.S., ²Frolova A.S.

¹Republican Clinical Hospital for War Veterans of the Ministry of Health of Chuvashia, Cheboksary, e-mail: Daniyarchik2010@mail.ru;

²Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

The aim of the study is to study the role of vitamin D in the correction of mineral metabolism after parathyroidectomy using the example of a description of a clinical case of late diagnosis of primary hyperparathyroidism. The article presents a clinical case of a 63-year-old patient with osteoporosis. The patient was observed for a long time for recurrent fractures (radius, ankle) and progressive osteoporosis, but hyperparathyroidism was verified only 20 years after the onset of symptoms. Upon admission, severe hypercalcemia, hypophosphatemia and a significant increase in parathyroid hormone were detected. Single-photon emission computed tomography scintigraphy confirmed the presence of a 15×6×16 mm adenoma of the left superior parathyroid gland. After successful parathyroid adenectomy with intraoperative monitoring of parathyroid hormone, rapid normalization of calcium-phosphorus metabolism was noted. In the postoperative period, the patient was prescribed colecalciferol at a dose of 2,800 IU per day for 6 months after surgery. Within 12 months after the operation, a significant increase in bone mineral density was recorded in the lumbar vertebrae and in the femoral neck. Thus, this case highlights the need to control vitamin D levels in patients with hyperparathyroidism after surgery to optimize bone remodeling and reduce the risk of fractures.

Keywords: primary hyperparathyroidism, parathyroidectomy, hypocalcemia, vitamin D deficiency, mineral metabolism

Введение

Первичный гиперпаратиреоз (ПГПТ) – распространенное эндокринное заболевание, характеризующееся избыточной автономной секрецией паратиреоидного гормона (паратгормона, ПТГ) одной или несколькими околощитовидными железами при верхне-нормальном или повышенном уровне кальция крови [1]. По этиологии гиперпаратиреоз (ГПТ) подразделяется на две

формы: первичный, связанный с непосредственным поражением околощитовидных желез (аденома, гиперплазия или карцинома), и вторичный (ВГПТ), который развивается как компенсаторная реакция на нарушения минерального обмена. У большей части пациентов в Российской Федерации гиперкальциемия диагностируется отсроченно, поскольку определение содержания кальция не входит в общетерапевтический

биохимический анализ крови. Это создает предпосылки для позднего выявления гиперпаратиреоза [2].

Особую медико-социальную значимость ПГПТ приобретает в связи с характерным возрастным распределением – пик заболеваемости приходится на наиболее активный трудоспособный период (30–60 лет). Женщины страдают данной патологией в 2–3 раза чаще, причем максимальная заболеваемость отмечается в постменопаузальном периоде. Такую закономерность можно объяснить комплексом факторов: эстроген-дефицитное состояние, ускоряющее костную резорбцию, более частые скрининговые обследования у женщин, возможное влияние гормонального фона на патогенез заболевания.

Паратиреоидэктомия (ПТЭ) – основной метод хирургического лечения ПГПТ. Преимуществом оперативного лечения являются в нормализации фосфорно-кальциевого обмена и устранении ассоциированных с гиперкальциемией симптомов, значимом улучшении состояния костной ткани и почек, сердечно-сосудистой системы и положительных изменениях когнитивных функций у абсолютного большинства прооперированных пациентов [3]. Как результат, ПТЭ приводит к улучшению качества жизни пациентов [4, 5].

Послеоперационный период требует особого внимания в связи с риском развития транзиторного гипопаратиреоза и дефицита витамина D. Ряд исследований показал, что заболевания костей, в том числе переломы и остеопороз, чаще встречаются у пациентов с дефицитом витамина D [6, 7]. После паратиреоидэктомии в случае недостатка витамина D развивается «синдром голодных костей» [8]. Предоперационное введение колекальциферола в течение 2 недель – 2 месяцев до ПТЭ снижает риск послеоперационной гипокальциемии у пациентов с ПГПТ в 2–3 раза [9, 10]. Кроме того, достаточный уровень витамина D способствует поддержанию нормальной концентрации фосфора и стимулирует костное ремоделирование [11].

Цель исследования – изучение роли витамина D в коррекции минерального обмена после паратиреоидэктомии на примере описания клинического случая поздней диагностики первичного гиперпаратиреоза.

Материалы и методы исследования

В 2025 г. было проведено ретроспективное исследование в бюджетном учреждении Чувашской Республики «Республиканский клинический госпиталь для ветеранов войн», была отобрана и проанализирована

на история болезни пациентки в возрасте 63 года после паратиреоидэктомии.

Результаты исследования и их обсуждение

Пациентка Д., 63 года, поступила 16.10.2023 г. в хирургическое отделение БУ «Республиканский клинический госпиталь для ветеранов войн» с жалобами на общую слабость, тянущие боли в поясничном отделе позвоночника, уменьшение роста на 2 см за 2 года, плаксивость, депрессию.

Из анамнестических данных известно, что пациентку с 2020 г. беспокоят боли в поясничном отделе позвоночника, по поводу чего неоднократно лечилась у неврологов. С 2003 г. было три перелома лучевой кости через каждые полгода, перелом области левого голеностопного сустава, сращение перелома заняло 6 месяцев. В 2020 г. был диагностирован остеопороз. Эндокринологом назначена медикаментозная терапия на основе золендроновой кислоты с целью коррекции остеопороза. У пациентки также есть сопутствующее заболевание: атеросклероз аорты, аортального клапана, митрального клапана; симптоматическая артериальная гипертензия 1 степени, контролируемая. Синдром соединительно-тканной дисплазии: пролапс митрального клапана 1 степени с митральной регургитацией 1 степени. Осложнения: ХСН 1 ст. ФК II, ФВ – 59%.

По данным лабораторных исследований при поступлении в анализе крови повышение паратгормона до 142 пмоль/л (1,06–6,89 пмоль/л), повышение уровня кальция до 3,2 ммоль/л (2,15–2,55 ммоль/л), ионизированного кальция крови до 1,6 ммоль/л (1,12–1,32 ммоль/л), снижение фосфора до 0,57 (0,81–1,45 ммоль/л), витамин D – 20,4 нг/мл (30–50 нг/мл).

По результатам КТ поясничного отдела позвоночника наблюдаются признаки остеопороза и деформирующего спондилеза поясничного отдела позвоночника с наличием заднелатерального пролапса межпозвоночного диска L2–L3, заднелатерального пролапса межпозвоночного диска L5–S1.

В ходе ультразвукового исследования щитовидной железы, выполненного в 2023 г., визуализированы на задней поверхности левой доли щитовидной железы два рядом расположенных округлых образования – неоднородных, гипозоногенных с элементами кистозной дегенерации, микрокальцинатами, контуры ровные, четкие, размер 15x16 мм, при цветовом доплеровском картировании смешанный кровоток.

При проведении скинтиграфии паращитовидных желез в тиреоидную фазу исследова-

дования было выявлено асимметричное накопление радиофармпрепарата в проекции верхней трети левой доли щитовидной железы. Сопоставление данных однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и компьютерной томографии позволило идентифицировать метаболически активное образование вытянутой линзовидной формы с четкими ровными контурами, локализующееся в пространстве между пищеводом и верхним полюсом левой доли щитовидной железы. Размеры образования составили 15×6×16 мм. Полученные данные соответствуют диагностическим критериям аденомы верхней паращитовидной железы слева.

Эндокринологом после диагностического поиска был выставлен диагноз: Первичный гиперпаратиреоз. Аденома паращитовидной железы слева. Для постановки диагноза ПГПТ использовались действующие клинические рекомендации Российской ассоциации эндокринологов, учитывая жалобы пациента, данные анамнеза, лабораторные показатели и результаты инструментальной диагностики.

После проведения комплексной предоперационной подготовки, включавшей нормализацию артериального давления и стабилизацию психоэмоционального состояния с применением седативных препаратов накануне операции, коррекция гиперкальциемии в условиях стационара осуществлена не была, 18.10.2023 выполнена паратиреоидэктомия. Учитывая солитарный характер поражения околощитовидной железы с четкой топической верификацией, методом выбора явилась селективная паратиреоидэктомия. Было удалено образование – линзовидной формы 15×6×16 мм, четко отграниченное, с ровными, гладкими краями, имеющее собственную капсулу, красновато-коричневого оттенка, мягко-эластичной консистенции, на разрезе – однородная паренхима (рис. 1). Данные электронно-микроскопического исследования подтвердили доброкачественную природу новообразования и его происхождение из главных клеток околощитовидных желез (рис. 2).

Во время операции проводился экспресс-анализ уровня паратгормона: забор 10 мл венозной крови выполняли шприцем с иглой 21G, после чего образец в течение 4 мин доставляли в лабораторию БУ РКГДВВ, где на анализаторе Cobase 411 проводили исследование, получая результат через 9 мин. Общее время от забора крови до получения данных не превышало 13–15 мин. Измеренный уровень паратгормона составил 7,91 пмоль/л.

По данным контрольного лабораторного обследования в раннем послеоперационном периоде отмечены следующие показатели: уровень ионизированного кальция составил 1,05 ммоль/л (1,12–1,32 ммоль/л), концентрация неорганического фосфора – 1,1 ммоль/л (0,81–1,45 ммоль/л), уровень паратгормона снизился до 7,3 пмоль/л (1,06–6,89 пмоль/л). Полученные лабораторные данные свидетельствуют о нормализации кальций-фосфорного обмена после проведенного хирургического вмешательства. Снижение уровня паратгормона до нормальных значений подтверждает радикальность выполненной паратиреоидэктомии.



Рис. 1. Макропрепарат – образование левой доли паращитовидной железы. Вид спереди
Источник: составлено авторами по данным материалов бюджетного учреждения Чувашской Республики «Республиканский клинический госпиталь для ветеранов войн»

В доле паращитовидной железы крупная аденома из главных клеток с умеренно хорошо выраженным полиморфизмом клеток, отеком в центре; на фоне паренхиматозного липоматоза и гиперплазии главных клеток.
24. Заключение: Аденома из главных клеток паращитовидной железы, на фоне паренхиматозного липоматоза, гиперплазии главных клеток в доле паращитовидной железы.

Рис. 2. Данные патологоанатомического исследования биопсийного (операционного) материала
Источник: составлено авторами по данным материалов БУ Чувашской Республики «Республиканский клинический госпиталь для ветеранов войн»

Динамика показателей минеральной плотности костей пациентки
(рентгеновская денситометрия)

Зона/Дата	17.10.2023		20.10.2024		Изменение МПК (%)
	Т-критерий	Z-критерий	Т-критерий	Z-критерий	
L1–L4	-2,1	-1,3	-1,6	-0,9	+6,6 %
Шейка бедренной кости	-2,4	-1,8	-1,7	-1,1	+9,8 %

Клиническое состояние пациентки при выписке оценивалось как удовлетворительное. Больная была выписана под динамическое наблюдение эндокринолога с рекомендацией регулярного мониторинга показателей кальций-фосфорного обмена. В послеоперационном периоде пациентке назначен колекальциферол в дозе 2800 МЕ в сутки в течение 6 месяцев после операции. Фармакотерапия проводилась с подбором индивидуальной дозы в интервале между насыщающей (4000 МЕ) и поддерживающей (2000 МЕ) с установлением оптимального среднего значения (2800 МЕ).

Пациентка осмотрена через 3, 6 и 12 месяцев после оперативного лечения. Состояние удовлетворительное, астеноневротических жалоб не предъявляет, боли в поясничном отделе позвоночника не беспокоят. Показатели фосфорно-кальциевого обмена крови, витамина D и паратормона в пределах нормальных значений. Через 3, 6, 12 месяцев соответственно: уровень ионизированного кальция составил 1,13/1,20/1,25 ммоль/л (1,12–1,32 ммоль/л), концентрация неорганического фосфора – 1,2/1,29/1,36 ммоль/л (0,81–1,45 ммоль/л), уровень паратормона – 6,75/5,0/2,6 пмоль/л (1,06–6,89 пмоль/л). По результатам денситометрии через год от 20.10.2024 наблюдается статистически значимое повышение минеральной плотности кости (МПК) в поясничных позвонках на 6,6%, в области шейки бедренной кости на 9,8% относительно предоперационных значений (таблица).

Представленный клинический случай демонстрирует типичное, но в то же время сложное течение ПГПТ, осложненного выраженными костными нарушениями и сопутствующей кардиоваскулярной патологией.

Особенностью данного случая является длительный диагностический поиск: с 2003 г. у пациентки отмечались повторные переломы, но только в 2020 г. был диагностирован остеопороз, а ПГПТ верифицирован лишь в 2023 г. Это подчеркивает важность раннего определения уровня кальция и паратормона у пациентов с рецидивирующими переломами и болями в костях [12].

УЗИ и скинтиграфия с ОФЭКТ/КТ позволили точно локализовать аденому па-

ращитовидной железы, что соответствует современным рекомендациям по топической диагностике ПГПТ. КТ позвоночника подтвердила наличие дегенеративно-дистрофических изменений, однако основной причиной болей, вероятно, был остеопороз, а не только остеохондроз.

Селективная паратиреоаденомэктомия с интраоперационным измерением паратормона (снижение с 142 до 7,91 пмоль/л) подтвердила радикальность вмешательства. Быстрое падение ПТГ (в течение 15 мин) является прогностическим маркером успешной операции. Гистологическое и электронно-микроскопическое исследование верифицировало аденому из главных клеток без признаков малигнизации.

Нормализация Ca^{2+} и ПТГ уже в раннем послеоперационном периоде свидетельствует об успешной коррекции гиперпаратиреоза. Назначение колекальциферола (2800 МЕ/сут) было обоснованным для профилактики «голодных костей» и дальнейшего улучшения МПК. J.-C. Souberbielle, F. Bienaimé, E. Cavalier, C. Cormier в своем исследовании выявили, что степень дефицита витамина D тесно сопряжена с тяжестью ПГПТ, пациенты с низким уровнем 25(ОН)D имеют более высокий риск развития тяжелой послеоперационной гипокальциемии и синдрома «голодных костей» [13].

Полученные авторами данные согласуются с результатами исследования Bilezikian, J.P. и S.J. Silverberg, подтверждающего рекомендуемое восполнение статуса витамина D в раннем послеоперационном периоде при обнаружении недостаточности/дефицита 25(ОН)D [14]. Проведенное исследование подчеркивает, что комплексная профилактика гипокальциемии и витамин-D-дефицита обеспечивает не только успешный хирургический результат, но и долгосрочное улучшение качества жизни.

Авторы систематически изучили изменения качества жизни у пациента с ПГПТ, проводя оценку как до оперативного вмешательства, так и в раннем послеоперационном периоде. Результаты исследования демонстрируют стойкий положительный эффект паратиреоидэктомии, сопровождающийся профилактикой гипокальциемии и дефици-

та витамина D. Отмечается значительное улучшение качества жизни и уменьшение клинических проявлений заболевания. Терапевтический эффект достигает клинической значимости к 3-му месяцу послеоперационного периода и сохраняется в отдаленные сроки наблюдения. Данный клинический случай иллюстрирует важность мультидисциплинарного подхода в диагностике и лечении ПГПТ, особенно у пациентов с осложненным течением.

Первичный гиперпаратиреоз следует исключать у всех пациентов с рецидивирующими переломами, необъяснимой гиперкальциемией, депрессией и астенией на фоне остеопороза. В исследовании S.K. Bhadada и соавт. показано, что у большинства (95%) пациентов с впервые выявленным ПГПТ наблюдались симптомы: слабость и утомляемость (58,7%), боли в костях (56%), почечнокаменная болезнь (31%), панкреатит (12,3%) и желчнокаменная болезнь (11%) [15].

Заключение

Первичный гиперпаратиреоз представляет собой сложную диагностическую задачу в клинической практике. Несмотря на значительные достижения в эндокринологии, заболевание продолжает характеризоваться низкой выявляемостью, что обусловлено как отсутствием патогномичных симптомов на ранних стадиях, так и недостаточной осведомленностью врачей первичного звена. В представленном клиническом случае была существенная задержка диагностики.

Современные стратегии профилактики гипокальциемии и витамин-D-дефицита после паратиреоидэктомии представляют собой важнейший компонент успешного послеоперационного ведения пациентов с первичным гиперпаратиреозом. Проведенный анализ клинического случая демонстрирует, что оптимальный подход должен основываться на трех ключевых принципах: ранней диагностике, персонализированной терапии и динамическом мониторинге.

Список литературы

1. Мокрышева Н.Г., Еремкина А.К., Мирная С.С., Крупинова Ю.А., Воронкова И.А., Ким И.В., Бельцевич Д.Г., Кузнецов Н.С., Пигарова Е.А., Рожинская Л.Я., Дегтярев М.В., Егшатын Л.В., Румянцев П.О., Андреева Е.Н., Анциферов М.Б., Маркина Н.В., Крюкова И.В., Каронова Т.Л., Лукьянов С.В., Слепцов И.В., Чагай Н.Б., Мельниченко Г.А., Дедов И.И. Клинические рекомендации по первичному гиперпаратиреозу, краткая версия // Проблемы эндокринологии. 2021. № 67 (4). С. 94–124. DOI: 10.14341/probl12801.
2. Jawaid I., Rajesh S. Hyperparathyroidism (primary) NICE guideline: diagnosis, assessment, and initial management // Br J Gen Pract. 2020. Jun 25. Vol. 70 (696). P. 362–363. DOI: 10.3399/bjgp20X710717.
3. Bilezikian J.P., Khan A.A., Silverberg S.J., Fuleihan G.E., Marcocci C., Minisola S., Perrier N., Sitges-Serra A., Thakker R.V., Guyatt G., Mannstadt M., Potts J.T., Clarke B.L., Brandi M.L. International Workshop on Primary Hyperparathyroidism. Evaluation and Management of Primary Hyperparathyroidism: Summary Statement and Guidelines from the Fifth International Workshop // J Bone Miner Res. 2022. Nov. Vol. 37 (11). P. 2293–2314. DOI: 10.1002/jbmr.4677.
4. Tzikos G., Chorti A., Evangelos S., Boura E., Manani C., Adamidou F., Tziatzios I., Zisi A., Economou F., Toulis K., Liakos I., Michalopoulos A., Papavramidis T. Quality of Life in Patients with Asymptomatic Primary Hyperparathyroidism After Parathyroidectomy: A 3-Year Longitudinal Study // EndocrPract. 2021. Jul. Vol. 27 (7). P. 716–722. DOI: 10.1016/j.epr.2021.01.003.
5. Ionova T.I., Buzanakov D.M., Chernikov R.A., Efremov S.M., Gladkova I.N., Nikitina T.P., Sleptsov I.V., Zolotoukhov A.V., Bubnov K.A., Skvortsov V.V., Vinogradova A.A., Rusakov V.F. Quality of life in patients with primary hyperparathyroidism before and after parathyroidectomy: long term single center experience // BMC EndocrDisord. 2023. Apr 21. Vol. 23 (1). P. 87. DOI: 10.1186/s12902-023-01344-z.
6. Bandeira F., Cusano N.E., Silva B.C., Cassibba S., Almeida C.B., Machado V.C., Bilezikian J.P. Bone disease in primary hyperparathyroidism // Arq Bras Endocrinol Metabol. 2014. Vol. 58 (5). P. 553–561. DOI: 10.1590/0004-2730000003381.
7. Бирик Е.Е., Еремкина А.К., Князева О.А., Мокрышева Н.Г. Спорадический первичный гиперпаратиреоз с множественной трансформацией околощитовидных желез // Проблемы эндокринологии. 2021. № 67 (6). С. 31–38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sporadicheskiy-pervichnyy-giperparatireoz-s-mnozhestvennoy-transformatsiy-okoloschitovidnyh-zhelez> (дата обращения: 29.07.2025).
8. Елфимова А.Р., Еремкина А.К., Реброва О.Ю., Ковалева Е.В., Мокрышева Н.Г. Ассоциация предоперационной терапии колекальциферолом и гипокальциемии после паратиреоидэктомии у больных с первичным гиперпаратиреозом // Проблемы эндокринологии. 2024. № 70 (1). С. 38–45. DOI: 10.14341/probl13324.
9. Govind K., Paruk I.M., Motala A.A. Characteristics, management and outcomes of primary hyperparathyroidism from 2009 to 2021: a single centre report from South Africa // BMC Endocr Disord. 2024. Apr 25. № 24 (1). С. 53. DOI: 10.1186/s12902-024-01583-8.
10. Давыдович М.Г., Павлов В.Н., Катаев В.А., Байков Д.Э., Насырова Л.А., Загидуллин А.А., Кашаев М.Ш., Габбасов А.Р. Гиперпаратиреоз: диагностика и лечение // Медицинский вестник Башкортостана. 2017. № 4 (70). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/giperparatireoz-diagnostika-i-lechenie> (дата обращения: 21.07.2025).
11. Рамазанов М.Е., Базарбекова Р.Б., Досанова А.К., Шерияздан Ж.С., Апбасова У.З., Казарян С.У., Шокебаев А.А., Бектаева И.С. Случай первичного гиперпаратиреоза // Вестник КазНМУ. 2021. № 3. С. 195–197. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sluchay-pervichnogo-giperparatireoza> (дата обращения: 23.07.2025).
12. Прокофьева Н.А., Макаров И.В., Галкин Р.А. Усовершенствование диагностики первичного гиперпаратиреоза // ТМБВ. 2021. № 24 (2). С. 104–108. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/usovershenstvovanie-diagnostiki-pervichnogo-giperparatireoza> (дата обращения: 28.07.2025).
13. Souberbielle J.-C., Bienaimé F., Cavalier E., Cormier C. Vitamin D and primary hyperparathyroidism (PHPT) // Ann Endocrinol (Paris). 2012. Vol. 73 (3). С. 165–169. DOI: 10.1016/j.ando.2012.04.008.
14. Bilezikian J.P. and Silverberg S.J. Normocalcemic primary hyperparathyroidism. Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia. 2010. Vol. 54 (2). P. 106–109. DOI: 10.1590/s0004-27302010000200004.
15. Bhadada S.K., Arya A.K., Mukhopadhyay S., Khadgawat R., Sukumar S., Lodha S., Singh D.N., Sathya A., Singh P., Bhansali A. Primary hyperparathyroidism: insights from the Indian PHPT registry // J Bone Miner Metab. 2018 Mar. Vol. 36 (2). P. 238–245. DOI: 10.1007/s00774-017-0833-8.

СТАТЬЯ

УДК 633.321(571.16)

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА УРОЖАЙНОСТЬ
И ПРОДУКТИВНОСТЬ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ
ПРИ ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА****Монгуш Л.Т.**

*Тувинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства филиал
ФГБУН «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН»,
Кызыл, e-mail: lilya.mongush.60@mail.ru*

Одним из эффективных методов повышения азотфиксации и урожайности многолетних бобовых трав является предпосевная инокуляция семян клубеньковыми бактериями. Целью исследования является оценка влияния инокуляции семян на формирование урожая и на продуктивность многолетних бобовых растений в степной зоне Республики Тыва. Исследования проведены на опытно-экспериментальном поле Тувинской НИИСХ в 2022-2024 гг. с инокуляцией семян многолетних трав микробиологическим препаратом Биоторфин-Б. Показано его влияние на линейный рост и на развитие симбиотического аппарата эспарцета, люцерны, донника. Установлено, что высота трав в вариантах с инокуляцией семян была выше контроля. Формирование азотфиксирующих клубеньков зависело от обеспеченности влагой растений в течение вегетационного сезона. Инокуляция семян Биоторфином-Б достоверно повысила урожайность зеленой массы многолетних трав. В первый год жизни трав отзывчивыми на обработку в условиях республики показали себя эспарцет и донник желтый. В первый год применения Биоторфина-Б наивысшая урожайность была достигнута у эспарцета (28,55 т/га, на 11,25 т/га больше, чем в контрольной группе) и донника желтого (18,52 т/га, превышение контроля на 8,1 т/га). На второй год лучшие показатели продемонстрировали люцерна и донник желтый. Наивысшую урожайность также сформировали люцерна с Биоторфином-Б (33,64 т/га) и донник желтый с Биоторфином-Б (33,48 т/га). Положительное действие обработки семян Биоторфином-Б выявлено при оценке продуктивности изучаемых многолетних трав. Сравнение средних значений продуктивности за 3 года показало, что вариант с обработкой превысил контрольный вариант у всех изучаемых трав.

Ключевые слова: эспарцет, люцерна, донник, Биоторфин-Б, инокуляция, урожайность, продуктивность

**STUDY OF THE INFLUENCE OF BIOLOGICAL PRODUCTS
ON THE YIELD AND PRODUCTIVITY OF PERENNIAL GRASSES
DURING SEED INOCULATION IN THE REPUBLIC OF TYVA****Mongush L.T.**

*Tuva Research Institute of Agriculture, branch of the Siberian Federal Scientific
Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl,
e-mail: lilya.mongush.60@mail.ru*

One of the effective methods of increasing nitrogen fixation and the yield of perennial legume grasses is the pre-sowing inoculation of seeds with nodule bacteria. Purpose of the study is to assess the effect of seed inoculation on the formation of yield and productivity of perennial legume plants in the steppe zone of the Republic Tuva. Research was conducted on the experimental field of the Tuvian SRIA in 2022-2024, with the inoculation of seeds of perennial grasses with the microbiological preparation Biotorfin-B. Its effect on the linear growth and development of the symbiotic apparatus of sainfoin, alfalfa, and sweet clover has been shown. It has been established that the height of the herbs in the inoculated seed variants was higher than in the control. Formation of nitrogen-fixing nodules depended on the moisture availability of the plants during the growing season. Inoculation of seeds with Biotorfin-B significantly increased the yield of green mass of perennial herbs. In the first year of the herbs' life, sainfoin and yellow sweet clover showed themselves to be responsive to treatment in the conditions of the republic. In the first year of using Biotorfin-B, the highest yield was achieved by sainfoin (28.55 t/ha, 11.25 t/ha more than in the control group) and yellow sweet clover (18.52 t/ha, exceeding the control by 8.1 t/ha). In the second year, the best indicators were demonstrated by alfalfa and yellow sweet clover. The highest yields were also achieved by alfalfa with Biotorfin-B (33.64 t/ha) and yellow sweet clover with Biotorfin-B (33.48 t/ha). Positive effect of Biotorfin-B seed treatment was observed in the assessment of the productivity of the studied perennial grasses. A comparison of the average productivity values over 3 years showed that the treated variant exceeded the control variant for all the studied grasses.

Keywords: sainfoin, alfalfa, sweet clover, Biotorfin-B, inoculation, yield, productivity

Введение

Основой ускоренного развития животноводства является не только формирование высокопродуктивного стада, но и создание в первую очередь прочной кормовой базы для обеспечения животноводства биологи-

чески полноценными кормами [1, с. 143]. Интенсификация кормопроизводства на современном этапе развития сельского хозяйства в республике предполагает разработку наиболее эффективных приемов возделывания многолетних трав для получения

высокоурожайных культур и качественных кормов [2, с. 20]. Решением этой проблемы может стать использование многолетних бобовых трав, которые выполняют три важные функции: используют природную способность фиксировать азот из воздуха, обеспечивают высокие урожаи и улучшают плодородие почвы, а также дают ценные энергонасыщенные корма для животных [3-5]. Возделывание бобовых трав позволяет правильно сочетать азот минеральных удобрений и биологический азот, уменьшить риски негативного воздействия на окружающую среду вследствие денитрификации и вымывания [6, с. 65]. Многолетние бобовые травы производят больше дешевого белка благодаря азотфиксации воздуха [7-9].

По мнению многих авторов, одним из эффективных методов повышения азотфиксации и урожайности многолетних бобовых трав является предпосевная инокуляция семян клубеньковыми бактериями. Использование азотсодержащих инокулянтов увеличивает урожайность на 25–30%, повышает содержание высококачественного белка в кормах на 1,2%, способствует экономии азотных удобрений (50–200 кг/га), позволяет оставлять на поле растительные остатки, обогащенные азотом, и повы-

шает доступность азота для растений. Также это повышает устойчивость растений к засухе и экстремальным температурам [10; 11]. Способность многолетних бобовых трав фиксировать атмосферный азот зависит как от биологических особенностей вида, так и от условий возделывания [12; 13]. Активное формирование клубеньковых бактерий происходит при оптимальной влажности до 80% и температуре почвы 20–26 °С. [14]. Научные исследования, направленные на мобилизацию азота воздуха многолетними бобовыми травами, имеют важное теоретическое и практическое значение для развития сельского хозяйства республики.

Целью исследования является оценка влияния инокуляции семян на формирование урожая и на продуктивность многолетних бобовых растений в степной зоне Республики Тыва.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на опытно-экспериментальном поле Тувинского НИИСХ. Объекты исследований – многолетние бобовые травы: люцерна, эспарцет и донник желтый. Посев многолетних трав проведен в 2022 и в 2023 годах.

Таблица 1

Количество осадков за вегетационный сезон 2022-2024 гг., мм

Месяцы		2022 г.	2023 г.	2024 г.	Средние многолетние
Апрель	Сумма за месяц	11,8	83,9	33,7	24
Май	I	5,9	4,0	4,6	10
	II	0,6	24,0	1,5	8
	III	6,2	0,5	6,6	11
	Сумма за месяц	12,7	28,5	12,7	29
Июнь	I	19,5	1,3	4,3	13
	II	17	2,0	17,6	16
	III	4,7	4,4	-	19
	Сумма за месяц	41,2	7,7	21,9	48
Июль	I	5,8	32,9	2,0	20
	II	40,8	20,8	25,8	30
	III	27,8	72,3	1,7	23
	Сумма за месяц	74,4	126,0	29,5	73
Август	I	11,0	34,3	21,1	25
	II	12,8	5,4	11,9	16
	III	2,9	2,4	6,3	27
	Сумма за месяц	26,7	42,1	39,3	68
Сумма за сезон		166,8	288,2	137,1	242

Примечание: составлено по данным Сосновской метеостанции.

Таблица 2

Продуктивная влага, мм

Слой почвы, см	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
	29.05	26.05	28.05	25.08	20.08	20.08
0-10	10,05	14,55	13,05	11,05	12,55	14,05
10-20	13,15	15,75	13,15	6,15	13,65	13,15
20-30	11,68	13,78	9,68	7,68	8,68	11,32
30-40	19,31	18,11	10,31	9,31	10,31	10,16
40-50	15,31	17,71	12,26	7,31	10,31	9,68
50-60	20,26	11,31	12,16	9,26	12,76	8,31
60-70	23,16	8,66	13,16	4,16	13,16	8,26
70-80	20,42	8,89	10,16	7,42	8,42	7,31
80-90	13,42	7,57	8,42	0,42	10,42	6,44
90-100	15,6	6,9	6,6	0,60	9,6	4,42
Сумма	162,56	123,23	96,79	63,36	109,86	93,1

Предпосевная обработка почвы проводилась согласно общепринятой методике. Опыт однофакторный. Повторность четырехкратная, вариантов 6, количество делянок 24. Размещение вариантов систематическое, площадь учетной делянки 36 м². Предшественник – черный пар. Предпосевная обработка семян многолетних бобовых трав Биоторфином-Б проводилась полусухим способом. Наблюдения и учёт проводили на всех этапах изучения согласно методике опытных работ на сенокосах [15]. Лабораторные исследования химического состава и питательности кормов проводились в ФГБУ ГСАС «Тувинская». Статистическая обработка проведена с помощью программы Snedecor V4. Метеорологические условия представлены по данным метеостанции Сосновка Тандинского кожууна Республики Тыва.

Годы исследований характеризовались разнообразием и неравномерным распределением атмосферных осадков в течение вегетационного периода (табл. 1).

В 2022 году наблюдался значительный дефицит осадков в течение вегетационного периода, составивший 75,2 мм по сравнению с многолетней нормой. Наиболее критичным периодом с точки зрения влагообеспеченности была третья декада июня и первая декада июля. В 2023 году, напротив, был положительный баланс осадков, превышающий средние многолетние значения на 46,2 мм, что создало благоприятные условия для вегетации. 2024 год характеризовался выраженной засушливостью на всем протяжении вегетационного периода, сезонная сумма осадков составила 137,1 мм, что на 104,9 мм меньше многолетней среднемесячной нормы.

Урожайность растений во многом зависит от весенних запасов влаги. В мае 2022 года запас влаги в метровом слое оцени-

вался как высокий (162,56 мм), в августе снизился в 2,5 раза. В мае 2023 года содержание продуктивной влаги составляло 123,23 мм, что по шкале оценки являлось хорошим, во время уборки – 109,86 мм (среднее). Наименьшее количество запасов влаги отмечено в 2024 году: в начале вегетационного сезона содержание влаги низкое – 96,79 мм, в 1,7 раза ниже, чем в 2022 г (табл. 2).

Результаты исследования и их обсуждение

Показателем, характеризующим значимость возделываемой культуры, является ее урожайность. Урожайность многолетних трав за годы исследований отличалась в зависимости от влагообеспеченности. 2023 год был самым увлажненным, поэтому травы 1-го года сформировали относительно высокий урожай по сравнению с предыдущим годом. Засушливые погодные условия отрицательно повлияли на формирование зеленой массы многолетних трав, и в опыте, заложенном в 2022 году, урожайность изучаемых трав в первый год жизни была невысокой. Наибольшую зеленую массу сформировал вариант эспарцет+Биоторфин-Б (1,29 т/га) и донник желтый+Биоторфин-Б (1,21 т/га) (табл. 3).

В 2023 году, на второй год вегетации трав, обильные осадки способствовали хорошему развитию многолетних трав, что привело к увеличению урожайности зеленой массы. Максимальная урожайность была достигнута при использовании Биоторфина-Б с люцерной (33,64 т/га) и донником желтым (33,48 т/га). В опыте, заложенном в 2023 году, наибольший урожай в первый год сформировал эспарцет с Биоторфином-Б – 28,55 т/га, что выше контроля на 11,25 т/га, и донник желтый с Биоторфином-Б – 18,52 т/га, превысивший контроль на 8,1 т/га.

Таблица 3

Урожайность зеленой массы многолетних трав за 2022-2024 гг., т/га

Вариант опыта	Урожайность, т/га					
	2022, 1-й год жизни	2023, 2-й год жизни	Сумма за 2 года	2023, 1-й год жизни	2024, 2-й год жизни	Сумма за 2 года
Люцерна (контроль)	0,57	18,36	18,93	9,58	6,72	16,3
Люцерна+Биоторфин – Б	0,55	33,64	34,19	11,05	6,90	17,95
НСР ₀₅	0,18	3,51	-	0,39	1,74	-
Эспарцет (контроль)	0,63	25,48	26,11	17,30	10,34	27,64
Эспарцет+Биоторфин – Б	1,29	31,52	32,81	28,55	12,10	40,65
НСР ₀₅	0,25	2,35	-	0,63	7,75	-
Донник желтый (контроль)	1,09	29,16	30,25	10,4	13,13	23,53
Донник желтый +Биоторфин – Б	1,21	33,48	34,69	18,52	15,28	33,8
НСР ₀₅	0,42	1,23	-	0,24	3,23	-

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Во второй год жизни трав сравнение вариантов с Биоторфином-Б и без него показало, что урожайность варианта с инокуляцией семян у донника желтого достоверно превысила контроль на 2,15 т/га. Прибавка зеленой массы у донника под влиянием применения Биоторфина-Б составила 16,4%.

На остальных вариантах значимой разницы не отмечено.

На посевах 2022 года по суммарной урожайности за 2 года прибавка от применения Биоторфина-Б составила у люцерны 80,6%, или 15,26 т/га, у эспарцета – 25,6%, или 6,70 т/га, у донника – 14,7%, или 4,44 т/га.

Таблица 4

Продуктивность многолетних трав за 2022-2024 гг.

Вариант испытаний	Сухое вещество, т/га	Кормовые единицы, тыс.	Обменная энергия, МДж/га	Переваримый протеин, т/га
2022 г.				
Люцерна (контроль)	0,36	0,33	4,78	5,49
Люцерна+Биоторфин-Б	0,37	0,35	4,79	5,81
НСР ₀₅	0,076	0,03	0,18	0,54
Эспарцет (контроль)	0,47	0,42	5,81	7,62
Эспарцет+Биоторфин-Б	0,92	0,84	11,68	10,69
НСР ₀₅	0,03	0,04	0,40	1,98
Донник желтый (контроль)	0,66	0,59	8,68	9,19
Донник желтый+Биоторфин-Б	0,75	0,69	9,87	10,91
НСР ₀₅	0,68	0,03	0,29	0,79
2023 г.				
Люцерна (контроль)	5,82	5,98	83,92	102,98
Люцерна+Биоторфин-Б	7,04	7,48	102,87	136,24
НСР ₀₅	1,36	1,42	19,82	29,15
Эспарцет (контроль)	10,61	10,21	147,2	173,3
Эспарцет+Биоторфин-Б	17,4	17,42	245,8	294,0
НСР ₀₅	2,21	2,73	31,0	48,9
Донник желтый (контроль)	6,44	6,44	90,58	110,03
Донник желтый+Биоторфин-Б	11,25	11,66	166,31	210,94
НСР ₀₅	8,49	8,8	122,3	158,0

Окончание табл. 4

Вариант испытаний	Сухое вещество, т/га	Кормовые единицы, тыс.	Обменная энергия, МДж/га	Переваримый протеин, т/га
2024 г.				
Люцерна (контроль)	3,64	4,17	57,60	37,45
Люцерна+Биоторфин-Б	3,63	3,73	54,97	21,67
НСР ₀₅	1,02	1,14	17,14	10,82
Эспарцет (контроль)	5,1	10,54	100,69	88,03
Эспарцет+Биоторфин-Б	6,26	8,37	112,28	87,58
НСР ₀₅	3,92	5,19	70,6	52,80
Донник желтый (контроль)	3,40	3,76	54,57	25,64
Донник желтый+Биоторфин-Б	6,98	7,91	118,81	50,03
НСР ₀₅	1,59	1,75	25,89	19,96
Средние за 2022-2024 гг.				
Люцерна (контроль)	5,24	5,60	76,78	85,82
Люцерна+Биоторфин-Б	8,20	8,70	119,13	144,63
Эспарцет (контроль)	8,05	9,05	117,63	122,21
Эспарцет+Биоторфин-Б	11,15	10,70	160,29	178,69
Донник желтый (контроль)	7,30	7,22	101,95	116,22
Донник желтый+Биоторфин-Б	10,01	10,70	148,91	163,30

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В опыте, заложенном в 2023 году, при сравнительном анализе суммарной урожайности за 2 года наибольшая прибавка от инокуляции семян отмечена у эспарцета – 47,1%, или 13,01 т/га. Также достоверная разница отмечена у донника желтого – при обработке семян биопрепаратами клубеньковых бактерий урожайность увеличилась на 30,4%, или 10,27 т/га. У люцерны по урожайности не отмечено достоверной разницы между вариантами, на что повлияли очень засушливые условия вегетации 2024 года.

Продуктивность многолетних трав по годам исследований была разной в зависимости от влагообеспеченности. Сравнительная оценка средних данных по продуктивности за три года показала, что варианты с Биоторфином-Б по всем показателям превысили контрольный вариант (табл. 4).

Так, люцерна с Биоторфином-Б превысила контрольный вариант по сухому веществу на 56,48%, или 2,96 т/га, по кормовым единицам на 55,3%, или 3,1 тыс., по обменной энергии – на 55,0%, или 42,15 МДж/га, по переваримому протеину – на 68,5%, или 58,81 т/га.

Эспарцет с инокулянтom имеет преимущество перед контролем по сухому веществу 38,5% (3,45 т/га), по кормовым единицам – 18,2% (1,65 тыс.), по обменной

энергии – 36,3% (42,66 МДж/га), по переваримому протеину – 68,5% (56,48 т/га). Донник желтый с Биоторфином-Б также превысил контроль по сухому веществу на 37,1% (2,71 т/га), по кормовым единицам – на 48,2% (3,48 тыс.), по обменной энергии – на 46,9% (46,96 МДж/га), по переваримому протеину – на 40,5% (47,08 т/га).

Заключение

Таким образом, инокуляция семян Биоторфином-Б достоверно повышала урожайность зеленой массы многолетних трав. В первый год жизни трав наиболее отзывчивыми на обработку в условиях республики оказались эспарцет и донник желтый. Наибольший урожай в первый год сформировал эспарцет с Биоторфином-Б – 28,55 т/га, что выше контроля на 11,25 т/га, и донник желтый с Биоторфином-Б – 18,52 т/га, превысил контроль на 8,1 т/га. Во второй год жизни трав лучшие результаты отмечены у люцерны и донника желтого с Биоторфином: люцерна – 33,64 т/га и донник желтый 33,48 т/га. Положительное действие обработки семян Биоторфином-Б выявлено при оценке продуктивности изучаемых многолетних трав. Сравнение средних значений продуктивности за три года подтвердили, что варианты с обработкой превысили контрольный вариант у всех изучаемых трав.

Список литературы

1. Монгуш Л.Т. Кормовые угодья как основа развития животноводства Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2022. № 8. С. 142-148. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kormovye-ugodya-kak-osnova-razvitiya-zhivotnovodstva-respubliki-tyva> (дата обращения: 15.07.2025) DOI: 10.36718/1819-4036-2022-8-142-148.
2. Монгуш Л.Т. Изучение влияния покровных культур на урожайность и продуктивность многолетних трав в условиях Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2020. № 12 (165). С. 19-24. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-12-19-24. EDN: ZFRBKB. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vliyaniya-pokrovnyh-kultur-na-urozhaynost-i-produktivnost-mnogoletnih-trav-v-usloviyah-respubliki-tyva> (дата обращения: 15.07.2025).
3. Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Агроэкология и рациональное природопользование в растениеводстве Дальнего Востока // Агрономия. 2023. Т. 1. № 2. С. 38-45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agroekologiya-i-ratsionalnoe-prirodopolzovanie-v-rastenievodstve-dalnego-vostoka> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.24412/2949-2211-2023-1-2-38-45.
4. Дронова Т.Н., Бурцева Н.И. Влияние микробиологических препаратов на симбиотическую деятельность и продуктивность многолетних бобовых трав // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. №2 (50). С. 44-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mikrobiologicheskikh-preparatov-na-simbioticheskuyu-deyatelnost-i-produktivnost-mnogoletnih-bobovyh-trav/viewer> (дата обращения: 15.07.2025).
5. Степанов А.Ф., Чибис С.П., Христич В.В., Александрова С.Н., Храмов С.Ю. Азотфиксирующая способность и роль бобовых трав в биологизации земледелия // Земледелие. 2023. № 1. С. 18-22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azotfiksiruyushchaya-sposobnost-i-rol-bobovyh-trav-v-biologizatsii-zemledeliya> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.24412/0044-3913-2023-1-18-22.
6. Налиухин А.Н., Рыжакова А.А. Азотфиксация клевера лугового при применении удобрений и известковании // Агрохимия. 2021. № 11. С. 65-71. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2021&v=0&n=11&a=Agro2111009Naliukhin> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.31857/S0002188121110090.
7. Фарниев А.Т., Сабанова А.А., Калицева Д.Т. Влияние ризоторфина на продуктивность и качество клевера лугового // Нива Поволжья. 2020. № 2 (55). С. 65-70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rizotorfina-na-produktivnost-i-kachestvo-klevera-lugovogo/viewer> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.36461/NP.2020.2.55.011.
8. Храмов С.Ю., Степанов А.Ф. Аккумуляция общего и симбиотического азота многолетними бобовыми травами в зависимости от применяемого препарата // Инновационные технологии в земледелии и растениеводстве: сборник научных статей, посвященный 70-летию доктора с.-х. наук Юшкевича Леонида Витальевича. Омск: ФГБНУ «Омский АНЦ». 2022. С. 81-86. URL: <http://anc55.ru/wp-content/uploads/2022/10/sbornik-dlja-zagruzki.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
9. Степанов А.Ф., Александрова С.Н., Храмов С.Ю. Азотфиксирующая способность и урожайность многолетних бобовых трав в подтаежной зоне Западной Сибири // Вестник Омского ГАУ. 2019. №1 (33). С. 46-53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/azotfiksiruyushchaya-sposobnost-i-urozhaynost-mnogoletnih-bobovyh-trav-v-podtaezhnoy-zone-zapadnoy-sibiri/viewer> (дата обращения: 15.07.2025).
10. Алешин М.А., Завалин А.А. Реакция гороха на азотное удобрение и инокуляцию семян ризоторфином на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности // Агрохимия. 2023. № 6. С. 22-38. DOI: 10.31857/S0002188123060030 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-azotnogo-udobreniya-i-rizotorfina-na-morfologiyu-simbioticheskogo-apparata-goroha> (дата обращения: 15.07.2025).
11. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. Саратов: Амирит, 2019. 252 с. ISBN 978-5-907036-03-1. EDN: NFFWSG.
12. Завалин А.А., Алферов А.А., Чернова Л.С. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83-96. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=8&a=Agro1908014Zavalin> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.1134/S0002188119080143.
13. Дронова Т.Н., Бурцева Н.И., Двойникова О.И., Земцова И.П., Земляничина С.В. Эффективность использования биопрепаратов при возделывании многолетних бобовых трав // Известия НВ АУК. 2021. 2 (62). С. 41-50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-ispolzovaniya-biopreparatov-pri-vozdelivanii-mnogoletnih-bobovyh-trav> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-04.
14. Шпаков А.С., Новоселов Ю.К., Харьков Г.Д., Воловик В.Т., Трузина Л.А., Прологова Т.В., Уланов А. Н., Ларетин Н. А., Сергеева С. Е., Усольцева Т.Г. Методические основы полевых опытов с кормовыми культурами. М.: ФГБОУ ДПО РАКО АПК, 2024. 332 с. ISBN 978-5-93098-144-5. URL: <https://www.vniikormov.ru/pdf24/metodicheskie-osnovy-polevykh-opytov-s-kormovymi-kulturami.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
15. Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Благовещенский Г.В., Тимошенко С.М., Назарова Т.О., Соболев С.В. Влияние удобрений и микробного препарата на урожайность современных многолетних мультитравосмесей и их способность к усвоению атмосферного азота в Центральном Черноземье // Агрохимия. 2019. № 7. С. 35-44. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=7&a=Agro1907006Kononchuk> (дата обращения: 15.07.2025). DOI: 10.1134/S0002188119070068.

СТАТЬЯ

УДК 004.8:504.064

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРОТИВ КЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА В КОНТРОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ^{1,2,3}Ананченко И.В., ²Баранков К.А., ²Михайлиди А.А.¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург;²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, e-mail: cyb3ik88@mail.ru;³ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург

В условиях нарастающей техногенной нагрузки и ужесточения требований природоохранного законодательства востребовано применение интеллектуальных систем, способных эффективно прогнозировать и контролировать загрязняющие выбросы в окружающую среду. В работе проведён сравнительный анализ эффективности двух подходов к мониторингу и прогнозированию промышленных выбросов загрязняющих веществ: традиционных статистических методов, таких как линейная регрессия, метод отбора признаков LASSO и карты статистического контроля, а также современных алгоритмов машинного обучения, включая многослойный перцептрон, рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью и гибридные архитектуры, сочетающие свёрточные и рекуррентные элементы. Цель исследования – определить преимущества и ограничения каждого из подходов, выявить условия их наибольшей эффективности и обосновать целесообразность применения гибридных моделей. В качестве объектов исследования рассматриваются выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух (угарный газ, окислы азота, взвешенные частицы размером до 2.5 микрон) и в водные среды (химическое потребление кислорода, нефтепродукты, тяжёлые металлы). Используются синтетические данные, имитирующие реальные технологические процессы с учётом погодных, производственных и эксплуатационных факторов. Показано, что нейросетевые модели обладают преимуществом в точности и чувствительности к аномалиям, тогда как классические методы остаются устойчивыми при ограниченных данных и простыми в интерпретации. Обоснована целесообразность использования гибридных подходов, объединяющих достоинства обеих методологий.

Ключевые слова: мониторинг выбросов, нейронные сети, экология, регрессионный анализ**ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS VERSUS CLASSICAL APPROACHES IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTAL MONITORING**^{1,2,3}Anantchenko I.V., ²Barankov K.A., ²Mikhailidi A.A.¹Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg;²Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), e-mail: cyb3ik88@mail.ru;³Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

In conditions of increasing anthropogenic load and stricter requirements of environmental legislation, the use of intelligent systems capable of effectively predicting and controlling polluting emissions into the environment is in demand. The paper provides a comparative analysis of the effectiveness of two approaches to monitoring and forecasting industrial pollutant emissions: traditional statistical methods such as linear regression, the LASSO feature selection method and statistical control maps, as well as modern machine learning algorithms, including a multilayer perceptron, recurrent neural networks with long-term short-term memory and hybrid architectures combining convolutional and recurrent elements. The purpose of the study is to identify the advantages and limitations of each approach, identify the conditions for their greatest effectiveness, and justify the feasibility of using hybrid models. The objects of the study are emissions of pollutants into atmospheric air (carbon monoxide, nitrogen oxides, suspended particles up to 2.5 micrometers in size) and into aquatic environments (chemical oxygen consumption, petroleum products, heavy metals). Synthetic data was used to simulate real technological processes, taking into account weather, production and operational factors. It is shown that neural network models have an advantage in accuracy and sensitivity to anomalies, while classical methods remain stable with limited data and easy to interpret. The expediency of using hybrid approaches combining the advantages of both methodologies is substantiated.

Keywords: emission monitoring, neural networks, ecology, regression analysis**Введение**

Промышленная деятельность – один из ключевых источников загрязнения окружающей среды, оказывающий значительное воздействие как на атмосферный воз-

дух, так и на водные ресурсы. Согласно последним оценкам, выбросы угарного газа, окислов азота, мелкодисперсных частиц и различных химических соединений с промышленных объектов продолжают расти,

несмотря на ужесточение нормативных требований [1; 2]. Эффективный мониторинг этих выбросов становится необходимым не только для соблюдения санитарных норм и технических регламентов, но и в рамках общей стратегии устойчивого развития и промышленной безопасности [3; 4].

Классические методы экологического контроля – включая линейную регрессию, методы наименьших квадратов, контрольные карты Шухарта и CUSUM – широко применяются на производстве в силу своей простоты, понятности и возможности оперативной интерпретации результатов [5; 6]. Однако такие подходы часто демонстрируют ограниченную эффективность при работе с нелинейными зависимостями, шумами в данных, а также при необходимости учитывать множество переменных одновременно [7].

С развитием технологий обработки данных и вычислительных мощностей в сферу экологического мониторинга активно внедряются методы искусственного интеллекта. Особенно перспективным направлением считается использование искусственных нейронных сетей, таких как многослойный перцептрон, рекуррентные сети с долгой краткосрочной памятью, а также гибридные архитектуры, сочетающие сверточную и временную обработку сигналов [3; 8; 9]. Они позволяют выявлять сложные причинно-следственные связи между производственными параметрами и уровнями загрязнения, а также предсказывать потенциальные превышения нормативов задолго до их фактического наступления [4; 10].

Таким образом, сравнительный анализ классических и нейросетевых методов в задачах мониторинга выбросов в воздух и воду представляет собой актуальное научно-прикладное направление. Выполненное исследование позволяет определить границы применимости разных моделей и обосновать целесообразность перехода к гибридным интеллектуальным системам контроля в промышленной экологии.

Цель работы – определить и сравнить эффективность классических статистических методов и современных моделей искусственного интеллекта при мониторинге и прогнозировании выбросов загрязняющих веществ в промышленных условиях, а также выявить оптимальные сценарии их применения в зависимости от объема и структуры данных.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на основе синтетически сгенерированных данных, моделирующих поведение системы контроля

промышленных выбросов на условном объекте тяжелой промышленности. Временной интервал составил 90 суток, временная дискретность – 1 час, что обеспечило объем данных в 2160 точек на каждый параметр.

Основное внимание уделено показателям загрязнения воздуха (CO, NO_x, PM) и воды (химическое потребление кислорода (ХПК), нефтепродукты, тяжелые металлы) [11]. В рамках исследования модели сравниваются по точности, устойчивости к шуму, требуемому объему данных и способности выявлять превышения установленных предельно допустимых концентраций (ПДК).

Выбросы разделены на две категории:

- Атмосферные загрязнители:
- CO (угарный газ),
- NO_x (окислы азота),
- PM2.5 (взвешенные частицы ≤2.5 мкм).
- Водные загрязнители:
- химическое потребление кислорода (ХПК),
- нефтепродукты,
- ионы тяжелых металлов (свинец, ртуть).

Дополнительно учитывались условия окружающей среды и технологические параметры: температура, влажность, производственная нагрузка, режим работы оборудования.

Данные анализировались с использованием двух принципиально разных подходов: классических статистических методов и современных нейросетевых архитектур.

1. Классические методы

- Множественная линейная регрессия

Позволяет оценивать влияние входных параметров на загрязнение, при условии линейной зависимости. Применяется для базового контроля.

- LASSO-регрессия

Регуляризованный метод с автоматическим исключением нерелевантных факторов. Устойчив к мультиколлинеарности.

- Пороговый контроль (ПДК)

Простая логика превышения граничных значений, закреплённых в нормативных документах.

- Контрольные карты Шухарта и CUSUM

Применяются для выявления статистических сдвигов во времени [8; 9].

2. Искусственные нейронные сети (ИНС)

- Многослойный перцептрон (MLP)

Использован с двумя скрытыми слоями по 128 нейронов, ReLU-активация, оптимизатор Adam. Архитектура справляется с базовыми нелинейными зависимостями.

- Рекуррентная нейронная сеть LSTM

Применялась для учёта временной структуры загрязнений, позволяет анализировать задержки и периодические колебания выбросов.

• Гибрид CNN-LSTM

Сочетает свёрточные фильтры (выделение пространственных признаков) и LSTM-блоки. Применяется при наличии взаимосвязанных параметров, таких как погодные и производственные условия [11; 12].

Однако важно отметить:

- простые модели требуют меньше данных и вычислений;
- нейросети чувствительны к переобучению и шуму;
- классические методы более прозрачны для инженеров и регуляторов.

Каждая модель проходила обучение, валидацию и тестирование по стандартной схеме:

- обучающая выборка – 70%,
- валидационная – 15%,
- тестовая – 15%.

Оценка качества осуществлялась с помощью следующих метрик:

- RMSE (среднеквадратичная ошибка) – наиболее чувствительна к пиковым выбросам;

- R^2 (коэффициент детерминации) – степень соответствия модели данным.

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице показаны ключевые метрики моделей прогнозирования выбросов для наглядного их сравнения.

Для подробного анализа различий подходов были построены графики, представленные на рис. 1 и 2. На первом показана зависимость эффективности моделей от количества внесенных замеров, а на втором дано сравнение индекса совокупных потерь – объединённого показателя, учитывающего и ошибку прогноза (RMSE), и недостигнутую долю объяснённой дисперсии ($1 - R^2$).

Результаты моделирования показали значительные различия в эффективности методов, особенно в условиях нелинейных связей между технологическими параметрами и уровнем загрязнений.

Сравнительная характеристика моделей прогнозирования выбросов

Метод	RMSE (CO), мг/м ³	R^2 (CO)	Требуемый объём данных (набл.)
Линейная регрессия	0.38	0.73	500
LASSO-регрессия	0.35	0.75	600
MLP	0.25	0.85	1200
LSTM	0.21	0.92	1500
CNN-LSTM	0.19	0.94	1600

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

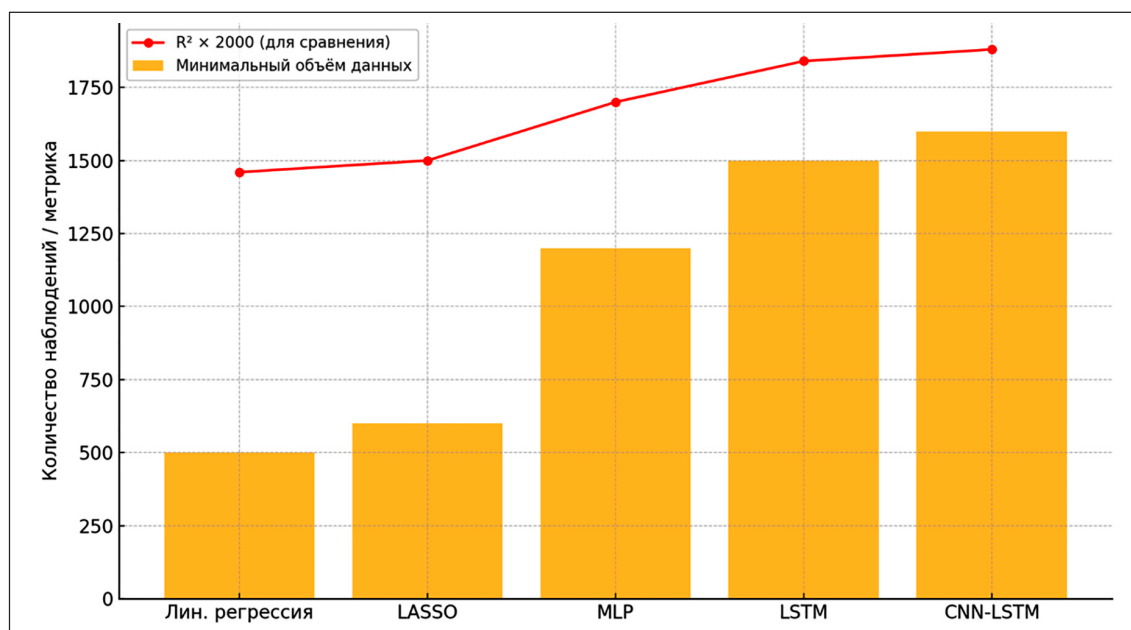


Рис. 1. Влияние объема данных на эффективность моделей

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

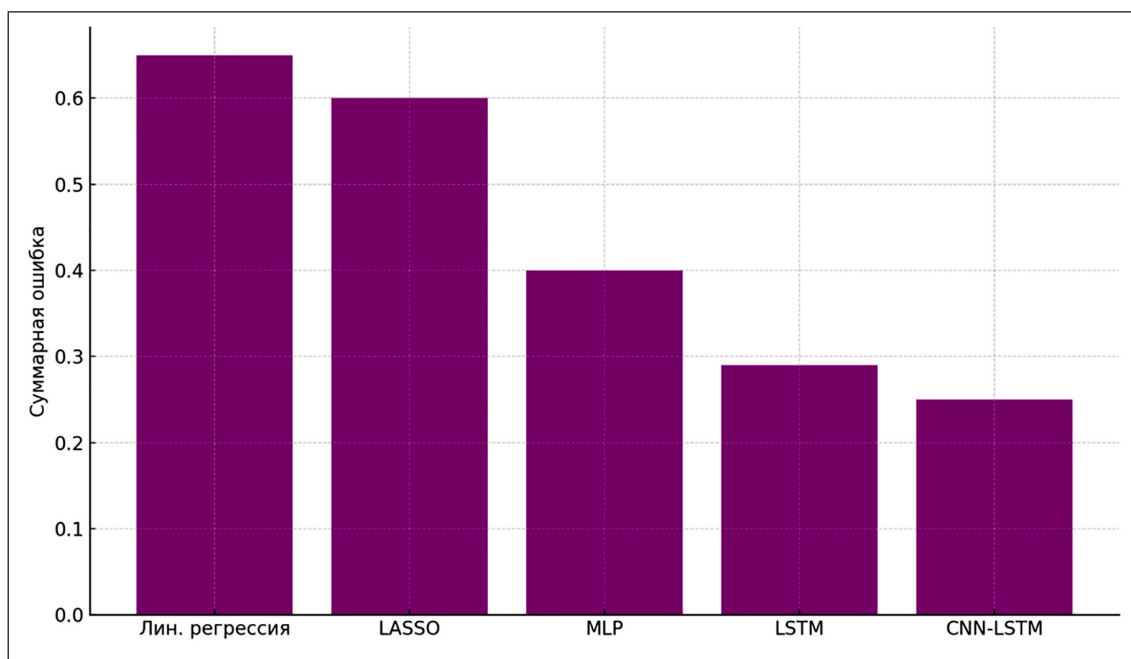


Рис. 2. Сравнение суммарной ошибки подходов

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

1. Точность прогнозов

Наиболее важным критерием в задачах экологического мониторинга является точность. Нейросетевые модели (особенно LSTM и CNN-LSTM) обеспечили наименьшие значения RMSE по всем ключевым загрязняющим веществам.

Такая высокая точность объясняется способностью ИНС улавливать сложные паттерны, включая нелинейные зависимости и временные лаги, что особенно полезно при мониторинге выбросов в реальном времени [13; 14].

2. Выявление пиков и предикция превышений ПДК

Классические модели часто сглаживали резкие выбросы, в то время как нейронные сети (особенно LSTM) успешно фиксировали их на этапе до наступления превышения. Это критично для раннего предупреждения аварийных ситуаций.

3. Устойчивость к объёму данных

Классические модели демонстрировали стабильные результаты даже при 500–600 наблюдениях, что делает их применимыми в условиях ограниченных данных (например, на малых предприятиях).

ИНС требовали от 1200 наблюдений для MLP и свыше 1500 для LSTM/CNN-LSTM – иначе модель склонна к переобучению или резкому снижению точности на тестовой выборке [15].

4. Интерпретируемость и объяснимость

Линейная и LASSO-регрессии легко визуализируются и обосновываются в технической документации. ИНС в свою очередь требуют применения дополнительных техник, таких как SHAP, Grad-CAM или LIME, для объяснения влияния входов на прогноз [5].

5. Проблемы переобучения и валидации

В случае отсутствия регуляризации нейронные сети демонстрировали переобучение:

- ошибка на обучающей выборке снижалась до $RMSE = 0.10$,
- но на валидационной – возрастала до $RMSE = 0.35–0.40$.

Внедрение Dropout (0.2–0.3), Batch Normalization и EarlyStopping позволило стабилизировать кривые потерь и повысить обобщающую способность модели [2; 10].

Заключение

В условиях ужесточения экологического законодательства и роста общественного внимания к промышленным выбросам задача повышения эффективности систем экологического мониторинга становится всё более актуальной. Выполненное исследование позволило выявить ключевые преимущества и ограничения классических и нейросетевых подходов к прогнозированию выбросов загрязняющих веществ в воздух и воду. На основании моделирования и сравнительного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Нейросетевые модели (LSTM, CNN-LSTM) демонстрируют значительно более высокую точность (RMSE и R^2) по сравнению с классическими методами, что делает их использование предпочтительным для задач, требующих чувствительности к сложным нелинейным и временным зависимостям, таких как прогноз краткосрочных выбросов, определение пиков и опережающая диагностика превышений ПДК.

2. Классические методы остаются востребованными благодаря своей устойчивости при небольшом объёме данных, простоте настройки и интерпретируемости результатов. Классические методы особенно эффективны на этапе первичного экологического аудита, а также в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

3. Для эффективной работы нейросетей необходимы:

- достаточный объём данных (1500 + наблюдений);
- механизмы регуляризации (Dropout, BatchNorm, EarlyStopping);
- валидационные процедуры для предотвращения переобучения;
- методы объяснимого ИИ для интеграции в существующие системы контроля.

4. Наилучшей практикой может стать гибридный подход, при котором:

- нейросети используются для предиктивной аналитики и прогнозирования,
- а классические модели – для документированной верификации, интерпретации и подтверждения прогнозов в отчётных системах.

Таким образом, выбор модели должен определяться конкретными условиями предприятия: доступностью и структурой данных, требованиями к интерпретируемости, вычислительными возможностями и конечной целью мониторинга (контроль, предсказание, предупреждение).

Интеграция ИНС в промышленную экологию – не только технологическое усовершенствование, но и шаг к более устойчивому и адаптивному экологическому управлению.

Список литературы

1. Cabaneros S.M., Calautit J.K., Hughes B.R. A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 119. P. 285 – 304. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.06.014.
2. Xing J. Deep learning for the air quality response to emission changes // *Environmental Science & Technology Letters*. 2020. Vol. 7. P. 880 – 886. DOI: 10.1021/acs.est.0c02923.
3. Zhang B., Zhang L., Qin L., et al. Deep learning for air pollutant concentration prediction // *Atmospheric Environment*. 2022. Vol. 286. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119347.
4. Li P., Sun J., Liu L., et al. Regional heatwave prediction using graph neural network // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50. Is. 22. DOI: 10.1029/2023GL103405.
5. Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. “Why Should I Trust You?”: Explaining the predictions of any classifier // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*. 2016. P. 1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
6. Ясовеев М.Г., Стреха Н.Л., Какарека Э.В., Шевцова Н.С. Экологический мониторинг и экологическая экспертиза: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2023. 304 с. URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=421780> (дата обращения: 21.06.2025). ISBN 978-5-16-006845-9.
7. Крупенин Н.Н. Экологический мониторинг: учебное пособие для вузов. М.: Маршрут, 2005. 132 с. URL: https://www.centrmag.ru/catalog/product/ekologicheskij_monitoring_uchebnoe_posobie (дата обращения: 21.06.2025). ISBN 5-89035-229-6.
8. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. 800 p. ISBN: 978-1-119-39930-8.
9. Woodall W.H. The use of control charts in health-care and public-health surveillance // *Journal of Quality Technology*. 2006. Vol. 38. № 2. P. 89–104. DOI: 10.1080/00224065.2006.11918593.
10. Liu B., Wang M., Li Y., Chen H., Li J. Deep Learning for Spatio-Temporal Sequence Forecasting: A Survey // *Journal of Beijing University of Technology*. 2021. Vol. 47. № 8. P. 925–941. DOI: 10.11936/bjtxb2020120037.
11. Kim H.S., Han K.M., Yu J., Kim J., Kim K., Kim H. Development of a CNN+LSTM hybrid neural network for daily PM_{2.5} prediction // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. № 12. DOI: 10.3390/atmos13122124.
12. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. 3rd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022. 1136 p. ISBN 978-1098125974.
13. Zaini N., Ean W. L., Ahmed A.N. A systematic literature review of deep learning neural network for time series air quality forecasting // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 4958–4990. DOI: 10.1007/s11356-021-17442-1.
14. Arsov M., Zdravevski E., Lameski P. Multi-Horizon Air Pollution Forecasting with Deep Neural Networks // *Information*. 2021. Vol. 12. № 2. DOI: 10.3390/s21041235
15. Pichler M. Machine learning and deep learning-a review for ecologists // *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14. № 5. P. 273–292. DOI: 10.1111/2041-210X.14061.

СТАТЬЯ

УДК 532.516/.517

О ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ**Сенницкий В.Л.**

*ФГБУН Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск;
ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет», Новосибирск, e-mail: sennitskii@yandex.ru*

Работа посвящена рассмотрению вопроса об организации (или предотвращении) вращательного движения твердых частей гидромеханической системы по одному и тому же временному закону, как одного из содержательных вопросов, непосредственно относящихся к перспективному научному направлению – изучению динамики гидромеханических систем при нестационарных (в том числе периодических) воздействиях. Данный вопрос ранее не рассматривался. Целью работы является определение условий, при выполнении которых твердые части гидромеханической системы, подвергающейся внешнему периодическому силовому воздействию, совершают (или не совершают) синхронное вращательное движение. Исследование проведено на основе полученного в работе точного решения задачи о вращательном движении гидромеханической системы, состоящей из вязкой жидкости и двух твердых тел – криволинейной стенки и криволинейной пластины. Стенка совершает заданные вращательные колебания. Жидкость заполняет промежуток между твердыми телами. На пластину оказывается внешнее периодическое силовое воздействие. Пластина является свободной (совершает вращательное движение, подлежащее определению). Постановка задачи включает в себя уравнение движения пластины, уравнение Навье – Стокса и условия на твердых границах жидкости. Сформулированы требования, при выполнении которых реализуется (или не реализуется) синхронность движения твердых частей системы. Обнаружен новый эффект, состоящий в том, что свободная твердая часть системы – пластина – может совершать синхронное вращательное движение с различными угловыми скоростями. Получены формулы, которыми определяется внешнее силовое воздействие, обеспечивающее синхронность движения твердых частей гидромеханической системы. Результаты работы могут использоваться, в частности, при разработке и создании аппаратов, устройств, содержащих жидкость и твердые тела, совершающие периодическое движение.

Ключевые слова: вязкая жидкость, твердые тела, периодическое воздействие, синхронизация вращательного движения

ON THE ROTATIONAL MOTION OF A HYDRO-MECHANICAL SYSTEM WITH A VISCOUS LIQUID**Sennitskiy V.L.**

*¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk;
²Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk,
e-mail: sennitskii@yandex.ru*

The work is dedicated for consideration the question on organisation (or prevention) of rotational motion of hydro-mechanical system solid parts by same law of time as meaningful question immediately related with perspective scientific direction that is study of dynamics of hydro-mechanical systems under non-stationary (in particular periodic) influences. This question was not under consideration earlier. Purpose of work is determination of conditions under which solid parts of hydro-mechanical system undergoing by external periodic force influence fulfil (or not fulfil) synchronic rotational motion. Investigation is realized on base of exact obtained in work solution of problem on rotational motion of hydro-mechanical system consisting of viscous liquid and solid bodies which are curvilinear wall and curvilinear plate. Wall fulfills prescribed rotational oscillations. Liquid fills interval between solid bodies. Plate undergoes by external periodic force influence. Plate is free (it fulfills rotational motion which has to be determined). Problem formulation includes equation of plate motion, equation of Navier---Stokes and conditions at solid boudaries of liquid. Conditions are found under which synchronism of motion of system solid parts is realized (or is not realized). New effect is revealed which consists in that free solid part of system that is plate can fulfill synchronic rotational motion by various angle velocities. Formulas are obtained that determine external force influence which provides synchronism of solid parts of hydro-mechanical system. Results of work can be used in particular under elaboration and creation of apparatuses, devices that contain liquid and solid bodies which fulfill periodic motion.

Keywords: viscous liquid, solid bodies, periodic influence, synchronisation of rotational motion

Введение

Вращательное движение широко и разнообразно представлено в природе и технике – от вращательных вибраций листьев рас-

тений и движения простейших организмов (например, *Paramecium caudatum*) до вращения многочисленных пропеллеров, винтов, турбин. К числу важных современных

научно-технических задач с очевидностью относится задача синхронизации (или недопущения синхронизации) движения (в том числе вращательного движения) составных частей механических систем – задача организации (или предотвращения) движения составных частей механических систем по одному и тому же временному закону. Актуальность данной задачи определяется, в частности, тем, что синхронизация движения частей систем может быть причиной возникновения как желательных резонансов, так и вредоносных, способных приводить к тем или иным повреждениям и даже к разрушению аппаратов, устройств, конструкций. Задача синхронизации (или недопущения синхронизации) вращательного движения актуальна, в частности, для гидромеханических систем, подвергающихся периодическим по времени воздействиям. Изучение динамики гидромеханических систем при нестационарных (в том числе периодических) воздействиях является перспективным направлением в механике жидкости. Результаты исследований в этом научном направлении обладают как фундаментальным, так и прикладным содержанием [1–3]. В проводимых исследованиях используются экспериментальные и теоретические – аналитические, численные – методы. Исследованиям экспериментального типа посвящены, в частности, работы [4–6]. Результаты исследований с применением численных методов отражены в [7–9]. В работах [10–12] представлены примеры изучения вопросов с отчетливо выраженным прикладным содержанием. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований динамики гидромеханических систем при периодических по времени воздействиях адекватно характеризуется работами [13–15]. Краткий обзор ранее проведенных исследований содержится в [1].

Изучение вопросов, касающихся синхронизации движения в гидромеханических системах, начато в работе [3], где рассмотрен вопрос о синхронизации поступательного движения твердых частей системы с вязкой жидкостью. В данной работе поставлена и решена задача о вращательном движении гидромеханической системы с вязкой жидкостью, рассмотрен вопрос о синхронизации вращательного движения твердых частей системы.

Цель исследования – определение условий, при выполнении которых твердые части гидромеханической системы, подвергающейся внешнему периодическому силовому воздействию, совершают (или не совершают) синхронное вращательное движение.

Постановка и решение задачи о движении гидромеханической системы

Имеется гидромеханическая система, состоящая из несжимаемой вязкой жидкости и абсолютно твердых бесконечно длинных тел – криволинейной стенки η и криволинейной пластины ξ . Стенка η ограничена извне круговой цилиндрической поверхностью Γ_η радиуса R_η , ось которой находится на оси Z инерциальной прямоугольной системы координат X, Y, Z . Пластина ξ ограничена круговыми цилиндрическими поверхностями Γ_ξ радиуса $R_\xi > R_\eta$ и Γ'_ξ радиуса $R'_\xi > R_\xi$; оси поверхностей Γ_ξ, Γ'_ξ находятся на оси Z . Жидкость заполняет область $Q: R_\eta \leq R < R_\xi, 0 \leq \theta < 2\pi, -\infty < Z < \infty$ ($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, θ, Z – цилиндрическая система координат). Стенка и пластина совершают вращательное движение вокруг оси Z . Угловая скорость Ω_η вращения стенки η вокруг оси Z заданным образом периодически с периодом T изменяется со временем $t(\Omega_\eta = \Omega_\eta \sin(2\pi t / T); \Omega_\eta > 0$ – постоянная). Плотность пластины ξ не зависит от координаты Z . Пластина ξ является свободной – ее движение не задано, угловая скорость Ω_ξ вращения пластины ξ вокруг оси Z подлежит определению.

Пусть $\tau = t / T$; $r = R / R_\eta$, $r_\xi = R_\xi / R_\eta$; V, ρ, ν – соответственно скорость, плотность и кинематический коэффициент вязкости жидкости; e_θ – единичный базисный вектор, направление которого совпадает с направлением возрастания угла θ ; $v = TV / R_\eta = v(r, \tau)e_\theta$; P – давление в жидкости; $p = T^2 P / (\rho R_\eta^2) = p(r, \tau)$; $\omega_\eta = T\Omega_\eta = \hat{\omega}_\eta \sin 2\pi\tau$; ξ^* – абсолютно твердое тело, часть пластины ξ , заполняющая область $Q^*: R_\xi < R < R'_\xi, 0 \leq \theta < 2\pi, Z^* < Z < Z^* + D$ ($Z^*, D > 0$ – постоянные); I – момент инерции тела ξ^* относительно оси Z ; $\omega_\xi = T\Omega_\xi$; $Re = R_\eta^2 / (\nu T)$ – число Рейнольдса; $\varkappa = \rho R_\eta^2 R_\xi^2 / I$; M_{liq} – момент сил, действующих на тело ξ^* со стороны жидкости, относительно оси Z ; $\mu_{liq} = T^2 M_{liq} / I = -2\pi(\varkappa / Re)(\partial v / \partial r - v / r)|_{r=r_\xi}$; M_{ext} – момент внешних сил, действующих на тело ξ^* , относительно оси Z ; $\mu_{ext} = T^2 M_{ext} / I = \tilde{\mu} \sin(2\pi\tau + \varphi)$ ($\tilde{\mu} > 0, 0 \leq \varphi < 2\pi$ – параметры).

Требуется определить движение гидромеханической системы (свободных частей системы – жидкости и пластины ξ).

Задачу о движении гидромеханической системы составляют уравнение движения пластины ξ (тела ξ^*), уравнение Навье – Стокса и условия на твердых границах жидкости:

$$\frac{d\omega_\xi}{d\tau} = \mu_{liq} + \mu_{ext}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{v} \text{ в } Q \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = \omega_\eta \mathbf{e}_\theta \text{ на } \Gamma_\eta; \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \omega_\xi r_\xi \mathbf{e}_\theta \text{ на } \Gamma_\xi. \quad (4)$$

Из (2)–(4) следует

$$p = \int_1^r \frac{v^2}{r'} dr' + c \quad (5)$$

(с – функция τ);

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \text{ для } 1 < r < r_\xi; \quad (6)$$

$$v = \omega_\eta \text{ при } r = 1; \quad (7)$$

$$v = \omega_\xi r_\xi \text{ при } r = r_\xi. \quad (8)$$

Сделаем в (6)–(8) подстановку

$$v = \text{Real}(v' e^{2\pi i \tau}),$$

$$\omega_\xi = \text{Real}(\omega' e^{2\pi i \tau}), \quad (9)$$

(v' – функция r ; ω' – постоянная). Используя полученные в результате этого соотношения, определим задачу

$$q^2 v' = \frac{d^2 v'}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv'}{dr} - \frac{v'}{r^2} \text{ для } 1 < r < r_\xi; \quad (10)$$

$$v' = -i\hat{\omega}_\eta \text{ при } r = 1; \quad (11)$$

$$v' = \omega' r_\xi \text{ при } r = r_\xi. \quad (12)$$

Здесь $q = (1+i)\sqrt{\pi Re}$. Задача (10)–(12) имеет решение

$$v' = \alpha I_1(qr) + \beta K_1(qr), \quad (13)$$

где I_1, K_1 – модифицированные функции Бесселя;

$$\alpha = -\frac{i\hat{\omega}_\eta K_1(qr_\xi) + \omega' r_\xi K_1(q)}{G_1};$$

$$\beta = \frac{i\hat{\omega}_\eta I_1(qr_\xi) + \omega' r_\xi I_1(q)}{G_1}$$

$$(G_1 = I_1(q)K_1(qr_\xi) - I_1(qr_\xi)K_1(q)).$$

Используя (1), (9), (13), найдем

$$\omega' = i \frac{2\pi \kappa \hat{\omega}_\eta - r_\xi Re G_1 \tilde{\mu} e^{i\varphi}}{qr_\xi (qG_1 - 2\pi \kappa G_2)}. \quad (14)$$

Здесь $G_2 = I_1(q)K_2(qr_\xi) + I_2(qr_\xi)K_1(q)$ (I_2, K_2 – модифицированные функции Бесселя).

Формулами (5), (9), (14) определяется точное решение задачи (1)–(4) о движении гидромеханической системы.

Результаты исследования и их обсуждение

Обратимся к вопросу о синхронизации движения твердых частей гидромеханической системы посредством внешнего силового воздействия на систему. Представим комплексную амплитуду ω' в виде

$$\omega' = \hat{\omega}_\xi e^{i\psi}, \quad (15)$$

где $\hat{\omega}_\xi$ и ψ – соответственно модуль и аргумент амплитуды ω' ($\sin \psi = \text{Imag } \omega' / \hat{\omega}_\xi$, $\cos \psi = \text{Real } \omega' / \hat{\omega}_\xi$). Из (9), (15) следует

$$\omega_\xi = \hat{\omega}_\xi \cos(2\pi\tau + \psi). \quad (16)$$

Синхронность движения пластины ξ и стенки η состоит в том, что при любом значении τ имеет место равенство

$$\cos(2\pi\tau + \psi) = \sin 2\pi\tau. \quad (17)$$

Данное равенство (для любого τ) выполняется тогда и только тогда, когда выполняются соотношения

$$\sin \psi = -1, \cos \psi = 0. \quad (18)$$

Пусть значения числа Рейнольдса Re велики по сравнению с единицей. Используя (14), получим

$$\omega' \sim -\frac{\tilde{\mu} e^{i\varphi}}{2\pi}, \quad \sin \psi \sim -\sin \varphi,$$

$$\cos \psi \sim -\cos \varphi \text{ при } R \rightarrow \infty. \quad (19)$$

Согласно (18), (19) при больших значениях Re имеет место следующее. Пластина ξ и стенка η движутся синхронно, если управляющий параметр φ удовлетворяет условию

$$\varphi = \pi / 2 \quad (20)$$

(если $\varphi \neq \pi / 2$ синхронность отсутствует). При выполнении (20) синхронное (с движением стенки η) движение пластины ξ происходит с угловой скоростью

$$\omega_\xi = \frac{\tilde{\mu}}{2\pi} \sin 2\pi\tau.$$

(амплитуда угловой скорости ω_ξ вращения пластины ξ зависит от управляющего параметра $\tilde{\mu}$). Внешнее силовое воздействие, обеспечивающее синхронное (с движением стенки η) движение пластины ξ , определяется формулой

$$\mu_{\text{ext}} = \tilde{\mu} \cos 2\pi\tau.$$

Пусть значения числа Рейнольдса Re малы по сравнению с единицей ($Re > 0$). Используя (14), пренебрегая величинами, малыми по сравнению с Re , получим

$$\omega' \sim -i\hat{\omega}_\eta \left\{ 1 + \frac{r_\xi^2 - 1}{4\pi\mathcal{K}} \left[\frac{\tilde{\mu}e^{i\varphi}}{\hat{\omega}_\eta} - i\pi(2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)) \right] Re \right\},$$

$$\sin \psi \sim -1, \cos \psi \sim \frac{r_\xi^2 - 1}{4\pi\mathcal{K}\hat{\omega}_\eta} \left\{ \tilde{\mu} \sin \varphi - \pi\hat{\omega}_\eta [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)] \right\} Re \quad \text{при } Re \rightarrow 0 \quad (21)$$

Согласно (18), (21) при малых значениях Re имеет место следующее.

1. В нулевом приближении (при учете только слагаемых, не зависящих от Re) пластина ξ и стенка η движутся синхронно, независимо от того, каков момент μ_{ext} (независимо от значений параметров $\tilde{\mu}$, φ).

2. В первом приближении (при учете наряду со слагаемыми, не зависящими от Re , также слагаемых, пропорциональных Re) пластина ξ и стенка η движутся синхронно или несинхронно в зависимости от значений управляющих параметров $\tilde{\mu}$, φ . При выполнении соотношения

$$\pi(\hat{\omega}_\eta / \tilde{\mu}) [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)] > 1$$

синхронность движения невозможна. Для значений управляющего параметра $\tilde{\mu}$, при которых имеет место соотношение

$$\pi(\hat{\omega}_\eta / \tilde{\mu}) [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)] \leq 1$$

пластина ξ и стенка η движутся синхронно, если управляющий параметр φ удовлетворяет условию

$$\sin \varphi = \pi(\hat{\omega}_\eta / \tilde{\mu}) [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)] \quad (22)$$

(если $\sin \varphi \neq \pi(\hat{\omega}_\eta / \tilde{\mu}) [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)]$, синхронность отсутствует).

При выполнении (22) возможна реализация синхронного (с движением стенки η) движения пластины ξ с различными (безразмерными) угловыми скоростями $\omega_\xi = \hat{\omega}_\xi \sin 2\pi\tau$:

$$\omega_\xi = \hat{\omega}_\eta \sin 2\pi\tau \quad \text{для } \varphi = \pi/2$$

(угловые скорости вращения пластины ξ и стенки η совпадают);

$$\omega_\xi = \hat{\omega}_\eta \left(1 + \frac{r_\xi^2 - 1}{4\pi\mathcal{K}\hat{\omega}_\eta} \tilde{\mu} C Re \right) \sin 2\pi\tau$$

для $0 < \varphi < \pi/2$ (23)

(согласно (23) $\hat{\omega}_\xi > \hat{\omega}_\eta$ (амплитуда угловой скорости вращения пластины ξ больше,

чем амплитуда угловой скорости вращения стенки η));

$$\omega_\xi = \hat{\omega}_\eta \left(1 - \frac{r_\xi^2 - 1}{4\pi\mathcal{K}\hat{\omega}_\eta} \tilde{\mu} C Re \right) \sin 2\pi\tau$$

для $\pi/2 < \varphi < \pi$ (24)

(согласно (24) $\hat{\omega}_\xi < \hat{\omega}_\eta$ (амплитуда угловой скорости вращения пластины ξ меньше, чем амплитуда угловой скорости вращения стенки η)).

Здесь

$$C = \frac{1}{\tilde{\mu}} \sqrt{\tilde{\mu}^2 - \pi^2 \hat{\omega}_\eta^2 [2 + \pi\mathcal{K}(r_\xi^2 - 1)]^2}.$$

Точки границ Γ_η и Γ_ξ стенки η и пластины ξ движутся по окружностям со скоростями

$$W_\eta = (R_\eta / T) \hat{\omega}_\eta \sin 2\pi\tau = \hat{W}_\eta \sin 2\pi\tau$$

$$\text{и } W_\xi = (R_\xi / T) \hat{\omega}_\xi \sin 2\pi\tau = \hat{W}_\xi \sin 2\pi\tau.$$

Согласно (24), при том что $\hat{\omega}_\xi < \hat{\omega}_\eta$, имеют место формулы

$$\hat{W}_\xi > \hat{W}_\eta, \quad \text{если } H < 1$$

(при всех значениях τ , кроме $\tau = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$, точки границы Γ_ξ пластины ξ обгоняют точки границы Γ_η стенки η);

$$\hat{W}_\xi < \hat{W}_\eta \quad \text{если } H > 1$$

(при всех значениях τ , кроме $\tau = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$, точки границы Γ_ξ пластины ξ отстают от точек границы Γ_η стенки η);

$$W_\xi = W_\eta, \quad \text{если } H = 1$$

(при всех значениях τ скорости движения точек границ Γ_ξ и Γ_η по окружностям совпадают).

Здесь

$$H = \frac{r_\xi(r_\xi + 1)}{4\pi\mathcal{K}\hat{\omega}_\eta} \tilde{\mu} C Re.$$

Внешнее силовое воздействие, обеспечивающее синхронность движения пластины ξ и стенки η , определяется формулами

$$\mu_{\text{ext}} = \tilde{\mu} \cos 2\pi\tau \quad \text{для } \varphi = \pi / 2;$$

$$\mu_{\text{ext}} = \tilde{\mu} \left\{ C \sin 2\pi\tau + \pi \frac{\hat{\omega}_\eta}{\tilde{\Gamma}} \left[2 + \pi \varkappa (r_\xi^2 - 1) \right] \cos 2\pi\tau \right\} \quad \text{для } 0 < \varphi < \pi / 2;$$

$$\mu_{\text{ext}} = \tilde{\mu} \left\{ - C \sin 2\pi\tau + \pi \frac{\hat{\omega}_\eta}{\tilde{\mu}} \left[2 + \pi \varkappa (r_\xi^2 - 1) \right] \cos 2\pi\tau \right\} \quad \text{для } \pi / 2 < \varphi < \pi.$$

Заключение

В работе рассмотрена новая задача о вращательном движении гидромеханической системы с вязкой жидкостью в присутствии внешнего периодического по времени силового воздействия на систему. Найдено точное решение задачи. Проанализирована динамика системы при больших и малых значениях числа Рейнольдса. Установлена возможность синхронизации вращательного движения твердых частей гидромеханической системы посредством внешнего периодического воздействия. Сформулированы условия, при выполнении которых твердые части гидромеханической системы совершают (или не совершают) синхронное вращательное движение. Обнаружено, что требование синхронности вращательного движения твердых частей системы не является достаточным для однозначного определения вращательного движения свободной твердой части гидромеханической системы.

Результаты работы могут использоваться, в частности, при поиске новых, перспективных подходов к решению актуальных научно-технических проблем.

Список литературы

1. Сенников В.Л. Парадоксальное движение жидкости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8. Ч. 1. С. 28–33. DOI: 10.17513/mjrfi.11753.
2. Сенников В.Л. О движении вязкой жидкости со свободной границей // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2024. Т. 166. Кн. 1. С. 99–110. DOI: 10.26907/2541-7746.2024.1.99-110.
3. Сенников В.Л. О возможности синхронизации движения твердых частей гидромеханической системы с вязкой жидкостью // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2025. № 6. С. 29–32. DOI: 10.17513/mjrfi.13733.
4. Козлов В.Г., Субботин С.В. Осредненное течение, генерируемое ядром, колеблющимся во вращающейся сферической полости // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 1. С. 28–38. DOI: 10.15372/PMTF20180104.
5. Власова О.А., Козлов В.Г., Козлов Н.В. Динамика тяжелого тела, находящегося во вращающейся кювете с жидкостью, при модуляции скорости вращения // Прикладная

механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 2. С. 39–49. DOI: 10.15372/PMTF20180205.

6. Щипицын В.Д. Колебания неосесимметричного цилиндра в заполненной жидкостью полости, совершающей вращательные осцилляции // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. Вып. 15. С. 43–46. DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49749.18349.

7. Коновалов В.В., Любимова Т.П. Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. Т. 12. № 1. С. 48–56. DOI: 10.7242/1999-6691/019.12.1.5.

8. Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Скуридин Р.В. Численное исследование влияния аксиальных вибраций конечной амплитуды и частоты на течения и деформации поверхности жидкой зоны в условиях невесомости. // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 4. С. 455–461. DOI: 10.7242/19996691/2019.12.4.39.

9. Коновалов В.В., Любимова Т.П., Прокопьев С.А. Взаимодействие газового пузыря и твердой частицы в жидкости под действием акустических вибраций // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Т. 16. № 2. URL: <https://journal.permsc.ru/index.php/ccm/issue/view/217>. С. 141–149. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.2.11.

10. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Гуальтерри К., Лэйн С.Н., Ру Б. Влияние гидродинамических режимов на смешение вод сливающихся рек // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Т. 11. № 3. С. 354–361. DOI: 10.7242/1999-6691/2018.11.3.26.

11. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н. Численное моделирование отведения высокоминерализованных сточных вод в водные объекты с целью усовершенствования конструкций выпускных устройств // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 4. С. 427–434. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.4.36.

12. Иванцов А.О., Клименко Л.С., Любимова Т.П., Ру Б. Численное моделирование выпускной трубы двигателя с системой активного шумоподавления // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 4. С. 389–397. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.4.32.

13. Карпунин И.Э., Козлов В.Г. Осцилляционная динамика границы раздела жидкостей в радиальной ячейке Хеле – Шоу // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 3. С. 62–73. DOI: 10.15372/PMTF202215190.

14. Сенников В.Л. О движении гидромеханической системы с вязкой жидкостью при периодических воздействиях // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2025. Т. 167. Кн. 1. С. 125–139. DOI: 10.26907/2541-7746.2025.1.125-139.

15. Сенников В.Л. О структуре течения вязкой жидкости при периодических воздействиях, не имеющих выделенного направления в пространстве // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33. № 4. С. 531–544. DOI: 10.18500/0869-6632-003163.

СТАТЬЯ

УДК 54:664.292

**СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ СОЧЕТАННОЙ
ГИДРОФОБИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ПЕКТИНА****Серикова Л.В., Худайбергенова Э.М.***Институт химии и фитотехнологий Национальной академии наук
Кыргызской Республики, Бишкек, e-mail: luda-0729@mail.ru*

Пектин из-за своей способности образовывать гель в кислых условиях и растворяться в щелочных средах все чаще применяется в системах доставки лекарственных средств в желудочно-кишечном тракте. Гелеобразующие свойства пектина способствуют увеличению времени контакта лекарственных средств в организме. Для повышения эффективности использования пектиновых материалов в системах доставки лекарственных средств в медицине химическую структуру пектина модифицируют введением гидрофобных фрагментов. В настоящей работе представлены данные экспериментов по сочетанной гидрофобизации структуры пектина. На первом этапе в структуру пектина введены гидрофобные фрагменты в результате реакции с гидроксидом тетрабутиламмония с получением тетрабутил пектина. В последующем проведена реакция перекрестной этерификации тетрабутил пектина путем реакции свободных карбоксильных групп пиранозного цикла с предварительно синтезированным метиловым эфиром каприловой кислоты. Структура синтезированных продуктов изучалась методами FTIR- и ¹H-ЯМР спектроскопии. Проведен термогравиметрический анализ полученных образцов. Затем в формовочные гранулы, сформированные соответственно из нативного пектина, а также из модифицированного пектина, загрузили аспирин и изучали процесс высвобождения лекарственного средства из этой среды. Показано, что продолжительность и полнота высвобождения лекарственного средства увеличивается в случае использования модифицированного пектина по сравнению с нативным пектином. Эффективность использования модифицированного пектина для доставки лекарственных средств может быть обусловлена особенностями морфологии его частиц, связанными с введением в структуру гидрофобных фрагментов.

Ключевые слова: пектин, гидрофобизация, перекрестная этерификация, доставка лекарственных средств**SYNTHESIS AND PROPERTIES OF PRODUCTS OF COMBINED
HYDROPHOBIZATION OF PECTIN STRUCTURE****Serikova L.V., Khudaybergenova E.M.***Institute of Chemistry and Phytotechnologies of the National Academy
of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, e-mail: luda-0729@mail.ru*

Pectin, due to its ability to form a gel under acidic conditions and dissolve in alkaline media, is increasingly used in drug delivery systems in the gastrointestinal tract. The gel-forming properties of pectin help to increase the contact time of drugs in the body. To increase the efficiency of using pectin materials in drug delivery systems in medicine, the chemical structure of pectin is modified by introducing hydrophobic fragments. This work presents experimental data on combined hydrophobization of the pectin structure. At the first stage, hydrophobic fragments are introduced into the pectin structure as a result of reaction with tetrabutylammonium hydroxide to produce tetrabutyl pectin. Subsequently, the cross-esterification reaction of tetrabutyl pectin was carried out by reacting the free carboxyl groups of the pyranose ring with the previously synthesized caprylic acid methyl ester. The structure of the synthesized products was studied by FTIR and ¹H-NMR spectroscopy. Thermogravimetric analysis of the obtained samples was carried out. Next, aspirin was loaded into molding granules, formed respectively from native pectin and from modified pectin, and the process of drug release from this medium was studied. It has been shown that the duration and completeness of drug release increases when modified pectin is used compared to native pectin. The effectiveness of using modified pectin for drug delivery may be due to the morphology of its particles associated with the introduction of hydrophobic fragments into the structure.

Keywords: pectin, hydrophobization, cross-esterification, drug delivery**Введение**

Пектины представляют собой семейство сложных полисахаридов, которые содержат 1,4-связанные α-D-галактозилуриновые остатки. В ряду пектиновых полисахаридов особый интерес вызывает гомогалактуронан (HG), представляющий собой линейную цепочку из 1,4-связанных остатков α-D-галактозилуриновой кислоты, в которой некоторые карбоксильные группы метилэтерифицированы. Они также могут быть O-ацетилованы в положениях C-2 и C-3 [1–3].

Степень этерификации (СЭ), которая выражается в процентах этерифицированных карбоксильных групп в молекуле пектина, является важным показателем для классификации пектинов. Пектины с высоким содержанием метоксильных групп (ВМ) (СЭ > 50 %) требуют относительно высокой концентрации растворимых твердых веществ и низкого рН для образования геля. Пектины с низким содержанием метоксильных групп (НМ) (СЭ < 50 %) образуют жесткие гели под действием кальция или многовалентных катионов, которые сшивают

цепи галактуроновой кислоты [4, 5]. Пектин широко применяется в пищевой промышленности при производстве джемов, желе, мороженого и других пищевых продуктов, где он действует как желирующий агент и загуститель [6, 7]. Особый интерес пектин вызывает для использования в медицине. Связано это с тем, что он относится к полисахаридам, контролировать свойства которых можно путем изменения уровня кислотности окружающей среды, то есть показания pH. В частности, полисахариды, гелеобразование которых зависит от pH, можно использовать при создании наноконтейнеров для адресной доставки лекарств, поскольку уровень кислотности различных органов и тканей различается [8–10]. Отсутствие токсичности и описанные здесь свойства пектинов делают их очень интересными и привлекательными для приготовления лекарственных форм с контролируемым высвобождением [11–13]. Пектин также благотворно влияет на здоровье человека в сочетании с антибактериальными и протекторными препаратами [14–16].

Целью данной работы является модификация структуры пектина посредством введения гидрофобных фрагментов в результате реакции с гидроксидом тетрабутиламмония и последующего алкилирования карбоксильных групп полученного продукта метиловым эфиром каприловой кислоты для дальнейшего использования в качестве носителя лекарственных средств.

Материалы и методы исследования

Все химические вещества, используемые в работе, включая пектин, каприловую кислоту, монокалийфосфат, гидроксид тетрабутиламмония, гидроксид натрия и другие реагенты, являлись коммерческими препаратами и материалами аналитического класса. FTIR-спектры были записаны на приборе ИК Фурье-спектрометр ФСМ 1201 с использованием KBr. Спектры ^1H -ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker AVANCE с частотой 400 МГц, в качестве растворителя для ЯМР-анализа использовали D_2O . Термограммы для термогравиметрического анализа (TGA) были получены на термогравиметрическом анализаторе TGA-C (Mettler Toledo, USA).

Приготовление метилового эфира каприловой кислоты. В фильтр объемом 100 мл с магнитным двигателем и обогревателем добавляется 1 г октановой кислоты. В качестве катализатора добавляется две капли метансульфоновой кислоты при перемешивании в течение 5 мин при температуре 70 °C. После этого добавляется около

2 мл (в 10 раз больше метилового спирта), который играет роль растворителя и реакционноспособного вещества одновременно, реакционная смесь перемешивается при температуре 70 °C в течение 4 ч, выход реакции отслеживается с помощью ТСХ. Для фиксации эфирного продукта использовалась смесь (25% н-гексана: 75% этилацетата). Количество жирной кислоты для получения метилового эфира составляло $69 \cdot 10^{-4}$ моль.

Модификация структуры пектина с использованием гидроксида тетрабутиламмония (ТБА-ОН). В фильтр объемом 100 мл с магнитной мешалкой добавляют (0,5 г $0,0028$ моль) пектина и 50 мл дистиллированной воды и перемешивают при температуре 40 °C. После этого добавляют тетрабутиламмоний (ТБА-ОН) по каплям при перемешивании до тех пор, пока реакция не завершится и не будет получен ярко-желтый раствор с pH 8–9. Затем раствор экстрагируют с помощью морозильной камеры в течение 72 ч для получения гибкого желтого полимера, который хорошо растворим в сульфоксиде натрия.

Получение сложного эфира тетрабутиламмонийного пектина (Рес-ТБА). В дополнение к продукту реакции первой фазы добавляют (0,6 г) тетрабутиламмонийного пектина (ТБА-пектин) и 10 мл карбоната калия в качестве катализатора (0,4 г / 10 мл) при 70 °C, перемешивают в течение 6 ч. Полученный продукт отделяется 100 мл ацетата, фильтруется, промывается несколько раз метиловым спиртом (около 5 мл), осаждается этилацетатом, фильтруется и сушится в вакууме при температуре 40 °C в течение 24 ч. Далее полученное соединение помещают в фильтр объемом 100 мл с магнитной мешалкой, содержащим 10 мл воды, и добавляют карбонат калия по каплям до полного разложения, затем раствор экстрагируют с помощью морозильной камеры в течение 72 ч и температуре 40 °C. Выход конечного продукта составил 75%.

Загрузка лекарственного средства (аспирин) в гранулы из пектина и сложного эфира пектина. В фильтр объемом 100 мл с магнитной мешалкой добавляют 0,3 г продукта и 10 мл воды, перемешивают в течение получаса при температуре 30 °C. После получения вязкого раствора добавляют 0,2 г аспирина и перемешивают в течение 2 ч. Гранулы, сформированные каплями с помощью шприца (рис. 1), в водном растворе 10%-ного хлорида цинка в форме шариков геля, отделяли от водного раствора путем фильтрации, промывали дистиллированной водой и сушили при 40 °C в течение 24 ч.

Изучение высвобождения лекарственного средства. В фильтр объемом 100 мл с магнитной мешалкой добавляют 10 гранул и 50 мл раствора N монокалийфосфата при перемешивании. Концентрацию аспирина определяют путем измерения спектров поглощения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах при 234 нм в течение 100 мин (каждые 10 мин).

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе был получен сложный эфир каприловой кислоты ($C_{17}H_{33}O_2$) с использованием метансульфоновой кислоты в качестве кислотного катализатора, как показано на схеме 1.

Структура полученного сложного эфира была подтверждена с помощью ИК-спектроскопии. ИК-спектры жирных кислот характеризуются несколькими основными полосами поглощения, связанными с колебаниями различных связей в их молекулах. В спектрах каприловой кислоты (рис. 1, а) четко выражены следующие полосы. В области $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ наблюдается широкое и интенсивное поглощение, обусловленное валентными колебаниями связей С-Н в группах $-CH_2$ и $-CH_3$. Валентные колебания карбонильной группы ($C=O$) в $COOH$ и сложноэфирных группах ($-COOR$). Деформационные колебания

связи С-Н в группах ($-CH_2$ и $-CH_3$) проявляются при 1400 см^{-1} . Колебания связи С-О в карбоксильных и сложноэфирных группах поглощают при 1200 см^{-1} . В области $720\text{--}730\text{ см}^{-1}$ поглощение характерно для ($-CH_2$). В ИК-спектрах сложных эфиров (рис. 1, б) по сравнению с каприловой кислотой наблюдается изменение величины поглощения как карбонильной, так и сложноэфирной групп. Валентные колебания карбонильной группы смещены в высокочастотную область и проявляются в виде характеристической полосы в диапазоне $1750\text{--}1725\text{ см}^{-1}$. Кроме того, исчезает широкая полоса поглощения в области $3300\text{--}2500\text{ см}^{-1}$. Четко проявляется полоса деформационных колебаний CH_3 группы в области $1300\text{--}1000\text{ см}^{-1}$. Для метиловых эфиров характерны две полосы при 1245 и 1195 см^{-1} .

На втором этапе был получен тетрабутиламмоний пектина (ТВА-пектин).

Гидроксид тетрабутиламмония добавляли в водный раствор пектина капельным способом и перемешивали при температуре 40°C , где pH колебался в пределах 8–9. Тетрабутиламмониевый пектин был выделен с помощью морозильной камеры, и структура полученного соединения была изучена с помощью методов спектроскопии. Масса осадка составляет 1,058 г, выход 90,65%, степень замещения 66,91 %.

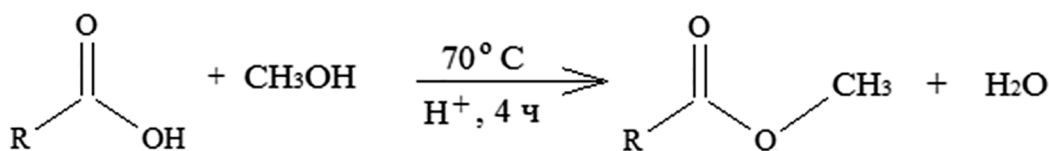


Схема 1

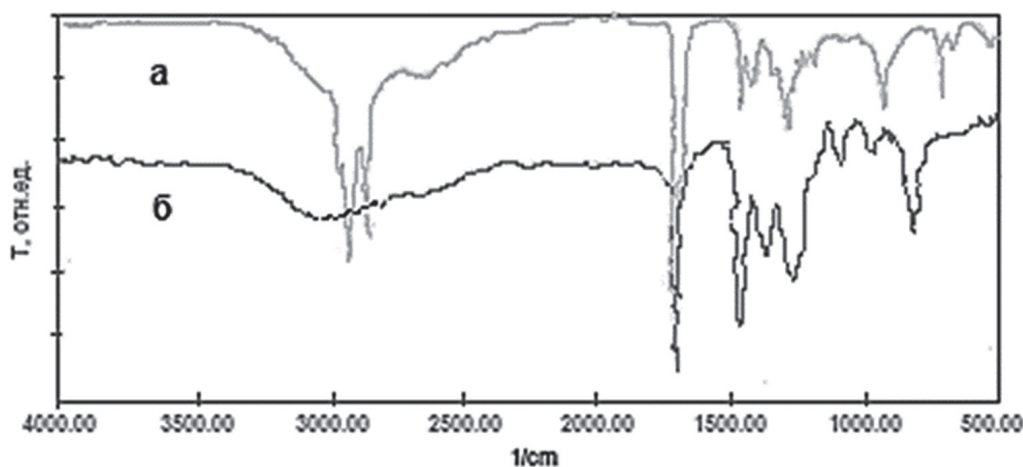


Рис. 1. ИК-спектры (а) каприловой кислоты и (б) метилового эфира каприловой кислоты
Источник: составлено авторами

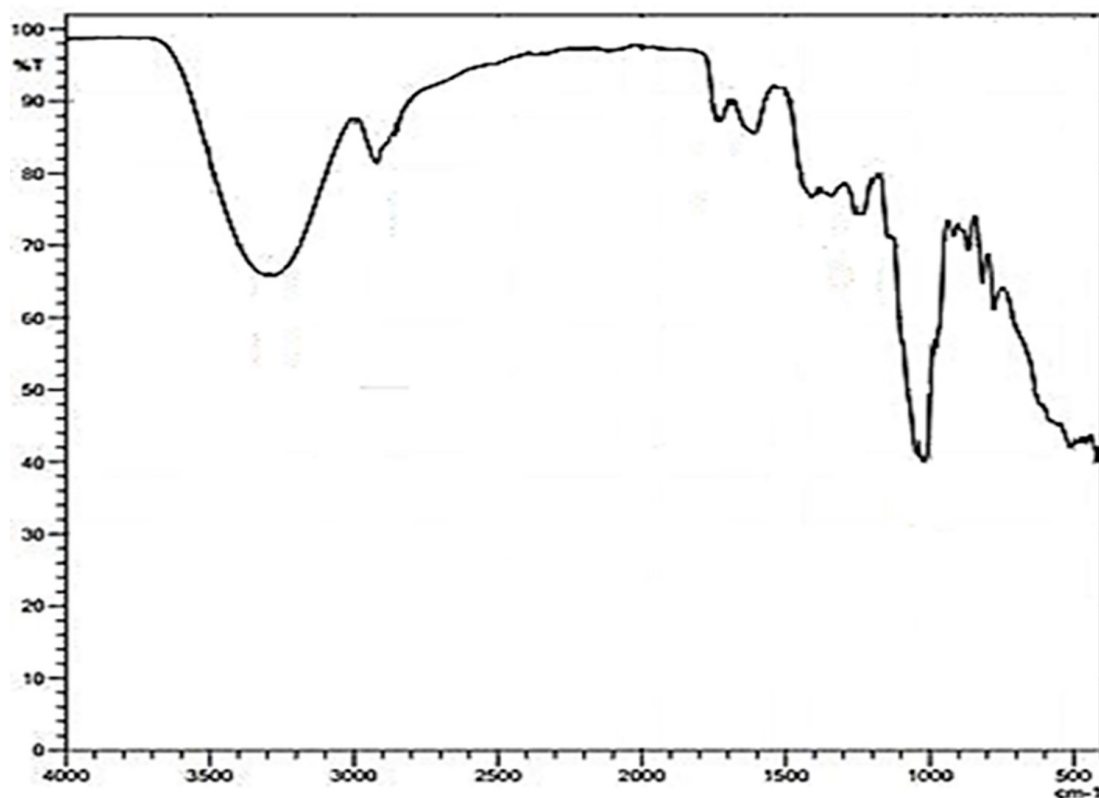


Рис. 2. ИК-спектры пектина
Источник: получено авторами

После этого получен сложный эфир пектина (Э-ТБА-пектин) путем перекрестной реакции этерификации сложного эфира каприловой кислоты с тетрабутиламмониевым пектином с использованием карбоната калия

K_2CO_3 в качестве катализатора при 70 °С, время реакции 6 ч. В конце реакции выход из аммонийной формы в натриевую преобразуется с использованием карбоната натрия (схема 3). Выход конечного продукта – 75%

В ИК-спектрах гидрофобизированных образцов пектина (рис. 2) имеет место широкое поглощение в области $3450\text{--}3300\text{ см}^{-1}$, относящееся к валентным колебаниям ОН-групп и водородным связям в структуре полимера. При 1750 см^{-1} и 1630 см^{-1} наблюдаются пики, вызванные симметричным и асимметричным колебаниями ионизированных карбоксильных групп. Проявляются полосы поглощения, характерные для метиловых эфиров в области низких частот $1250\text{--}1200\text{ см}^{-1}$. Деформационные колебания связи О-Н в гидроксильных группах поглощают при 1030 см^{-1} . Флуктуация спиртовых групп вызывает слабое поглощение в области $950\text{--}900\text{ см}^{-1}$.

Данные ^1H ЯМР спектроскопии нативного и гидрофобизированного пектина поч-

ти не отличаются, поэтому в работе приведен протонный спектр последнего (рис. 3). В спектре пектина в области сильного поля ($0,97\text{--}1,01$ м.д. а также $1,46\text{--}1,74$ м.д.) проявляются сигналы СН групп, находящихся в положении 4. Протоны, связанные с атомом углерода в положении 1 пиранозного цикла, резонируют при $3,34\text{--}3,38$ м.д. Химические сдвиги при $3,43\text{--}3,59$ м.д. относятся к протонам углерода в положении 2 и 3 галактопиранозилуринового фрагмента. Протон углерода, связанного с карбоксильной группой, резонирует в области слабого поля ($5,22\text{--}5,24$ м.д.) Для метоксильной и карбоксильной групп свойственно проявление сигнала при $3,67\text{--}3,91$ м.д. соответственно.

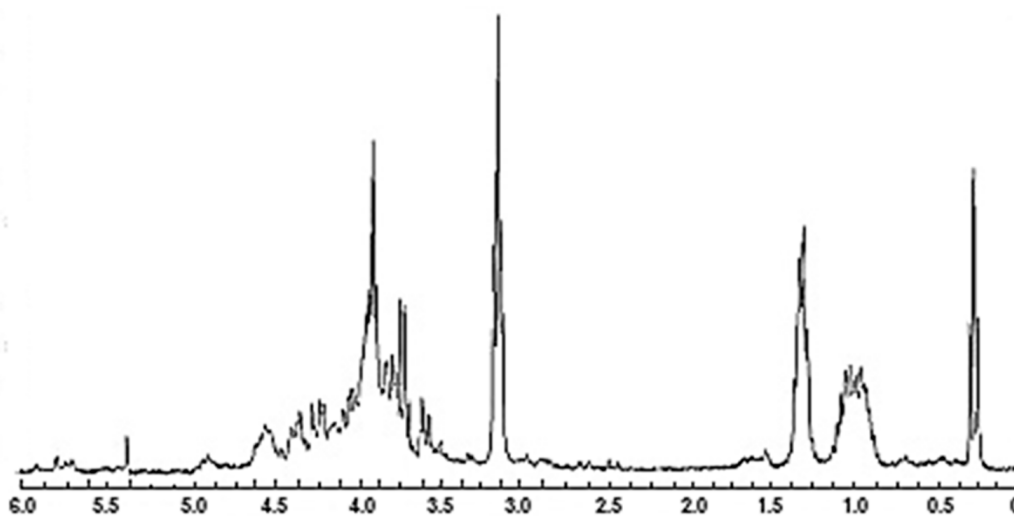


Рис. 3. ^1H ЯМР-спектры гидрофобизированного пектина
Источник: составлено авторами

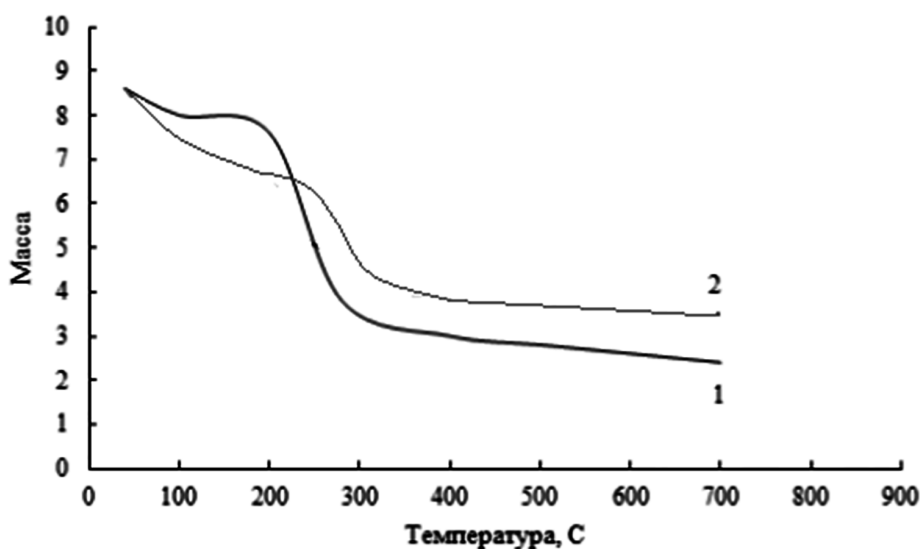


Рис. 4. Кривые термогравиметрического анализа (TGA) для пектина (1) и Э-ТБА-пектина (2)
Источник: составлено авторами

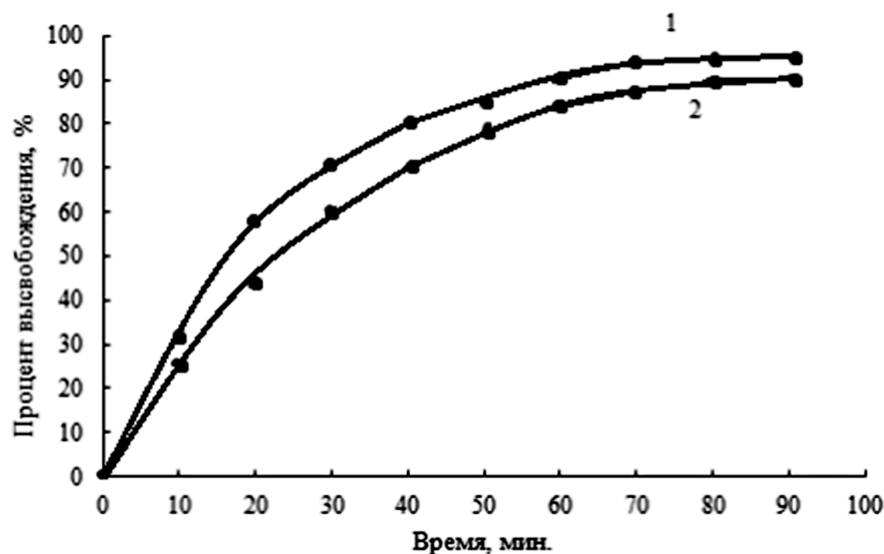


Рис. 5. Кривые продолжительности высвобождения аспирина из пектина (1) и пектинового эфира (2)
Источник: составлено авторами

Кривые TGA для полученных соединений использовали для определения их термостабильности и сравнения с исходным материалом. На рис. 4 показана кривая количественного термического анализа нативного пектина и его гидрофобизированного производного.

На первой области кривой (1) наблюдается небольшой перегиб при температуре 70 °С, где потеря массы образца составляет около 8 %, что следует отнести к потере влажности образца. Далее, при температуре 200 °С происходит значительная потеря массы образца примерно на 50 %, что соответствует термическому распаду пектина. Температура выше 400 °С отвечает обжигу соединения и его сгоранию. Как показано на кривой (2), влажность ТВА пектина устраняется дольше и при более высоких температурах. Распад полимера начинается также с 200 °С и протекает в два этапа. Полный распад начинается с 300 °С. Термогравиметрические данные показывают, что модифицированный пектин является более термостабильным.

На рис. 5 показана эффективность высвобождения аспирина как из пектина, так и из гидрофобизированного пектина в зависимости от времени. Как видно, лекарственное средство высвобождается из модифицированного пектина в течение более длительного времени и в меньшем объеме, чем из пектина, что может быть обусловлено гидрофобными фрагментами, препятствующими проникновению молекул воды между полимерными цепями.

Заключение

Молекулярная структура пектина модифицирована с использованием сочетанного метода, включающего взаимодействие с трибутиламмоний гидроксида и перекрестной этерификацией с метиловым эфиром каприловой кислоты. Соединения охарактеризованы спектральными методами. Установлено увеличение продолжительности и объема высвобождения лекарственного средства, связанного с модифицированным пектином, по сравнению с нативным пектином. Эксперименты показывают возможность использования представленного гидрофобизированного пектина в системах доставки лекарственных средств.

Список литературы

1. Sousa A.G., Nielsen H.L., Armagan I., Larsen J., Sørensen S.O. The impact of rhamnogalacturonan-I side chain monosaccharides on the rheological properties of citrus pectin // Food Hydrocoll. 2015. Vol. 47. P. 130–139. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.01.013.
2. Ishwarya P.S., Sandhya R., Nisha P. Advances and prospects in the food applications of pectin // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022. Vol. 62. P. 4393–4417. DOI: 10.1080/10408398.2021.1875394.
3. Freitas C.M.P., Coimbra J.S.R., Souza V.G.L., Souza R.C.S. Structure and applications of pectin in food, biomedical, and pharmaceutical industry: a review // Coatings. 2021. Vol. 11. P. 922. DOI: 10.3390/coatings11080922.
4. Zdunek A., Pieczywek P.M., Cybulska J. The primary, secondary, and structures of higher levels of pectin polysaccharides // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2021. Vol. 20. P. 1101–1117. DOI: 10.1111/1541-4337.12689.
5. Ngoumazong D.E., Tengweh F.F., Fraeye I., Duvetter T., Cardinaels R., Van Loey A., Moldenaers P., Hendrickx M. Effect of de-methylesterification on network development and nature of Ca²⁺-pectin gels: Towards understanding structure–function

- relations of pectin // *Food Hydrocoll.* 2012. Vol. 26. P. 89–98. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.04.002.
6. Kumar M., Tomar M., Saurabh V., Mahajan T., Punia S., del Mar Contreras M., Rudra Sh.G., Ch. Kaur, Kennedy J.F. Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging // *Trends Food Sci. Technol.* 2020. Vol. 105. P. 223–237. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.009.
7. Panahirad S., Dadpour M.M., Peighambaroust S.H., Soltanzadeh M., Gullon B., Alirezalu K., Lorenzo J.M. Applications of carboxymethyl cellulose-and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: a review // *Trends Food Sci. Technol.* 2021. Vol. 110. P. 663–673. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.025.
8. Almeida E., Facchib S., Martinsa A., Nocchic S., Schuquela I., Nakamurac C. et al. Synthesis and characterization of pectin derivative with antitumor property against Caco-2 colon cancer cells // *Carbohydrate Polymers.* 2015. Vol. 115. P. 139–145. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.085.
9. Cobos-Rosas M., Concha-Olmos J., Weinstein-Oppheimer C., Zuniga-Hansen M.E. Assessment of antiproliferative activity of pectic substances obtained by different extraction methods from rapeseed cake on cancer cell lines // *Carbohydrate Polymers.* 2015. Vol. 117. P. 923–932. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.10.027.
10. Blanco-Pérez F., Steigerwald H., Schülke S., Toda Masako, Scheurer S. The dietary fiber pectin: health benefits and potential for the treatment of allergies by modulation of gut microbiota // *Curr. Allergy Asthma Rep.* 2021. Vol. 21. P. 1–19. DOI: 10.1007/s11882-021-01020-z.
11. Sharma P., Gautam K., Pandey A.K., Pandey A.K., Gaur V.K., Farooqui A., Younis K. Chapter 6-pectin. Biomass, biofuels, biochemical // Elsevier, Amsterdam. 2021. P. 101–128. DOI: 10.1016/B978-0-12-821888-4.00020-4.
12. Gasilova E.R., Aleksandrova G.P., Tuhkunova I.V. Colloidal nanoparticles of sodium polygalacturonate prepared by nanoprecipitation // *Carbohydrate Polymers.* 2022. T. 291. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119521.
13. Мамедов Е.И., Дергунов Е.С., Калмыкова Е. Возможности биомедицинского применения модифицированных пектинов // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2021. Vol. 21 (1). С. 77–85. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3222.
14. Бердыш Д.С., Хакуй Э.Ш., Беслангулова З.А., Пустовет Д.А. Использование пектина в медицинской практике // *Международный научно-исследовательский журнал.* 2025. Вып. 4 (154). С. 76. DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.76.
15. Zhang S., Waterhouse G.I., Xu F., He Z., Du Y., Lian Y., Wu P., Sun-Waterhouse D. Recent advances in utilization of pectins in biomedical applications: a review focusing on molecular structure-directing health-promoting properties // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2023. Vol. 63. P. 3386–3419. DOI: 10.1080/10408398.2021.1988897.
16. Хван А.М., Абдуразаков А.Ш. Взаимодействие пектина с антибактериальным препаратом нитроксолином // *Химия растительного сырья.* 2023. № 3. С. 93–100. URL: <https://www.cnshe.ru/content/2023/04277465.pdf> (дата обращения: 05.07.2025).