

ISSN 2415-7058 (Print)
ISSN 2415-7066 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

4/2025

Редакционная коллегия журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки»

Главный редактор – д-р физ.-мат. наук, проф. **С.В. Беспалова**.

Зам. главного редактора – д-р биол. наук, проф. **О.С. Горецкий**.

Ответственный секретарь – канд. физ.-мат. наук **М.В. Фоменко**.

Члены редколлегии: д-р биол. наук, проф. **В.В. Акатов**, д-р хим. наук, проф. **А.С. Алемасова**; д-р биол. наук, проф. **В.Г. Артюхов**; канд. хим. наук, доц. **О.В. Баранова**; канд. хим. наук, доц. **С.Г. Бахтин**; д-р хим. наук, доц. **Н.И. Белая**; канд. хим. наук, доц. **А.В. Белый**; д-р философии, проф. **С.В. Белый**; д-р пед. наук, доц. **Т.В. Вардун**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вал.В. Волчков**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вит.В. Волчков**; д-р биол. наук, проф. **А.З. Глухов**; д-р физ.-мат. наук, проф. **А.С. Гольцев**; д-р биол. наук, доц. **С.Н. Горбов**; д-р хим. наук, проф. **А.В. Гулевская**; д-р биол. наук, доц. **Т.В. Денисова**; д-р хим. наук, проф. **В.Д. Дяченко**; д-р физ.-мат. наук, доц. **В.П. Заставный**; д-р физ.-мат. наук, доц. **А.В. Зыза**; д-р геогр. наук, проф. **К.Ш. Казеев**; д-р биол. наук, проф. **В.Н. Калаев**; канд. биол. наук, доц. **Е.А. Калаева**; д-р физ.-мат. наук, проф. **С.А. Калоеров**; д-р биол. наук, с.н.с. **О.Е. Клименко**; д-р с-х наук, проф. **С.И. Колесников**; д-р физ.-мат. наук, доц. **Б.И. Коносевич**; канд. биол. наук **В.О. Корниенко**; д-р хим. наук, проф. **Т.П. Кустова**; д-р биол. наук, доц. **Е.В. Лопатина**; д-р физ.-мат. наук, доц. **А.В. Мазнев**; д-р хим. наук, проф. **В.М. Михальчук**; д-р физ.-мат. наук, доц. **И.А. Моисеенко**; д-р биол. наук, проф. **И.В. Мухина**; д-р физ.-мат. наук, доц. **Р.Н. Нескородев**; д-р биол. наук, проф. **В.Б. Павленко**; д-р биол. наук, доц. **С.В. Погодина**; канд. биол. наук, доц. **А.И. Сафонов**; д-р биол. наук, проф. **В.И. Соболев**; д-р техн. наук, проф. **В.И. Сторожев**; д-р биол. наук, доц. **В.В. Труш**; д-р хим. наук **Т.Г. Тюрина**; д-р биол. наук, доц. **М.Г. Холявка**; д-р хим. наук, доц. **И.Н. Щербakov**.

**The Editorial Board of the journal “Bulletin of Donetsk National University.
Series A: Natural Sciences”**

The Editor-in-Chief – Dr. of phys. and math., prof. **S.V. Bespalova**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Dr. of biol., prof. **O.S. Goretskii**.

Executive Secretary – Cand. of phys. and math. **M.V. Fomenko**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of biol., prof. **V.V. Akatov**; Dr. of chem., prof. **A.S. Alemasova**; Dr. of biol., prof. **V.G. Artyuhov**; Cand. of chem., docent **O.V. Baranova**; Cand. of chem., docent **S.G. Bahtin**; Dr. of chem., docent **N.I. Belaya**; Cand. of chem., docent **A.V. Belyj**; Dr. of philosophy, prof. **S.V. Belyi**; Dr. of Ped. docent **T.V. Varduni**; Dr. of phys. and math., prof. **Val.V. Volchkov**; Dr. of phys. and math., prof. **Vit.V. Volchkov**; Dr. of biol., prof. **A.Z. Glukhov**; Dr. of phys. and math., prof. **A.S. Goltsev**; Dr. of biol., docent **S.N. Gorbov**; Dr. of chem., prof. **A.V. Gulevskaya**; Dr. of biol., docent **T.V. Denisova**; Dr. of chem., prof. **V.D. Dyachenko**; Dr. of phys. and math., docent **V.P. Zastavnyj**; Dr. of phys. and math., docent **A.V. Zyza**; Dr. of geogr. prof. **K.Sh. Kazeev**; Dr. of biol., prof. **V.N. Kalaev**; Cand. of biol., docent **E.A. Kalaeva**; Dr. of phys. and math., prof. **S.A. Kaloerov**; Dr. of biol., s.r. **O.E. Klimenko**; Dr. of Agric. prof. **S.I. Kolesnikov**; Dr. of phys. and math., docent **B.I. Konosevich**; Cand. of biol. **V.O. Kornienko**; Dr. of chem., prof. **T.P. Kustova**; Dr. of biol., docent **E.V. Lopatina**; Dr. of phys. and math., docent **A.V. Mazniev**; Dr. of chem., prof. **V.M. Mikhal'chuk**; Dr. of phys. and math., docent **I.A. Moiseyenko**; Dr. of biol., prof. **I.V. Muhina**; Dr. of phys. and math., docent **R.N. Neskorodev**; Dr. of biol., prof. **V.B. Pavlenko**; Dr. of biol., docent **S.V. Pogodina**; Cand. of biol., docent **A.I. Safonov**; Dr. of biol., prof. **V.I. Sobolev**; Dr. of tech., prof. **V.I. Storozhev**; Dr. of biol., docent **V.V. Trush**; Dr. of chem. **T.G. Tyurina**, Dr. of biol., docent **M.G. Holyavka**, Dr. of chem., docent **I.N. Shcherbakov**.

Адрес редакции: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
ул. Университетская, 24, г. Донецк, ДНР, РФ.

Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92. **E-mail:** vestnikdonnu_a@mail.ru **URL:** <http://donnu.ru/vestnikA>

С 09.04.2024 г. научный журнал «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки» (далее – Журнал) включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **K2** с 30.05.2025 г.) по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

физико-математические науки: 1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ, 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела;
химические науки: 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия;
биологические науки: 1.5.2. Биофизика, 1.5.5. Физиология человека и животных, 1.5.15. Экология, 1.5.19. Почвоведение.

Журнал включен в перечень **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г.). Информация об статьях отражается в Реферативном журнале и Базах данных **ВИНИТИ РАН** (договор о сотрудничестве от 11.04.2011 г.).

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Протокол № 11 от 26.09.2025 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2025

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А. Естественные науки

№ 4

Донецк 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Механика

- Калоеров С. А., Полянский М. А. Исследование электровязкоупругого состояния много-
связной пьезопластинки 5

Химические науки

- Белюсова Е. Е., Голубович В. С., Хомутова Е. В., Яблочкова Н. В. Физико-химическое ис-
следование процессов образования изополиванадатов в водно-органических средах 18
- Кострюков С. Г., Асфандеев А. Ю. Количественный анализ лигнина, целлюлозы и геми-
целлюлоз в растительных материалах по ИК-спектрам с использованием математи-
чески смоделированных калибровочных зависимостей 32
- Верескун А. Д., Радченко Д. Э., Михальчук В. М., Лыга Р. И., Мальцева Н. А., Глазунова В. А.,
Николаева О. Ф. Оксид церия в составе эпоксидных композитов и антикоррозионных
покрытий 42

Биологические науки

- Аникина Е. А., Чуфицкий С. В., Романчук С. М., Горбунов Р. И., Сергеева Е. С. Флуори-
метрическая оценка фотосинтетической активности клеток микроводорослей при
проведении биотестирования 53
- Анищенко Л. Н., Гайворонская А. А. К мониторингу эпифитной лишенобиоты эталон-
ных и биологически ценных лесов Брянской области 61
- Богданова М. А., Соков С. А. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах города
Тольятти 71
- Дудагова Э. Ш., Астамирова М. А.-М., Тайсумов М. А., Магомадова Р. С. Список видов
лекарственных растений бассейна реки Аргун Чеченской Республики 80
- Золотавина М. Л., Гайдабура Е. А., Братова А. В., Вековищева О. Ю., Чернявская О. В.
Биохимические маркеры крови в острые периоды COVID-19 и гриппа А 86
- Логонов П. В., Памешова А. К., Ломтева Н. А. Корректирующие эффекты полифеноль-
ных экстрактов имбиря на репродуктивные процессы при воздействии микровол-
нового излучения 96
- Лопатина Е. В., Труш В. В., Соболев В. И. L-карнитин: физиологические эффекты, ре-
алии и перспективы применения в медицине 105
- Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А. Эколого-экономическая оценка эффек-
тивности внедрения мероприятий по рекультивации техногенно-засоленных почв 130

<i>Саркисян Д. С., Чолутаева Э. Э., Шевченко В. Н., Старостин Д. В., Мартынюк И. О.</i> Обзор основных паразитарных и вирусных заболеваний в аквакультуре	138
<i>Тодороски К., Пушкин Д. С.</i> Психофизиологические аспекты подготовки юниоров в современном спорте	155
<i>Фрунзе О. В.</i> Влияние культуральной жидкости гриба <i>T. hirsuta</i> ТН-11 на морфометрические показатели проростков <i>Brassica juncea</i> L. в условиях загрязнения почвы ионами кадмия	160

CONTENTS

Mechanics

- Kaloerov S. A., Polianskii M. A. Study of the electroviscoelastic state of a multi-connected piezoplate 5

Chemical sciences

- Belousova E. E., Golubovich V. S., Khomutova E. V., Yablochkova N. V. Physico-chemical study of the processes of isopolivanadate formation in aqueous-organic medium 18
- Kostryukov S. G., Asfandeyev A. Yu. Quantitative analysis of lignin, cellulose, and hemicelluloses in plant materials using IR spectroscopy and mathematically modeled calibration curves 32
- Vereskun A. D., Radchenko D. E., Mikhal'chuk V. M., Lyga R. I., Maltseva N. A., Glazunova V. A., Nikolaeva O. F. Cerium oxide in epoxy composites and anti-corrosion coatings 42

Biological sciences

- Anikina E. A., Chufitskiy S. V., Romanchuk S. M., Gorbunov R. I., Sergeeva E. S. Fluorimetric assessment of photosynthetic activity of microalgae cells during biotesting 53
- Anishchenko L. N., Gaivoronskaya A. A. To the monitoring of epiphytic lichen biota of reference and biologically valuable forests of the Bryansk region 61
- Bogdanova M. A., Sokov S. A. Assessment of heavy metal contamination in soils of Togliatti city 71
- Dudagova E. Sh., Astamirova M. A.-M., Taisumov M. A., Magomadova R. S. List of medicinal plants of the Argun river basin of the Chechen Republic 80
- Zolotavina M. L., Gaydabura E. A., Bratova A. V., Vekovishcheva O. Yu., Chernyavskaya O. V. Biochemical markers of blood in acute periods of COVID-19 and influenza A 86
- Loginov P. V., Pameshova A. K., Lomteva N. A. Correcting effects of ginger polyphenolic extracts on reproductive processes under exposure of microwave radiation 96
- Lopatina E. V., Trush V. V., Sobolev V. I. L-carnitine: physiological effects, realities and prospects for use in medicine 105
- Nosova M. V., Seregina V. P., Stovbunik S. A. Ecological and economic assessment of the efficiency of implementation of measures for recultivation of technogenically saline soils 130

<i>Sarkisyan D. S., Cholutaeva E. E., Shevchenko V. N., Starostin D. V., Martyniuk I. O.</i> Overview of the main parasitic and viral diseases in aquaculture	138
<i>Todoroski K., Pushkin D. S.</i> Psychophysiological aspects of junior training in modern sports....	155
<i>Frunze O. V.</i> The effect of the culture fluid of the <i>T. hirsuta</i> TH-11 fungus on the morphometric parameters of <i>Brassica juncea</i> L. seedlings in conditions of soil contamination with cadmium ions	160

МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.5281/zenodo.17199804

EDN: RMIZXP

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОСВЯЗНОЙ ПЬЕЗОПЛАСТИНКИ

© 2025. С. А. Калоеров, М. А. Полянский

Решена задача электровязкоупругости для многосвязной пластинки с произвольными отверстиями и трещинами. При этом комплексные потенциалы электроупругости представлены рядами по степеням малого параметра с коэффициентами в виде неизвестных функций приближений; получены граничные условия для определения функций приближений и общие представления этих функций для многосвязной области, содержащие ряды Лорана с неизвестными коэффициентами, определение которых из граничных условий обобщенным методом наименьших квадратов сведено к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений. После определения функций приближений представлением коэффициентов упругой деформации временными операторами и их вычислением находятся основные характеристики электроупругого состояния пластинки в любой момент времени. Численные исследования проведены для пластинки с двумя круговыми отверстиями с жестко подкрепленными контурами, с линейным включением и круговым отверстием. Установлено, что с течением времени значения напряжений и индукций около контуров отверстий и линейных включений значительно изменяются, причем наибольшие изменения этих величин наблюдаются в первые 10 часов после приложения нагрузки, значительные изменения этих величин наблюдаются вплоть до 40–50 часов, но переход в стационарное состояние занимает много времени; при переходе в стационарное состояние значения напряжений и индукций претерпевают большие изменения; на значения и характер изменения этих величин значительно влияют физико-механические свойства материала и геометрические характеристики отверстий и трещин.

Ключевые слова: электровязкоупругость, комплексные потенциалы, метод малого параметра, временные операторы, обобщенный метод наименьших квадратов, коэффициенты интенсивности напряжений и индукций.

Введение. В различных отраслях современной науки и техники широкое применение получили элементы конструкций из пьезоматериалов [1–5]. При эксплуатации таких конструкций под действием различных механических сил и электрических полей вблизи имеющихся в элементах отверстий и трещин возникают высокие концентрации напряжений, которые могут приводить к потере прочности конструкций, что нужно учитывать при их проектировании и эксплуатации. В связи с этим необходимо разрабатывать методы определения электроупругого состояния (ЭУС) тел. Для случая тонких пластин достаточно надежные результаты при исследованиях ЭУС получаются при использовании комплексных потенциалов. Эти функции были введены в работе [6] для решения задач электромагнитоупругости и для частного случая – электроупругости. Эти же функции можно использовать и при исследованиях вязкоупругого состояния пластин во времени, если для определения комплексных потенциалов использовать метод малого параметра.

В данной статье с использованием метода малого параметра и комплексных потенциалов дано общее решение задачи электровязкоупругости для пьезопластинки с произвольными отверстиями и трещинами. Описаны результаты численных исследований для пластинки с двумя отверстиями с жестко подкрепленными контурами, для пластинки с отверстием и прямолинейной трещиной также с жестко подкрепленными контурами. Установлены закономерности изменения ЭУС пьезопластинки в зависимости от времени, от ее геометрических характеристик, физико-механических свойств ее ма-

териала и вида внешнего воздействия. Изучено влияние полного или частичного учета пьезосвойств материала на значения напряжений и индукций.

Постановка и метод решения задачи. Рассмотрим бесконечную пьезопластинку, занимающую многосвязную область S (рис. 1), ограниченную контурами эллиптических отверстий L_l с полуосями a_l, b_l ($l = \overline{1, L}$). Отнесем пластинку к прямоугольной декартовой системе координат Oxy , контуры отверстий L_l – к локальным системам координат $O_l x_l y_l$ с началами в центрах L_l и направлениями осей $O_l x_l$ вдоль полуосей a_l так, что их параметрические уравнения в локальных и в основной системах координат имеют вид

$$x_l = a_l \cos \theta, \quad y_l = b_l \sin \theta, \quad (1)$$

$$x = x_{0l} + x_l \cos \varphi_l - y_l \sin \varphi_l, \quad y = y_{0l} + x_l \sin \varphi_l + y_l \cos \varphi_l, \quad (2)$$

где x_{0l}, y_{0l} – координаты локальной системы координат $O_l x_l y_l$ в основной системе Oxy , φ_l – угол между осями $O_l x_l$ и Ox , отсчитываемый от Ox против часовой стрелки. Каждый из эллипсов может переходить в прямолинейный разрез (для которого в дальнейшем будем считать $b_l = 0$), контуры криволинейных отверстий можно аппроксимировать дугами эллипсов и берегами разрезов. Контуры отверстий (и разрезов) располагаются произвольно относительно друг друга. На контурах отверстий действуют самоуравновешенные внешние усилия или они жестко подкреплены, на них заданы потенциалы электрического поля; на бесконечности заданы напряжения $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty$ и индукции D_x^∞, D_y^∞ электрического поля, угол вращения пластинки, как целой, равен нулю ($\omega_3^\infty = 0$).

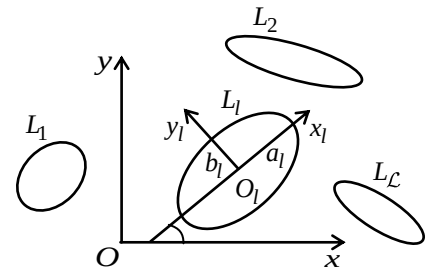


Рис. 1

Определение вязкоупругого состояния рассматриваемой пластинки будем проводить с использованием комплексных потенциалов электроупругости и метода малого параметра, в качестве которого будем брать изменение во времени коэффициента Пуассона материала пластинки [7, 8], т. е. разность

$$\lambda = \nu_{n12} - \nu_{n12}^0, \quad (3)$$

в которой ν_{n12} – мгновенное значение коэффициента Пуассона, ν_{n12}^0 – начальное значение этого коэффициента. Тогда комплексные потенциалы задачи $\Phi_k(z_k)$ можно представить рядами по этому параметру

$$\Phi_k(z_k) = \sum_{j=0} \lambda^j \Phi_{jk}(z_k), \quad (4)$$

в которых $\Phi_{jk}(z_k)$ – комплексные потенциалы приближений, имеющие в данном случае вид [9]

$$\Phi_{jk}(z_k) = \Gamma_{jk} z_k + \Phi_{jk}^0(z_k), \quad (5)$$

Γ_{jk} – известные постоянные, определяемые решением систем линейных уравнений

$$\begin{aligned} 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left(1, -\mu_k, \mu_k^2, q_k - \mu_k p_k, -\nu_k, \mu_k \nu_k \right) \Gamma_{0k} = \\ = \left(\sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty, \sigma_x^\infty, 2\omega_3^\infty, D_y^\infty, D_x^\infty \right), \end{aligned}$$

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, q_k - \mu_k p_k, \nu_k, \mu_k \nu_k \right) \Gamma_{1k} = \left(0, 0, 0, -\frac{s_{11}}{2s_{22}} \tau_{xy}^{\infty}, 0, 0 \right),$$

$$\Gamma_{jk} = 0 \quad (j \geq 2); \quad (6)$$

$\Phi_{jk}^0(z_k)$ – функции, голоморфные в многосвязных областях S_k , получаемых из заданной области S аффинными преобразованиями

$$z_k = x + \mu_k y; \quad (7)$$

μ_k – корни характеристического уравнения

$$l_{4s}(\mu)l_{2\beta}(\mu) - l_{3g}^2(\mu) = 0; \quad (8)$$

$l_{ij}(\mu)$ – полиномы вида

$$\begin{aligned} l_{4s}(\mu) &= s_{11}\mu^4 - 2s_{16}\mu^3 + (2s_{12} + s_{66})\mu^2 - 2s_{26}\mu + s_{22}, \\ l_{3g}(\mu) &= g_{11}\mu^3 - (g_{21} + g_{16})\mu^2 + (g_{12} + g_{26})\mu - g_{22}, \\ l_{2\beta}(\mu) &= -\beta_{11}\mu^2 + 2\beta_{12}\mu - \beta_{22}; \end{aligned} \quad (9)$$

s_{ij} – коэффициенты деформации материала пластинки, измеренные при постоянных индукциях электрического поля; g_{ki} – пьезоэлектрические коэффициенты деформации и напряженностей электрического поля, измеренные при постоянных напряжениях и индукциях; β_{kl} – коэффициенты диэлектрической восприимчивости, измеренные при постоянных напряжениях.

Неизвестные функции $\Phi_{jk}^0(z_k)$ будем определять из граничных условий на контурах области, которые для комплексных потенциалов приближений имеют вид [9]

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 g_{ikl}^0 \Phi_{jk}^0(t_k) = \delta_j^0 f_{il}(t) - \left(1 - \delta_j^0 \right) 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 g_{ikl}^1 \Phi_{j-1k}(t_k)$$

$$(j = 0, 1, 2, \dots \quad i = \overline{1, 3}, \quad l = \overline{1, \mathcal{L}}), \quad (10)$$

в котором для неподкрепленных контуров

$$g_{ikl}^0 = (1, \mu_k, -\nu_k), \quad g_{ikl}^1 = 0, \quad (11)$$

для жестко подкрепленных контуров

$$g_{ikl}^0 = (p_{k0}, q_{k0}, -\nu_k), \quad g_{ikl}^1 = (p_{k1}, q_{k1}, -\nu_k); \quad (12)$$

$$p_{k0} = \left(\mu_k^2 - \nu_{n12}^0 \right) s_{11} - s_{16} \mu_k + (g_{11} \mu_k - g_{21}) \nu_k,$$

$$q_{k0} = -\mu_k \nu_{n12}^0 s_{11} + \frac{s_{22}}{\mu_k} - s_{26} + \left(g_{12} - \frac{g_{22}}{\mu_k} \right) \nu_k,$$

$$p_{k1} = -s_{11}; \quad q_{k1} = -s_{11} \mu_k; \quad (13)$$

δ_j^0 – символ Кронекера.

Многосвязные области S_k ограничены контурами L_{kl} , соответствующими контурам L_l при аффинных преобразованиях (7). Голоморфные в этих областях функции $\Phi_{jk}^0(z_k)$ представим в виде сумм

$$\Phi_{jk}^0(z_k) = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \Phi_{jkl}(z_k)$$

голоморфных вне отверстий L_{kl} функций $\Phi_{jkl}(z_k)$ и для построения последних используем конформные отображения.

Отобразим конформно внешности единичных кругов $|\zeta_{kl}| \geq 1$ на внешности контуров L_{kl} по формулам [10]

$$z_k = z_{0kl} + R_{kl} \left(\zeta_{kl} + \frac{m_{kl}}{\zeta_{kl}} \right), \quad (14)$$

в которых

$$\begin{aligned} z_{0kl} &= x_{0l} + \mu_k y_{0l}, \\ R_{kl} &= \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) + ib_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2}, \\ m_{kl} &= \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) - ib_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2R_{kl}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда функции $\Phi_{jkl}(z_k)$ ($l = \overline{1, \mathcal{L}}$), голоморфные вне контуров L_{kl} и исчезающие на бесконечности, в областях переменных ζ_{kl} будут голоморфными вне кругов $|\zeta_{kl}| \geq 1$ и могут быть представлены рядами Лорана по отрицательным степеням ζ_{kl} , т. е. в виде

$$\Phi_{jkl}(z_k) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{jkl n}}{\zeta_{kl}^n},$$

а для комплексных потенциалов приближений (5) и их производных будем иметь выражения

$$\Phi_{jk}(z_k) = \Gamma_{jk} z_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{kln}(z_k) a_{jkl n}, \quad (16)$$

$$\Phi'_{jk}(t_k) = \Gamma_{jk} + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi'_{kln}(z_k) a_{jkl n}, \quad (17)$$

где

$$\varphi_{kln}(z_k) = \frac{1}{\zeta_{kl}^n}, \quad \varphi'_{kln}(z_k) = -\frac{n}{R_{kl} \zeta_{kl}^{n-1} (\zeta_{kl}^2 - m_{kl})} \quad (l = \overline{1, \mathcal{L}}); \quad (18)$$

$a_{jkl n}$ – неизвестные коэффициенты, которые будем определять из граничных условий (10), которые при их дифференцировании по дуге контура s примут вид

$$\begin{aligned} 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 g_{ikl}^0 \delta_{k,s} \Phi'_{jk}(t_k) &= \delta_j^0 \frac{f_{il}(t)}{ds} - (1 - \delta_j^0) 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 g_{ikl}^1 \delta_{k,s} \Phi'_{j-1k}(t_k) \\ &\quad (j = 0, 1, 2, \dots, i = \overline{1, 3}, l = \overline{1, \mathcal{L}}). \end{aligned} \quad (19)$$

При этом $\delta_{k,s} = \frac{dt_k}{ds} = \frac{x' + \mu_k y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}$; x' , y' – производные переменных (1) по параметру θ параметрического задания эллипсов (2).

Граничным условиям (19) будем удовлетворять обобщенным методом наименьших квадратов [9, 11, 12]. Для этого выберем на каждом из контуров L_p ($p = \overline{1, \mathcal{L}}$) систему точек $M_{pm}(x_{pm}, y_{pm})$ ($m = \overline{1, M_p}$), в которых удовлетворим граничным условиям. Получаем следующую переопределенную систему линейных алгебраических уравнений для определения постоянных a_{jklm} :

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[g_{ikl}^0 \delta_{k,s} \Phi'_{kln}(t_{kpm}) a_{jklm} + \overline{g_{ikl}^0} \overline{\delta_{k,s}} \overline{\Phi'_{kln}(t_{kpm})} \overline{a_{jklm}} \right] = \\ = - \sum_{k=1}^3 \left[g_{ikl}^0 \delta_{k,s} \Gamma'_{jk}(t_{kpm}) + \overline{g_{ikl}^0} \overline{\delta_{k,s}} \overline{\Gamma'_{jk}(t_{kpm})} \right] \\ (j = 0, 1, 2, \dots; i = \overline{1, 3}, \quad p = \overline{1, \mathcal{L}}; \quad m = \overline{1, M_p}) \end{aligned} \quad (20)$$

в случае задания на контуре L_p усилий и индукций или систему уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[g_{ikl}^0 \delta_{k,s} a_{jklm} \Phi'_{kln}(t_{kpm}) + \overline{g_{ikl}^0} \overline{\delta_{k,s}} \overline{a_{jklm}} \overline{\Phi'_{kln}(t_{kpm})} \right] = \\ = - \sum_{k=1}^3 \left[g_{ikl}^0 \delta_{k,s} \Gamma_{jk} + \overline{g_{ikl}^0} \overline{\delta_{k,s}} \overline{\Gamma_{jk}} \right] - \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \delta_j^0) \left[g_{ikl}^1 \delta_{k,s} a_{j-1,klm} \Phi'_{kln}(t_{kpm}) + \right. \\ \left. + \overline{g_{ikl}^1} \overline{\delta_{k,s}} \overline{a_{j-1,klm}} \overline{\Phi'_{kln}(t_{kpm})} \right] - \sum_{k=1}^3 (1 - \delta_j^0) \left[g_{ikl}^1 \delta_{k,s} \Gamma_{j-1,k} + \overline{g_{ikl}^1} \overline{\delta_{k,s}} \overline{\Gamma_{j-1,k}} \right] \\ (j = 0, 1, 2, \dots; i = \overline{1, 3}, \quad p = \overline{1, \mathcal{L}}; \quad m = \overline{1, M_p}), \end{aligned} \quad (21)$$

если на контуре L_p заданы перемещения и индукции.

Системы уравнений (20), (21) будем решать методом сингулярных разложений [13, 14]. После определения неизвестных a_{jklm} комплексные потенциалы приближений (17) будут известными и по ним на основе (4) можно найти комплексные потенциалы задачи, предварительно вычислив степени малого параметра λ^j .

Учитывая, что на основе (3) мгновенное значение коэффициента Пуассона равно

$$\nu_{12}^* = \nu_{12}^0 + \lambda, \quad (22)$$

и заменяя ν_{12}^* его временным оператором Ю.Н. Работнова, получим [7, 8]

$$\lambda = D_1 \cdot \mathcal{E}_\alpha^* (-\beta_1^* - \delta_1^*) + D_2 \cdot \mathcal{E}_\alpha^* (-\beta_2^*), \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} D_1 = \frac{\delta_1^*}{4} \left[\frac{E_1^0}{E_2^0} \frac{\delta_2^*}{\beta_1^* - \beta_2^* + \delta_1^*} + 1 - 4\nu_{12}^0 \right], \\ D_2 = \frac{\delta_2^*}{4} \frac{E_1^0}{E_2^0} \frac{\beta_1^* - \beta_2^*}{\beta_1^* - \beta_2^* + \delta_1^*}; \end{aligned} \quad (24)$$

E_i^0 – мгновенно упругие значения модулей Юнга E_i ; δ_i^* , β_i^* и δ_{ij}^* , β_{ij}^* – реологические постоянные материала, связанные с изменением E_i и G_{ij} во времени; δ^* , β^* – реологические постоянные, связанные с изменением ν_{n12} во времени. Возведя λ в степень j , найдем

$$\begin{aligned}\lambda^j &= \sum_{k=0}^j C_j^k D_1^{j-k} D_2^k \mathfrak{E}_\alpha^{*j-k} \left(-\beta_1^* - \delta_1^* \right) \cdot \mathfrak{E}_\alpha^{*k} \left(-\beta_2^* \right) = \\ &= \sum_{k=0}^j C_j^k D_1^{j-k} D_2^k \frac{\mathfrak{E}_\alpha^{*k} \left(-\beta_2^* \right) - \mathfrak{E}_\alpha^{*j-k} \left(-\beta_1^* - \delta_1^* \right)}{-\beta_2^* + \beta_1^* + \delta_1^*}.\end{aligned}\quad (25)$$

Здесь C_j^k – число сочетаний;

$$\mathfrak{E}_{\alpha^*}(\beta, t - \tau) = (t - \tau)^{\alpha^*} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta^n (t - \tau)^{n(1+\alpha^*)}}{\Gamma \left[(n+1)(1+\alpha^*) \right]} - \quad (26)$$

– оператор Ю. Н. Работнова [15]; $\Gamma(1+\alpha^*)$ ($-1 < \alpha^* < 0$) – гамма-функция;

Подставив λ^j по формуле (25) в выражение (4), в любой точке и в любое время после приложения внешнего воздействия найдем комплексные потенциалы задачи и основные характеристики ЭУС (напряжения, индукции и напряженности электрического поля). В частности, основные напряжения и компоненты векторов индукции и напряженности найдем по формулам

$$\left(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \right) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left(\mu_k^2, 1, -\mu_k \right) \Phi'_k(z_k); \quad (27)$$

$$\left(D_x, D_y, E_x, E_y \right) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left(\nu_k \mu_k, -\nu_k, r_k^0, \mu_k r_k^0 \right) \Phi'_k(z_k). \quad (28)$$

По основным напряжениям и компонентам векторов индукций можно найти также напряжения и компоненты векторов индукции и напряженностей на любых площадках с нормалью n и касательной s , используя формулы

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \sigma_x \cos^2(nx) + \sigma_y \cos^2(ny) + 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \sigma_s &= \sigma_x \cos^2(ny) + \sigma_y \cos^2(nx) - 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny) \\ \tau_{ns} &= (\sigma_y - \sigma_x) \cos(nx) \cos(ny) + \tau_{xy} (\cos^2(nx) - \cos^2(ny));\end{aligned}\quad (29)$$

$$D_n = D_x \cos^2(nx) + D_y \cos^2(ny). \quad (30)$$

Заметим, что по аналогии между теорией напряжений и теорией деформацией из последних равенств следуют важные при исследованиях деформаций соотношения

$$\varepsilon_n = \varepsilon_x \cos^2(nx) + \varepsilon_y \cos^2(ny) + \gamma_{xy} \cos(nx) \cos(ny),$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \varepsilon_x \cos^2(ny) + \varepsilon_y \cos^2(nx) - \gamma_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \gamma_{ns} &= 2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cos(nx) \cos(ny) + \gamma_{xy} (\cos^2(nx) - \sin^2(ny)).\end{aligned}\quad (31)$$

При этом, если некоторый эллипс L_l переходит в прямолинейный разрез-трещину, то для его концов можно вычислить также коэффициенты интенсивности напряжений, индукций и напряженностей (КИНИН) по формулам [16]

$$\begin{aligned}k_1^\pm &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left[\mu_k^2 \sin^2 \varphi_l + \cos^2 \varphi_l + 2\mu_k \sin \varphi_l \cos \varphi_l \right] M_{kl}, \\ k_2^\pm &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \left[(1 - \mu_k^2) \cos \varphi_l \sin \varphi_l - \mu_k (\cos^2 \varphi_l - \sin^2 \varphi_l) \right] M_{kl},\end{aligned}\quad (32)$$

где

$$\begin{aligned}M_{kl} &= \sum_{j=0} \lambda^j M_{jkl}, \\ M_{jkl} &= -\frac{\sqrt{a_l}}{2R_{kl}} \sum_{n=1}^{\infty} (\pm 1)^n n a_{jkl n}.\end{aligned}\quad (33)$$

Здесь верхний знак соответствует правому концу разреза в локальной системе координат $O_l x_l y_l$, нижний – к его левому концу.

Как частный случай из приведенного решения задачи электроупругости (ЭУ) следует решение задачи теории упругости (ТУ). Это решение получается из приведенного решения, если в нем принять равными нулю g_{ij} и v_{ij} . Но при проведении численных исследований в этом случае можно пользоваться программой решения общей задачи электроупругости, проводя вычисления для модельного материала с постоянными

$$g'_{ij} = \lambda_g g_{ij}, \quad v'_{ij} = \lambda_{gp} v_{ij}, \quad (34)$$

где λ_g , λ_{gp} – пьезопараметры модельного материала. При этом для задач ЭУ нужно принять $\lambda_g = \lambda_{gp} = 1$, для задачи ТУ $\lambda_g = \lambda_{gp} \leq 10^{-3}$.

Описание результатов численных исследований. Были проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния пьезопластин из следующих материалов: композит на основе $BaTiO_3 - CoFe_2O_4$ (материал М1) [6, 17, 18]; композит, упругие и электрические постоянные которого соответствуют кадмию селенида $CdSe$, а пьезомагнитные и магнитные – $BaTiO_3$ без учета магнитных свойств (М2) [6, 19]; композит, упругие, пьезоэлектрические и электрические постоянные которого соответствуют $PZT-4$, а пьезомагнитные и магнитные без учета магнитных свойств – $CoFe_2O_4$ – (М3) [6, 19]. При этом значения реологических постоянных α^* , β_1^* , β_2^* , δ_1^* , δ_2^* , как и в работах [6, 20], были найдены на основе анализа известных в литературе реологических постоянных и их изменений во времени постоянных E_i и G_{ij} .

При проведении численных исследований количество приближений j по степеням малого параметра λ увеличивалось до тех пор, пока последующее приближение изменяло максимальные значения напряжений предыдущего приближения более, чем на 0,01 %. Для этого в рассмотренных случаях необходимо было оставлять от 5 до 10 приближений (степеней малого параметра λ). Количество членов в рядах (16), (17) для

каждого контура L_p и количество точек M_p на нем, в которых удовлетворялись граничные условия, увеличивались до тех пор, пока граничные условия на контурах не удовлетворялись с достаточно высокой степенью точности. При этом анализировались в случае свободного контура пластинки (первая основная задача) напряжения σ_n , τ_{ns} (чтобы они по модулю не превышали 10^{-3}), для жестко подкрепленного контура (вторая основная задача) деформации ε_n , γ_{ns} (чтобы они по модулю не превышали 10^{-10}). Как показали исследования, для такого удовлетворения граничным условиям для небольших расстояний между контурами (когда эти расстояния не менее радиусов контуров) достаточно оставлять от 10 до 20 членов в рядах (16), (17) и на каждом контуре выбирать около 100 точек. Для весьма близких расстояний между контурами в рядах оставляли до 100 членов в рядах и граничным условиям удовлетворяли в 800 точках на каждом контуре, что приводило к переопределенной системе из $2 \times 3 \times 800$ уравнений.

Как показали исследования [7], с течением времени после приложения нагрузки происходят значительные изменения значений напряжений и индукций, причем наибольшие изменения этих величин происходят в первые 10 час. после приложения нагрузки, значительные изменения этих значений наблюдаются и позже, вплоть до 40–50 часов. После этого времени указанные значения изменяются незначительно. Что же касается стационарного состояния, после которого электроупругое состояние не изменяется, то для пластинки из материалов М1, М2 и М3 оно устанавливается через 1000 час., 100 час., и 500 час. соответственно.

Для растяжения усилиями $\sigma_y^\infty = p$ пластинки с двумя одинаковыми жестко подкрепленными круговыми отверстиями радиуса a_1 ($b_2 = a_2 = b_1 = a_1$) (рис. 2), с точностью до множителя p в табл. 1 и табл. 2 приведены соответственно значения напряжений σ_n и σ_s вблизи контура левого отверстия в зависимости от центрального угла θ , отсчитываемого от положительного направления оси Ox против часовой стрелки, и отношения c/a_1 , где c – расстояние между контурами отверстий, в начальном и стационарном состояниях. Значения, соответствующие $c/a_1 = \infty$, относятся к пластинке с одним отверстием. Для пластинки из наиболее пьезоактивного материала М2 при некоторых значениях c/a_1 на рис. 3 и рис. 4 изображены соответственно графики распределения напряжений σ_n и σ_s вблизи контура левого отверстия в зависимости от угла θ в начальном (сплошные линии) и стационарном (штриховые линии) состояниях.

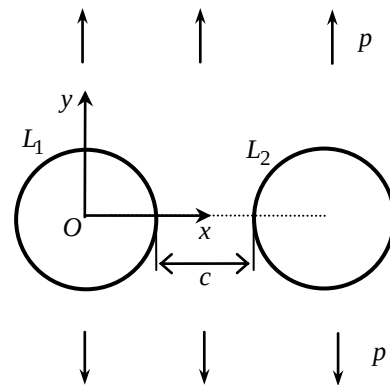


Рис. 2.

Из данных табл. 1, 2 и рис. 3, 4 следует, что напряжения в пластинке с течением времени изменяются, причем в зоне между включениями с уменьшением расстояния между ними напряжения значительно растут, при переходе в стационарное состояние они претерпевают весьма большие изменения. Наибольшие изменения напряжений наблюдаются в зоне перемычки, особенно в точке, соответствующей $\theta = 0$. Вдали от перемычки значения напряжений, как в начальном, так и в стационарном состояниях изменяются незначительно. Самое значительное влияние пьезосвойств наблюдается в пластинке из материала М2. В задаче ТУ (без учета пьезосвойств) изменения значений напряжений при сближении отверстий менее значительны.

Таблица 1

Значения напряжений σ_n / p около контура левого кругового отверстия

Материал	θ , рад.	t, час.	c / a_1							
			∞	2	1	0,5	0,1	0,01	∞	0,1
			ΞY				$T Y$			
M1	0	нач	0,006	-0,129	-0,293	-0,515	-1,106	-3,010	-0,008	-1,153
		стац	-0,109	-0,287	-0,511	-0,833	-1,790	-4,822	-0,126	-1,859
	$\pi / 6$	нач	0,372	0,305	0,256	0,210	0,193	0,280	0,364	0,185
		стац	0,276	0,201	0,150	0,113	0,152	0,310	0,267	0,142
	$\pi / 2$	нач	1,469	1,441	1,416	1,394	1,372	1,366	1,480	1,382
		стац	1,431	1,412	1,388	1,364	1,337	1,330	1,445	1,350
	π	нач	0,006	-0,030	-0,046	-0,058	-0,073	-0,080	-0,008	-0,088
		стац	-0,109	-0,156	-0,179	-0,197	-0,218	-0,229	-0,126	-0,238
M2	0	нач	0,000	-0,116	-0,247	-0,428	-0,951	-2,578	-0,027	-1,109
		стац	-0,505	-0,998	-1,731	-3,327	-22,383	-83,757	-0,683	-26,599
	$\pi / 2$	нач	1,438	1,413	1,390	1,369	1,347	1,341	1,448	1,355
		стац	1,484	1,538	1,517	1,449	1,250	1,239	1,590	1,342
	π	нач	0,000	-0,029	-0,042	-0,052	-0,064	-0,070	-0,027	-0,104
		стац	-0,505	-0,620	-0,680	-0,736	-0,808	-0,784	-0,683	-1,094
M3	0	нач	0,147	0,034	-0,131	-0,356	-0,761	-2,193	0,113	-0,887
		стац	-0,518	-0,676	-0,949	-1,479	-3,180	-9,139	-0,598	-3,487
	$\pi / 2$	нач	1,587	1,542	1,504	1,475	1,451	1,445	1,661	1,513
		стац	1,170	1,190	1,170	1,137	1,098	1,085	1,269	1,190
	π	нач	0,147	0,110	0,090	0,075	0,058	0,048	0,113	0,019
		стац	-0,518	-0,576	-0,616	-0,655	-0,712	-0,747	-0,598	-0,807

Таблица 2

Значения напряжений σ_s / p около контура левого кругового отверстия

Материал	θ , рад.	t, час.	c / a_1							
			∞	2	1	0,5	0,1	0,01	∞	0,1
			ΞY				$T Y$			
M1	0	нач	0,061	0,011	-0,048	-0,122	-0,274	-0,669	-0,003	-0,397
		стац	0,027	-0,060	-0,168	-0,316	-0,695	-1,762	-0,052	-0,870
	$\pi / 6$	нач	0,175	0,149	0,132	0,118	0,110	0,125	0,171	0,092
		стац	0,192	0,153	0,129	0,113	0,129	0,183	0,186	0,107
	$\pi / 2$	нач	0,480	0,470	0,462	0,455	0,448	0,446	0,483	0,451
		стац	0,682	0,672	0,661	0,649	0,637	0,634	0,688	0,643
	π	нач	0,061	0,049	0,044	0,041	0,038	0,038	-0,003	-0,030
		стац	0,027	0,005	-0,005	-0,012	-0,018	-0,020	-0,052	-0,106
M2	0	нач	-0,026	-0,076	-0,129	-0,195	-0,378	-0,984	-0,011	-0,476
		стац	-0,777	-1,600	-2,810	-5,405	-33,632	-112,407	-1,128	-39,610
	$\pi / 2$	нач	0,409	0,402	0,396	0,390	0,384	0,382	0,413	0,386
		стац	1,598	1,655	1,632	1,560	1,357	1,345	1,695	1,442
	π	нач	-0,026	-0,037	-0,041	-0,043	-0,046	-0,046	-0,011	-0,045
		стац	-0,777	-0,964	-1,059	-1,144	-1,240	-1,198	-1,128	-1,785
M3	0	нач	0,279	0,217	0,142	0,080	0,187	0,728	0,039	-0,305
		стац	0,295	0,176	-0,022	-0,325	-0,665	-1,438	-0,167	-1,752
	$\pi / 2$	нач	0,375	0,365	0,356	0,349	0,343	0,342	0,393	0,358
		стац	0,991	0,977	0,955	0,935	0,915	0,909	1,047	0,964
	π	нач	0,279	0,264	0,259	0,258	0,263	0,268	0,039	0,007
		стац	0,295	0,258	0,237	0,224	0,218	0,220	-0,167	-0,304

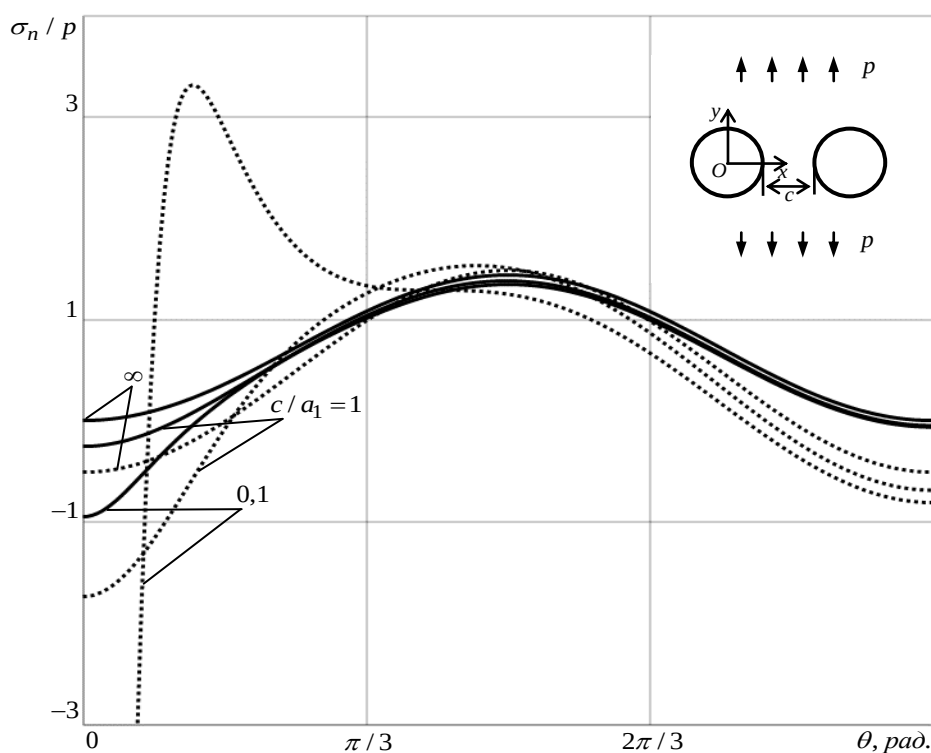


Рис. 3. Графики распределения σ_n / p около контура левого отверстия в пластинке из М2 для некоторых c/a_1 в начальном (сплошные линии) и стационарном (штриховые линии) состояниях.

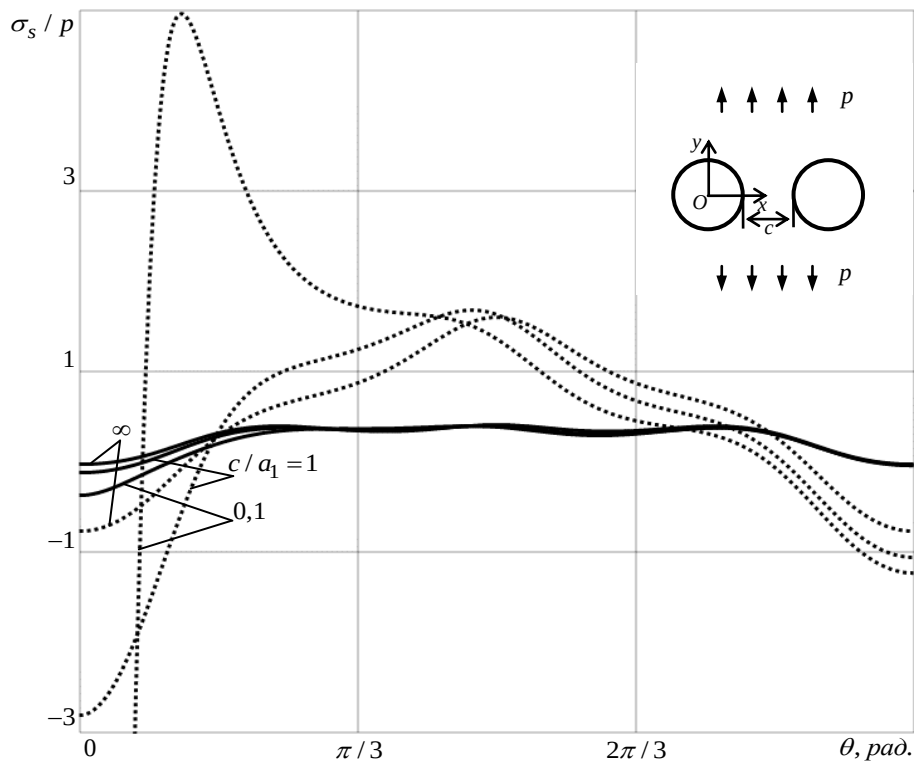


Рис. 4. Графики σ_s / p около контура левого отверстия в пластинке из М2 для некоторых значений c/a_1 в начальном (сплошные линии) и стационарном (штриховые линии) состояниях.

Как показывают расчеты, при уменьшении отношения b_1 / a_1 полуосей эллипса L_1 значения напряжений вблизи концов большей полуоси растут, стремясь к бесконечности, и при $b_1 / a_1 \leq 10^{-3}$ эллипс можно считать линейным разрезом и для его концов считать КИНИН (коэффициенты интенсивности напряжений индукций и напряженностей).

Для растяжения усилиями $\sigma_y^\infty = p$ пластинки с жестко закрепленным круговым отверстием радиуса a_1 ($b_1 = a_1$) и жестким линейным включением полудлины $l_2 = a_1$ ($a_2 = a_1$, $b_2 = 0$) на расстоянии c от отверстия вдоль диаметра (рис. 5), с точностью до множителя p , в табл. 3 приведены значения σ_s / p в точках контура отверстия для некоторых центральных углов θ и КИН (коэффициенты интенсивности напряжений) для концов линейного включения (k_1^- для ближайшего к контуру отверстия вершины и k_1^+ для удаленной вершины). Значения, соответствующие $c/a_1 = \infty$, относятся к пластинке с одним отверстием и с одним включением.

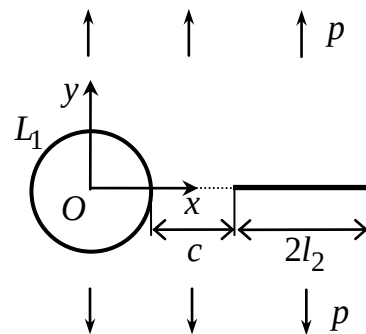


Рис. 5.

Таблица 3

Значения напряжений σ_s / p около контура левого кругового отверстия в пластинке из М2

Величина	t, час.	c / a_1							
		∞	2	1	0,5	0,1	0,01	∞	0,1
		ЭУ						ТУ	
σ_s / p при $\theta = 0$	нач	-0,026	-0,039	-0,065	-0,120	-0,486	-0,710	-0,011	-0,460
	стац	-0,777	-1,010	-1,457	-2,470	-9,861	-16,615	-1,128	-11,716
σ_s / p при $\theta = \frac{\pi}{6}$	нач	0,319	0,320	0,330	0,347	0,354	0,313	0,227	0,245
	стац	0,277	0,282	0,388	0,581	0,733	0,413	-0,026	0,670
σ_s / p при $\theta = \frac{\pi}{2}$	нач	0,409	0,410	0,409	0,409	0,408	0,387	0,413	0,410
	стац	1,598	1,606	1,594	1,574	1,536	1,449	1,695	1,613
σ_s / p при $\theta = \pi$	нач	-0,026	-0,028	-0,029	-0,029	-0,029	-0,032	-0,011	-0,024
	стац	-0,777	-0,818	-0,835	-0,846	-0,856	-0,800	-1,128	-1,271
КИН k_1^-	нач	0,061	0,069	0,077	0,087	0,108	0,116	0,066	0,110
	стац	-0,044	-0,058	-0,063	-0,060	-0,046	0,056	-0,116	-0,222
КИН k_1^+	нач	0,061	0,066	0,070	0,073	0,080	0,076	0,066	0,086
	стац	-0,044	-0,054	-0,059	-0,063	-0,069	-0,050	-0,116	-0,161

Как видно, закономерности изменения значений напряжений и КИН для концов линейного включения в зависимости от близости концентраторов напряжения и от времени действия усилий такие же, как в случае двух отверстий. Это проявляется и в задаче ЭУ, и в задаче ТУ.

Заключение. Таким образом, с использованием комплексных потенциалов решена задача электровязкоупругости для многосвязной пластинки с отверстиями и трещинами. Задача вязкоупругости решена методом малого параметра, комплексные потенциалы представлены рядами Лорана, коэффициенты которых определены из граничных условий задачи обобщенным методом наименьших квадратов, приводившего задачу к

решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений. Численными исследованиями для пластинки с двумя круговыми отверстиями с жестко закрепленными контурами и для пластинки с круговым отверстием и линейным разрезом с жестко закрепленными контурами изучены влияния физико-механических свойств материалов, расстояния между концентраторами и времени действия сил на значения напряжений, а в случае линейных включений и значения КИН.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400354-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. – М.: Иностр. лит., 1949. – 717 с.
2. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – Т. 1, ч. А. – С. 204–326.
3. Nan C.W. Magnetoelectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases // Phys. Rev. – 1994. – Vol. 50, No 22. – P. 6082-6088.
4. Rahmoune M., Benjeddou A., Ohayon R. New thin piezoelectric plate models // J. Intell. Mater. Syst. Struct. – 1998. – Vol. 9. – P. 1017–1029.
5. Бочкарев С.А., Лекомцев С.В. Гидроупругая устойчивость коаксиальных цилиндрических оболочек, выполненных из пьезоэлектрического материала // Вестн. Перм. нац.-исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2019. – № 2. – С. 35–48. – DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.04.
6. Калоеров С.А., Петренко А.В. Двумерные задачи электромагнитоупругости для многосвязных тел. – Донецк: Юго-Восток, 2011. – 232 с.
7. Калоеров С.А., Паршикова О.А. Термовязкоупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки // Прикладная механика. – 2012. – № 3 (48). – С. 103–116.
8. Калоеров С.А., Самодуров А.А. Задача электромагнитоупругости для многосвязных пластинок // Прикладная механика. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 23–41.
9. Калоеров С.А. Полянский М.А. Решение задачи о вязкоупругом состоянии многосвязной пьезопластинки // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2024. – № 1. – С. 3–27.
10. Калоеров С.А., Горянская Е.С. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами // Теорет. и прикладная механика. – 1995. – № 25. – С. 45–56.
11. Воеводин В.В. Вычислительные основы линейной алгебры. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
12. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
13. Drmač Z., Veselić K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 1 // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1322–1342.
14. Drmač Z., Veselić K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 2 // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1343–1362.
15. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием // Прикладная математика и механика. – 1948. – Т. 12, № 1. – С. 53–62.
16. Калоеров С.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений, индукции и напряженности для многосвязных сред // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 56–62.
То же: Kaloerov, S.A. Determining the intensity factors for stresses, electric-flux density, and electric-field strength in multiply connected electroelastic anisotropic media // International Applied Mechanics. – 2007. – Vol. 43, No 6. – P. 631-637.
17. Yamamoto Y., Miya K. Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures. – Amsterdam: Elsevier Science-North Holland, 1987. – 450 p.
18. Tian W.-Y., Gabbert U. Multiple crack interaction problem in magnetoelectroelastic solids // Europ. J. Mech. Part A. – 2004. – Vol. 23. – P. 599–614.
19. Hou P.F., Teng G.-H., Chen H.-R. Three-dimensional Greens function for a point heat source in two-phase transversely isotropic magneto-electro-thermo-elastic material // Mech. Mater. – 2009. – Vol. 41. – P. 329–338.
20. Каминский А.А. Длительное разрушение полимерных и композитных материалов с трещинами / А.А. Каминский, Д.А. Гаврилов. – К.: Наук. думка, 1992. – 248 с.

Поступила в редакцию 01.09.2025 г.

STUDY OF THE ELECTROVISCOELASTIC STATE OF A MULTI-CONNECTED PIEZOPLATE

S. A. Kaloerov, M. A. Polianskii

The electroviscoelasticity problem for a multiply connected plate with arbitrary holes and cracks is solved. In this case, the complex electroelasticity potentials are represented by series in powers of a small parameter with coefficients in the form of unknown approximation functions; boundary conditions are obtained for determining the approximation functions and general representations of these functions for a multiply connected region, containing laurent series with unknown coefficients, the determination of which from the boundary conditions by the generalized least squares method is reduced to solving an overdetermined system of linear algebraic equations. After determining the approximation functions by representing the elastic deformation coefficients by time operators and calculating them, the main characteristics of the electroelastic state of the plate at any time are found. Numerical studies are carried out for a plate with two circular holes with rigidly supported contours, with a linear inclusion and a circular hole. It has been established that over time, the values of stresses and inductions near the contours of holes and linear inclusions change significantly, with the greatest changes in these quantities being observed in the first 10 hours after applying the load, significant changes in these quantities are observed up to 40–50 hours, but the transition to a steady state takes a long time; during the transition to a steady state, the values of stresses and inductions undergo large changes; the values and nature of the change in these quantities are significantly affected by the physical and mechanical properties of the material and the geometric characteristics of the holes and cracks.

Keywords: electroviscoelasticity, complex potentials, small parameter method, time operators, generalized least squares method, stress and induction intensity factors.

Калоеров Стефан Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0000-0003-1339-6035.
E-mail: kaloerov@mail.ru

Kaloerov Stefan Alekseevich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor,
Donetsk State University,
Donetsk, Russian Federation.
ORCID 0000-0003-1339-6035.
E-mail: kaloerov@mail.ru

Полянский Максим Алексеевич

аспирант, стажер-исследователь,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0009-0007-2281-3220.
E-mail: m4xpolyan@yandex.ru

Polianskii Maksim Alekseevich

Postgraduate student, research intern,
Donetsk State University,
Donetsk, Russian Federation.
ORCID 0009-0007-2281-3220.
E-mail: m4xpolyan@yandex.ru

Х И М И Ч Е С К И Е Н А У К И

УДК 544.342:546.881

DOI: 10.5281/zenodo.17199822

EDN: RSJMVC

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
ИЗОПОЛИВАНАДАТОВ В ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕДАХ© 2025. *Е. Е. Белоусова, В. С. Голубович, Е. В. Хомутова, Н. В. Яблочкова*

На основании результатов моделирования процессов комплексообразования изополиванадат-анионов в системах Na_3VO_4 ($C=0,01$; $0,1$ моль/л) – HCl – NaCl – $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ (CH_3CN) – H_2O при $25,0 \pm 0,1$ °C изучены реакции поликонденсации в водно-диметилформамидных ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) и в водно-ацетонитрильных (CH_3CN) растворах ортованадата натрия; предложены диаграммы распределения доминирующих изополианионов в зависимости от кислотности и природы среды; установлено, что для синтеза солей целесообразнее использовать растворы с концентрацией $C(\text{VO}_4^{3-}) > 0,1$ моль/л и содержанием органического растворителя 20 – 30 об.%. Синтезированы и охарактеризованы данными химического, рентгенофазового, ИК-спектроскопического методов анализа соли состава $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot 4\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_4\text{V}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_5\text{V}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot \text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$, $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 3\text{H}_2\text{O} \cdot 7\text{CH}_3\text{CN}$.

Ключевые слова: комплексообразование, моделирование, водно-диметилформамидная и водно-ацетонитрильная среда, синтез, изополиванадаты тетраэтиламмония.

Введение. Ванадий и его кислородсодержащие соединения обладают рядом свойств, позволяющих найти им применение в качестве катализаторов, антикоррозионных покрытий, люминофоров, сорбентов, преобразователей энергии, биологически активных и фотоактивных материалов, что способствует развитию новых и перспективных методов их целенаправленного синтеза, а также совершенствованию классических технологий [1–7]. Изополиванадаты, являющиеся представителями наиболее дискуссионного по способам синтеза класса кислородных соединений ванадия (V), привлекают к себе особое внимание, как нашедшим применение в медицине, обладающими большим потенциалом в лечении многих заболеваний, а также антибактериальными, противогрибковыми, противопаразитарными, противовирусными, противоонкологическими и противодиабетическими свойствами [8–13]. Это особенно относится к декаванадатам, для которых была установлена способность легко связываться с макромолекулами организма. Поэтому актуальным и перспективным является физико-химическое исследование процессов, позволяющих создать новые, уточнить известные методики синтеза и таким образом расширить состав поликристаллических изополиванадатов, образование которых происходит только в растворах.

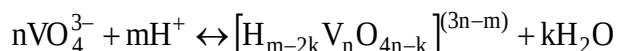
Преимущество в области полиоксометаллатов изначально было отдано их исследованию в водных растворах. Однако в последнее время начали использовать водно-органические растворители, позволяющие получать отличные от водных сред по составу изо- и гетерополианионы.

Смешанные растворители интересны с той точки зрения, что при смешивании двух растворителей образуется новый растворитель с отличающимися как физическими (диэлектрическая проницаемость, вязкость и плотность) так и химическими (кислотно-основные и донорно-акцепторные) свойствами [14–16]. Эти свойства влияют на сдвиг равновесия между ионами в сторону наиболее устойчивых в созданных условиях среды, понижают растворимость целевого продукта и гидролиз склонных к нему ионов.

Исследование процессов, которые происходят в подкисленных водно-органических растворах VO_4^{3-} и сравнение их направлений протекания в растворах с различным органическим растворителем дало бы возможность установить зависимость состава кристаллических соединений от кислотности раствора, времени его кристаллизации, состава и природы растворителя, которые в водной среде осаждаются в рентгеноаморфном состоянии, что осложняет их идентификацию и исследование структурных характеристик. Особенно затруднительным является синтез в кислых средах из-за соосаждения оксида ванадия (V) и продуктов гидролиза ионов. Это относится к декаванадатам некоторых металлов p-, d- и f-элементов, синтез которых требует соблюдения особых условий или не представляется возможным.

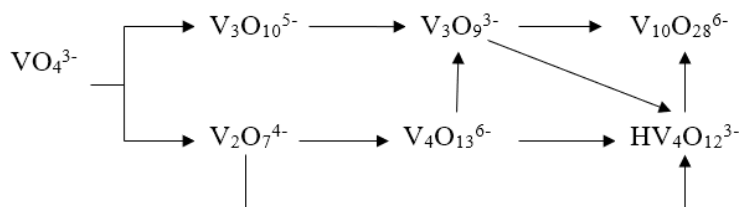
Согласно имеющейся научной информации в подкисленных водных растворах ортованадат-аниона установлено наличие сложных равновесий, приводящих к появлению узких зон кислотности, при которых доминируют отдельные формы анионов, зафиксировать которые с помощью математической модели в условиях эксперимента, на наш взгляд, затруднительно [17, 18]. Поэтому незначительные отклонения от этих зон вызывают несоответствие между составом комплексных частиц в водном растворе и в соединениях, выделяемых из этих растворов. Это, скорее всего, связано с природой растворителя и катиона, используемого для осаждения, что требует уточнений и проведения дополнительных исследований.

Основной особенностью поведения ортованадат-анионов VO_4^{3-} при подкислении растворов является то, что поликонденсация в системе с образованием изополиванадат-анионов (IPVA) происходит по схеме

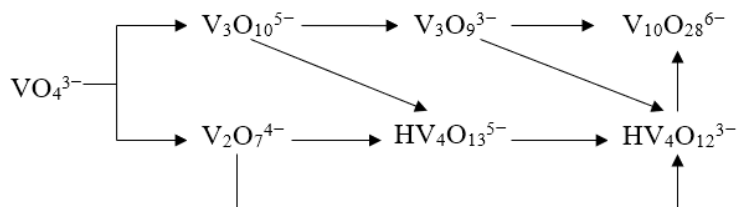


только при условии $C_V > 1 \cdot 10^{-3}$ М и при увеличении кислотности ($Z = v(\text{H}^+)/v(\text{VO}_4^{3-})$). Согласно проведенным ранее исследованиям [17] в водных системах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при $Z = 0,00 - 3,50$ и по уточненным нами данным в зависимости от концентрации Na_3VO_4 происходит образование изополиванадат-анионов согласно следующих схем:

1) $C_V = 0,01 - 0,05$ моль/л



2) $C_V = 0,1$ моль/л



В отличие от описанных в литературе схем, по результатам наших исследований с привлечением математического моделирования удалось обнаружить реальное существование три- и тетраметаванадагов в узком интервале концентраций (0,01–0,05 моль/л), а также наличие в растворе протонированного тетраметаванадата $\text{HV}_4\text{O}_{12}^{3-}$, введение которого позволяет исключить из схемы пента- и гексаметаванадаты. Тем более, что их существование в водных растворах не было подтверждено ни одним из авторов синтезом соответствующих солей.

Системное изучение состояния IPVA в водно-органических растворах с привлечением математического моделирования ранее проведено не было, но в литературе имеются отрывочные сведения о синтезе некоторых изополиванадатов [8, 12] в водно-органических средах с некоторыми катионами, содержащими в составе тетра и декаванадат-анионы. Выяснение вопроса о влиянии природы среды и катиона на состав образующегося изополиванадат-аниона при подкислении и его переходе в твердую фазу смогло бы дополнить теорию синтеза полиоксометаллатов.

Поэтому целью данной работы являлось исследование процессов равновесия в системе $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{ДМФА (AN)} - \text{H}_2\text{O}$ при $Z = 0,00-3,50$, где ДМФА – диметилформамид ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) и AN – ацетонитрил (CH_3CN), и обоснование условий синтеза изополиванадатов с катионом органической природы -тетраэтиламмонием.

Экспериментальная часть. Методы исследования. Для сравнения протекающих равновесных процессов при подкислении раствора ортованадат-аниона в водно-диметилформамидной и ацетонитрильной средах и перехода образующихся изополианионов ванадия (V) в состав их солей использовался метод pH-потенциометрического титрования с последующей математической обработкой экспериментальных данных. Математическое моделирование процессов образования IPVA в системах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) (CH_3CN) проводили при помощи метода Ньютона, реализованного в программе CLINP 2.1, что позволило построить диаграммы распределения изополиванадат-анионов в зависимости от кислотности среды и разработать условия синтеза кристаллических солей [19].

Измерения значений pH проводили на иономере “И-160” при $298 \pm 0,5$ К (ошибка 0,05 ед. pH). Ионную силу во время pH-потенциометрических исследований взаимодействий создавали введением водного раствора NaCl.

Для измерения pH в водно-органических растворах использовали методику и формулы расчета, изложенные в работах [20, 21], и нашедшие подтверждение в обоснованных результатах исследований равновесий в аналогичных системах изополивольфрамат-(молибдат)-анионов [22–24].

Инфракрасные (ИК) спектры образцов в матрице из KBr записывали на ИК спектрометре с преобразователем Фурье FTIR “Spectrum BXII” (Perkin-Elmer) в области волновых чисел $\nu = 400-4000 \text{ см}^{-1}$ ($\delta = \pm 0,8 \text{ см}^{-1}$).

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометрах ДРОН – 3М и Rigaku Ultima IV ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, Ni-фильтр).

Обсуждение результатов. Моделирование равновесий в растворах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{DMF}$ при содержании DMF 0–20 % (v/v). Изучение состояния ионов в растворах проводили методом pH-потенциометрического титрования. Для этого готовили водно-диметилформамидные растворы натрия ванадата с соответствующим содержанием ДМФА, которые титровались водно-диметилформамидным раствором соляной кислоты. В оба раствора добавляли хлорид натрия для поддержания постоянной ионной силы раствора ($I=0,5$ моль/л). Выбор содержания органического растворителя 0–20 % (v/v) в системе обусловлен максимально возможной концентрацией VO_4^{3-} в водно-ДМФА растворе.

В результате pH-потенциометрического титрования были получены зависимости $\text{pH} = f(Z)$. Далее для обработки полученных зависимостей pH от Z использовали программу CLINP 2.1, с помощью которой подбирали такие модели, которые позволили в условиях эксперимента адекватно описать экспериментально полученные зависимости $\text{pH} = f(Z)$ для всех составов растворителей, и с доверительной вероятностью 95 % рассчитать логарифмы концентрационных констант образования индивидуальных IPVA при 25 °С (таблица1).

Достоверность полученных данных подтверждается значениями величин среднеквадратичных отклонений логарифмов констант, указанных в скобках (рис. 1).

Таблица 1

Константы образования
изополиванадат-анионов

Частица	Z	$\lg K_c(S)$, при $C_V = 0,01$ моль/л $C(\text{ДМФА})=10\%$
$V_2O_7^{4-}$	1,00	19,13(0,04)
$V_3O_{10}^{5-}$	1,33	37,78(0,04)
$HV_4O_{13}^{5-}$	1,75	61,95(0,11)
$V_3O_9^{3-}$	2,00	50,44(0,07)
$HV_4O_{12}^{3-}$	2,25	73,87(0,05)
$V_{10}O_{28}^{6-}$	2,40	95,80(0,12)

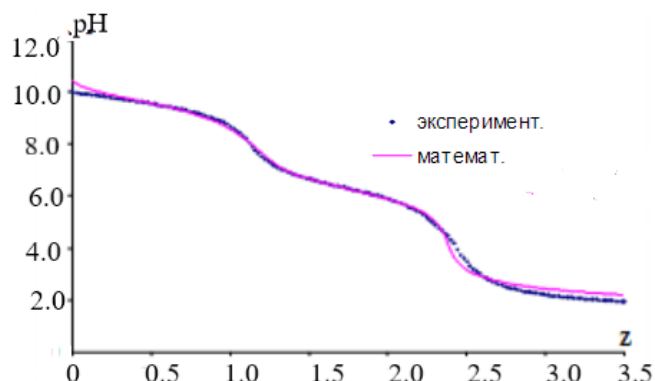


Рис.1. Сопоставление экспериментальной и математически уточненной кривой титрования в системе $Na_3VO_4 - HCl - NaCl - H_2O - \text{ДМФА}$ при $\phi(\text{ДМФА}) = 10$ об. % ($\mu = 0,5$), $C_V = 0,01$ моль/л.

На построенной диаграмме распределения ионных форм ванадия (V) в сантимольярном его растворе (рис. 2) фиксируется одновременное присутствие протонированных форм состава $HV_4O_{12}^{3-}$ (в интервале $Z = 1,50 - 2,70$), $HV_4O_{13}^{5-}$ (в интервале $Z = 1,40 - 2,40$). Следует заметить, что данная диаграмма распределения ионов по качественному составу совпадает с диаграммой распределения в водной среде только при $C_V = 0,1$ моль/л, т.е. присутствие небольшого количества ДМФА оказывает влияние на концентрационный фактор в образовании форм ванадат-анионов.

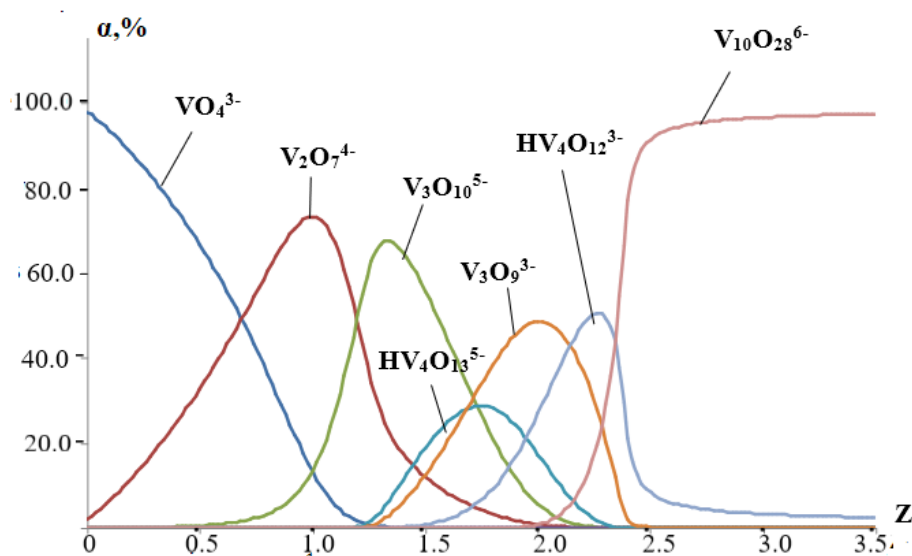
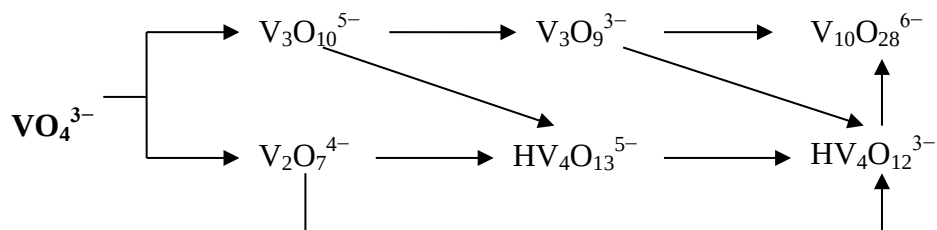


Рис.2. Диаграмма распределения ионных форм (моль%) ванадия (V) от Z при $C(VO_4^{3-}) = 0,01$ моль/л; $\phi(\text{ДМФА}) = 10$ об. %.

В исследуемой системе при $Z = 2,40$ доминирует протонированный тетраванадат анион $HV_4O_{13}^{5-}$, а декаванадат фиксируется при $Z = 2,50$, что отмечается точкой перегиба на кривой потенциометрического титрования. Тетраванадаты состава $V_4O_{12}^{4-}$ и $V_4O_{13}^{6-}$ в этих условиях не фиксируются.

В данном случае параллельные процессы практически не протекают и можно считать, что триметаванадат ($V_3O_9^{3-}$) в основном образуется из триполиванадата ($V_3O_{10}^{5-}$), а протонированный тетраметаванадат ($HV_4O_{12}^{3-}$) – из гидротетраполиванадата ($HV_4O_{13}^{5-}$). Не исключается возможность перехода триметаванадата ($V_3O_9^{3-}$) в тетраметаванадат ($HV_4O_{12}^{3-}$).

Таким образом, для 0,01 М водно-диметилформамидного раствора ванадия (V) можно предложить следующую последовательно-параллельную схему состояния ионов в растворе:



В водно-диметилформамидной среде как и в водной, удалось обнаружить реальное существование три- и тетраметаванадатов в у интервале концентраций (0,01–0,1 моль/л), а также наличие в растворе протонированного тетраметаванадата $HV_4O_{12}^{3-}$.

При изучении процессов поликонденсации в децимолярном растворе (0,1 моль/л) ортованадат ионов в водно-органической среде, в зависимости от концентрации ДМФА наблюдается совпадение экспериментальных и математических данных и склонность к образованию полиоксоанионов с большим содержанием в них ванадия, а именно декаванадат- анионов и его протонированных форм ($H_3V_{10}O_{28}^{3-}$).

Рассчитанные константы образования изополиванадат-анионов (таблица 2) позволили построить диаграммы распределения разных ионных форм в соответствии с кислотностями при содержании ДМФА в количестве 10 и 20 об. % (рис. 3).

Таблица 2

Значения концентрационных констант $\lg K_c$ образования изополиванадат-анионов при $C(VO_4^{3-}) = 0,1$ моль/л (с доверительной вероятностью 95 %)

Частица	Z	$\lg K_c$ (S) (I=0,5 моль/л) при содержании ДМФА, об. %		
		0 %	10 %	20 %
$V_2O_7^{4-}$	1,00	18,93 (0,09)	–	19,33(0,04)
$V_3O_{10}^{5-}$	1,33	37,47(0,11)	40,25(0,09)	43, 41(0,06)
$V_4O_{13}^{6-}$	1,50	–	–	52,72 (0,30)
$HV_4O_{13}^{5-}$	1,75	61,26 (0,09)	66,50(0,10)	68,95(0,11)
$V_4O_{12}^{4-}$	2,00	–	72,64(0,21)	–
$V_3O_9^{3-}$	2,00	49,97 (0,07)	–	–
$HV_4O_{12}^{3-}$	2,25	73,50 (0,05)	–	79,71 (0,05)
$V_{10}O_{28}^{6-}$	2,40	95,67 (0,30)	96,28 (0,24)	101,27(0,20)
$H_3V_{10}O_{28}^{3-}$	2,70	–	128,55(0,22)	–

Примечание: в скобках () указаны значения S – среднеквадратичных отклонений.

В водно-диметилформамидной системе с концентрацией ортованадата 0,1 моль/л фиксируется образование тетраванадат-ионов состава $V_4O_{12}^{4-}$, который в водной среде присутствует только в протонированной форме. Ион $V_4O_{13}^{6-}$ обнаруживается в небольших количествах в водной среде, а в водно-диметилформамидной среде его содержание возрастает значительно. С увеличением концентрации ДМФА содержание триметаванадат иона $V_3O_9^{3-}$ не наблюдается (см. рис. 3).

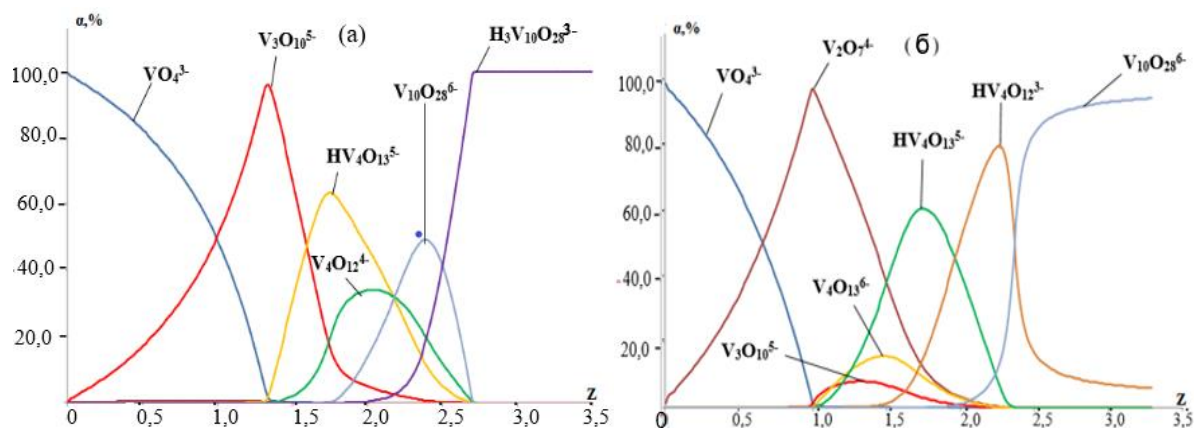
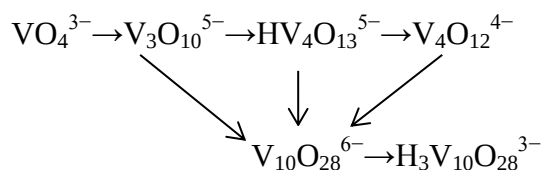


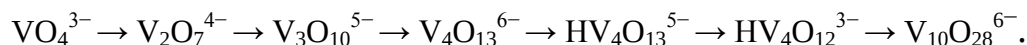
Рис. 3. Диаграммы распределения ионов (моль%) в системах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{ДМФА}$ от Z при $C(\text{VO}_4^{3-}) = 0,1$ моль/л с содержанием ДМФА (об. %): а) 10, б) 20.

Как следует из диаграммы (рис. 3, а) при 10%-ом содержании ДМФА в децимолярном растворе ортованадата натрия преобладают полиоксоанионы: $\text{V}_3\text{O}_{10}^{5-}$, $\text{V}_4\text{O}_{12}^{4-}$, $\text{HV}_4\text{O}_{13}^{5-}$ и $\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{6-}$ и наблюдается при высоком значении Z образование протонированного декаванадат-аниона $\text{H}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{3-}$. В этих условиях фиксируется образование наряду с анионом $\text{H}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{3-}$ среднего тетраванадата состава $\text{V}_4\text{O}_{12}^{4-}$, отсутствующих в водной среде, что отражено на схеме:



С увеличением концентрации ДМФА в 2 раза от 10 об. % до 20 об. % в системе стабилизируется образование непротонированной формы декаванадат-аниона, причем в большом количестве при $Z > 2,5$, что имеет большое значение при переводе его из раствора в твердую фазу. Так же с увеличением концентрации диметилформамида в системе отмечается образование апротонных три- и тетраванадов, что не было зафиксировано на диаграмме с содержанием ДМФА 10 об. % (рис. 3, б).

Таким образом, можно предложить следующую последовательно-параллельную схему состояния ионов в растворе с $C_V = 0,1$ моль/л и ДМФА 20 об. %:



Моделирование равновесий в растворах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{АН}$ при содержании $C(\text{VO}_4^{3-}) = 0,1$ моль/л и ацетонитрила (АН) 0–20 % (v/v). В системе с ацетонитрилом исследовали влияние природы этого растворителя на процессы поликонденсации ортованадат-иона, т.к. при синтезе полиоксометаллотов достаточно часто используют этот полярный растворитель, хорошо смешивающийся с водой. Выбор полярных растворителей (ДМФА и АН) был обоснован близостью при смешивании с водой таких параметров как: кислотность (α), основность (β), полярность (π), диэлектрическая проницаемость (ϵ) [25]. Эти параметры (табл.3) определяют кислотно-основные взаимодействия между молекулами растворителя и растворенного вещества и влияют на свойства вещества. В данном случае необходимо также учитывать полярность, как определяющий фактор взаимодействия ионов в процессах поликонденсации. Этот фактор связан с диэлектрической проницаемостью (ϵ)

растворителя и дипольным его моментом (μ). Установлено, что влияние этих параметров на свойства изучаемых веществ убывает в ряду $\pi > \beta > \alpha$.

Нами была выбрана наиболее оптимальной с точки зрения технологии получения твердых солей, содержащих изополиванадат-анионы, концентрация ванадия $C_V = 0,1$ моль/л с концентрацией органического растворителя 10 и 20 об.%, как в серии с ДМФА.

Таблица 3

Параметры смешанных водно-органических растворителей

Растворитель, Дипольный момент μ (D, дебай)	H ₂ O 1,8	Диметилформамид (ДМФА) 3,8		Ацетонитрил (АН) 3,5	
%, (v/V)	0	10	20	10	20
Диэлектрич. прониц. – (ϵ)	81	79,87	78,53	79,41	75,45
Кислотность – (α)	1,17	1,056	0,924	1,127	1,028
Основность – (β)	0,47	0,506	0,555	0,523	0,611
Полярность – (π)	1,09	1,101	1,118	1,076	1,015

Как следует из приведенных данных, близость параметров ϵ , β и μ для систем с ДМФА и АН при выбранных концентрациях должно способствовать образованию одинакового состава изополиванадат-анионов. Однако результаты по качественному и количественному составу полиоксованадат-анионов совпадают только частично при повышенном содержании (20 %) органического растворителя, а меньшие значения полярности π , как определяющего фактора, для водно-ацетонитрильной системы должны привести к получению близких к водной среде результатов реакций поликонденсации ортованадат-аниона.

Рассчитанные по данным потенциометрического титрования в водно-ацетонитрильных растворах концентрационные константы образования изополиванадат-анионов (табл. 4) и определенные по построенным диаграммам распределения ионов области кислотности их существования (рис. 4) подтвердили наши предположения об определяющем влиянии фактора полярности на процессы взаимодействия ионов в исследуемых системах.

Таблица 4

Значения концентрационных констант $\lg K_c$ образования изополиванадат-анионов при $C(VO_4^{3-}) = 0,1$ моль/л (с доверительной вероятностью 95 %)

Частица	Z	$\lg K_c$ (S) (I=0,5 моль/л) при содержании ацетонитрила (АН), об. %		
		0 %	10 %	20 %
$V_2O_7^{4-}$	1,00	18,93 (0,09)	18,88 (0,06)	19,05 (0,08)
$V_3O_{10}^{5-}$	1,33	37,47 (0,11)	35,86 (0,10)	38,47 (0,11)
$V_4O_{13}^{6-}$	1,50	–	51,12 (0,30)	–
$HV_4O_{13}^{5-}$	1,75	61,26 (0,09)	–	65,46 (0,09)
$V_4O_{12}^{4-}$	2,00	–	–	–
$V_3O_9^{3-}$	2,00	49,97 (0,07)	51,35 (0,14)	53,97 (0,07)
$HV_4O_{12}^{3-}$	2,25	73,50 (0,05)	74,71 (0,05)	75,50 (0,05)
$V_{10}O_{28}^{6-}$	2,40	95,67 (0,30)	93,28 (0,24)	96,77 (0,30)
$H_3V_{10}O_{28}^{3-}$	2,70	–	–	–

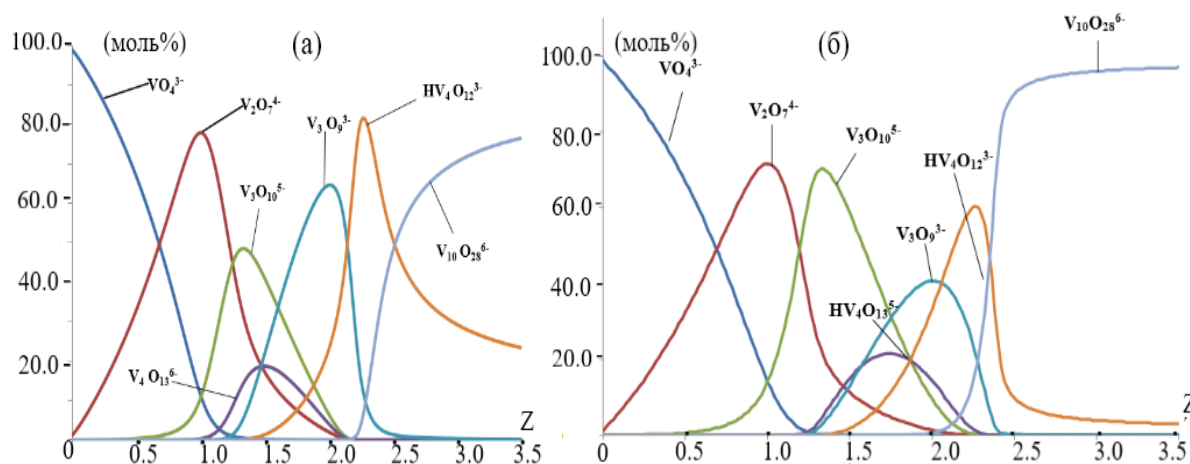


Рис. 4. Диаграммы распределения ионов (моль%) в системах $\text{Na}_3\text{VO}_4 - \text{HCl} - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{АН}$ от Z при $C(\text{VO}_4^{3-}) = 0,1$ моль/л с содержанием ацетонитрила (об. %): а) 10, б) 20.

Как видно из рисунка 4, повышение содержания АН до 20 % способствует увеличению образования в системе представляющего практический интерес декаванадат-аниона, а при меньшем содержании растворителя (10 %) в этой области кислотности присутствует значительное количество $\text{HV}_4\text{O}_{12}^{3-}$ иона, что негативно отражается на результатах синтеза кристаллических декаванадатов. Нужно отметить, что триметавандат-анион состава $\text{V}_3\text{O}_9^{3-}$ присутствует в значительных количествах в системах с АН и в водной среде, а в присутствии ДМФА (10 об.%) его образование наблюдается только в 0,01 М растворе ортованадата натрия.

Из диаграммы распределения изополиванадат-ионов следует, что использование 10%-го раствора ацетонитрила нецелесообразно, так как при всех значениях кислотности образования индивидуальных полиоксованадат-ионов обязательно в равновесии присутствуют, причем в значительных количествах, соседствующие анионы, которые будут соосаждаться с целевым продуктом, как это наблюдалось в водной среде.

Поэтому при целенаправленном синтезе необходимо учитывать природу органического растворителя, его количественное содержание в водно-органической смеси и исходную концентрацию ортованадат-иона.

Для того, чтобы наглядно убедиться о влиянии растворителя на образование ИПВА (изополиванадат - аниона), а также с целью установить соответствие между состоянием ионов в жидкой и присутствием их в твердой фазе, далее был проведен синтез солей с органическим катионом – тетраэтиламмонием при разных кислотностях в водно-диметилформамидной и ацетонитрильной средах с концентрацией ортованадата натрия 0,1 моль/л и содержанием ДМФА (АН) 20 об. %.

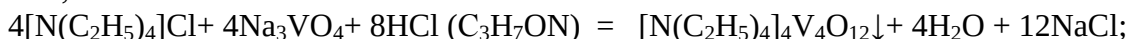
Условия синтеза изополиванадатов тетраэтиламмония в водно-органической среде. Таким образом, чтобы выяснить какие ионы могут перейти при выбранном значении Z из раствора в твердую фазу, а также при других теоретических значениях кислотности был использован катион тетраэтиламмоний. Выбор этого катиона с большим ионным радиусом обусловлен тем, что согласно литературным данным органические катионы, часто с тетрабутиламмонием, используют при синтезе полиоксометаллатов редких элементов. Использование диметилформамида в нашем случае обусловлен тем, что в отличие от водной так и водно-ацетонитрильной среды в его присутствии образуются изополиванадат-анионы, имеющие другой состав, а область кислотности (Z) существования интересующего нас индивидуального декаванадат-аниона по данным исследования становится наиболее оптимальной для синтеза.

Полученные соли с органическим катионом имели окраску от белой и коричневой до оранжевой. Результаты исследований синтеза солей показали, что индивидуальные продукты, составы которых приведены в таблице 5, образуются при следующих значениях кислотности Z: 1,33–1,40; 2,00–2,25; 2,40–3,00 по химическим реакциям:

Z=1,33:



Z=2,00:



Z=2,40:



Данные химического анализа подтвердили ожидаемые результаты образования три-, тетра- и декаванадата с тетраэтиламмонием в среде с ДМФА (таблица 5).

Таблица 5

Химические составы выделенных изополиванадатов тетраэтиламмония

Кислотность, Z pH _{синтеза}	Химическая формула Характеристики выделенных солей	Результаты химического анализа				
			C, %	H, %	N, %	V, %
1,33–1,40 6,94	[N(C ₂ H ₅) ₄] ₅ V ₃ O ₁₀ ·C ₃ H ₇ ON·4H ₂ O Мелкокристаллический белого цвета Тетраэтиламмония триполиванадат	Найдено	45,01	9,56	6,85	13,00
		вычислено	45,91	10,23	7,47	13,61
2,00–2,25 6,38	[N(C ₂ H ₅) ₄] ₄ V ₄ O ₁₂ · 2C ₃ H ₇ ON·4H ₂ O Кристаллы темно-коричневого цвета Тетраэтиламмония тетраванадат	Найдено	45,01	9,56	6,85	13,00
		вычислено	44,41	8,27	7,46	16,53
2,40–3,00 5,22	[N(C ₂ H ₅) ₄] ₆ V ₁₀ O ₂₈ · 4C ₃ H ₇ ON·4H ₂ O Кристаллы оранжевого цвета Тетраэтиламмония декаванадат	Найдено	33,36	6,56	6,05	23,60
		вычислено	34,25	7,42	6,67	24,26

В условиях эксперимента не удалось выделить из раствора тетраванадат -анион состава V₄O₁₃⁶⁻ и протонированные формы HV₄O₁₃⁵⁻; HV₄O₁₂³⁻. Следует отметить, что в водно-диметилформамидной среде при повышенном содержании органического растворителя образование протонированных форм полиоксованадатов в отличие от водной среды не характерно, что объясняется повышенной основностью этого растворителя как активного акцептора протонов.

Идентификацию аниона в составе индивидуальных солей проводили методом ИК-спектроскопии (рис. 5) и сравнивали значения волновых чисел функциональных групп анионов с имеющимися литературными данными [5, 8, 26, 27].

Колебания в области 1000–950 см⁻¹ относятся к колебаниям концевых связей V=O; 830–740 см⁻¹ – асимметричные колебания мостиковых связей V – O – V; 440–630 см⁻¹ – симметричные колебания мостиковых связей V – O – V. Таким образом, характер колебаний в ИК-спектрах в области 400–1000 см⁻¹ – так называемой области «отпечатков пальцев» – позволяет предложить состав аниона в выделенных солях на основе сравнения с литературными данными. Колебания сложных мостиковых металл-кислородных связей (тройных и более) проявляются в областях от 550 и ниже обратных сантиметров. Низкоинтенсивные полосы в области 425–410 см⁻¹ относятся к деформационным колебаниям длинных металл-кислородных связей V–O.

Валентные колебания молекул воды проявляются в области 3200–3365 см⁻¹. Деформационные колебания этих групп проявляются дублетом в области 1630 см⁻¹.

Синглетные полосы в области 3400 и 2160 см⁻¹, триплет в области 2900–2870 см⁻¹ и дуплет в области 1460–1480 см⁻¹ относятся к частотам колебаний NH.

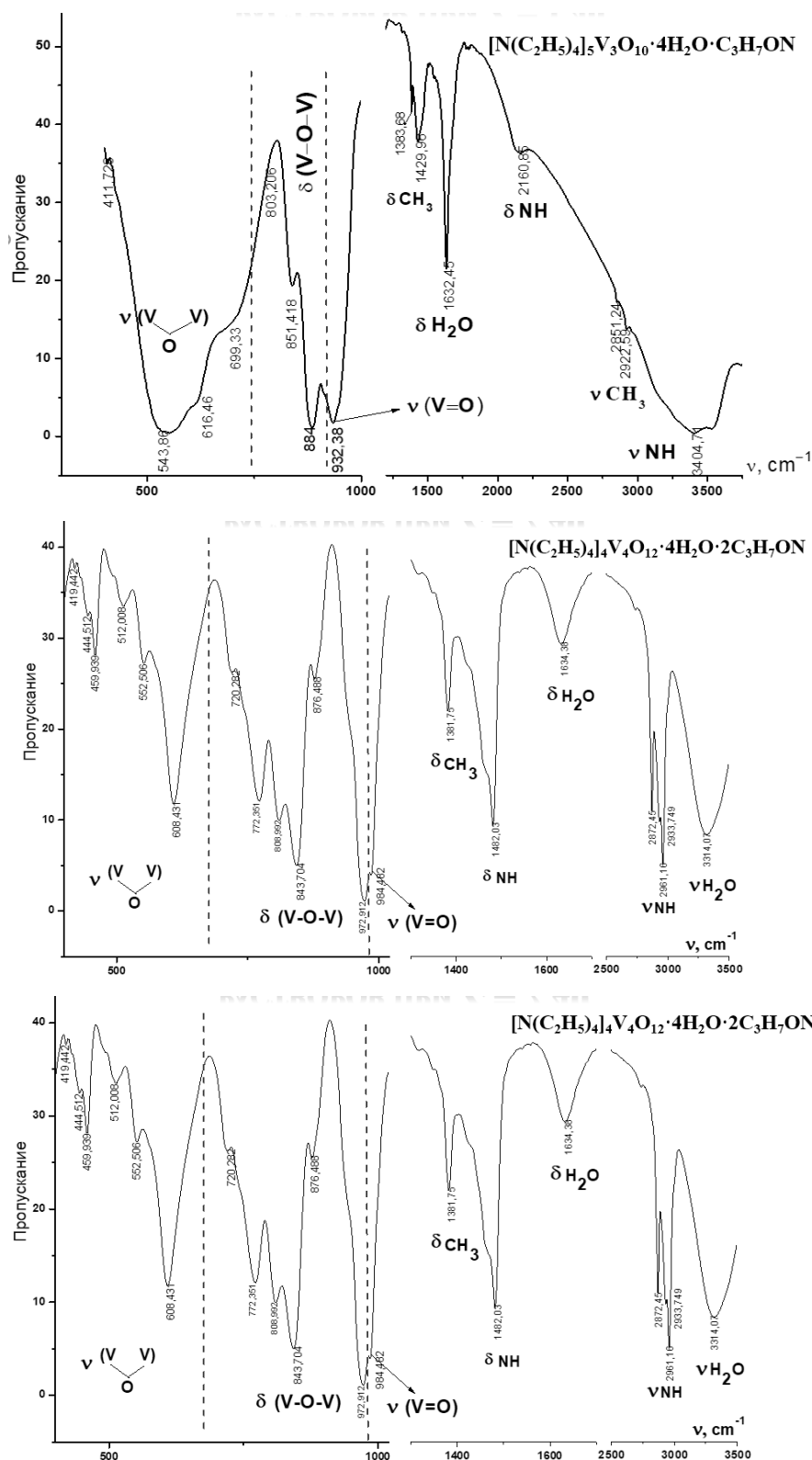


Рис.5 ИК-спектры изополиванадатов тетраэтиламмония

Валентные колебания CH_3 групп проявляются в области $2860\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$. Деформационные колебания этих групп проявляются дублетом в области 1480 cm^{-1} (см. рис. 5).

Как видно из рисунка, формы ИК-спектров, синтезированных индивидуальных солей и интенсивности полос пропускания при различных значениях волновых чисел функциональных групп аниона отличаются и согласуются с имеющимися данными для изополиванадатов с органическим и неорганическим катионами, то можно считать присутствие три-, тетра и декаванадат- анионов в составе твердых фаз. Это подтверждает образование в процессе реакций поликонденсации их устойчивых форм в водно-диметилформамидной среде в установленных интервалах кислотности.

Предлагаемый в данной работе подход к синтезу изополиванадатов направлен, прежде всего, на поиск областей существования декаванадат-иона, как наиболее перспективного и трудно осаждаемого из известных полиоксованадат-анионов, с целью нахождения оптимальных условий синтеза кристаллических солей.

В водно-ацетонитрильной среде с тетраэтиламмонием в кристаллическом виде был получен только декаванадат состава $[N(C_2H_5)_4]_6 V_{10}O_{28} \cdot 3H_2O \cdot 7CH_3CN$. Соли, содержащие триванадат- и протонированный тетраванадат составов $[N(C_2H_5)_4]_5 V_3O_{10} \cdot 9H_2O \cdot 2CH_3CN$ и $[N(C_2H_5)_4]_3 (HV_4O_{12}) \cdot 7H_2O \cdot 3CH_3CN$, осаждаются в мелкокристаллическом состоянии.

При других значениях кислотности в исследуемых средах с ДМФА и АН образуются мелкокристаллические продукты, представляющие собой смесь основного доминирующего изополиванадата и фазы, содержащей, по-видимому, соседствующий по кислотности анион.

Результаты рентгенофазового анализа индивидуальных изополиванадатов с катионами тетраэтиламмония указывают на образование кристаллических продуктов, о чем свидетельствуют на рентгенограммах интенсивные рефлексy. Различные углы отражения на рентгенограмме каждого образца подтверждают их различную кристаллическую структуру, расшифровать которую по данным ASTM на данный момент не представилось возможным (рис. 6).

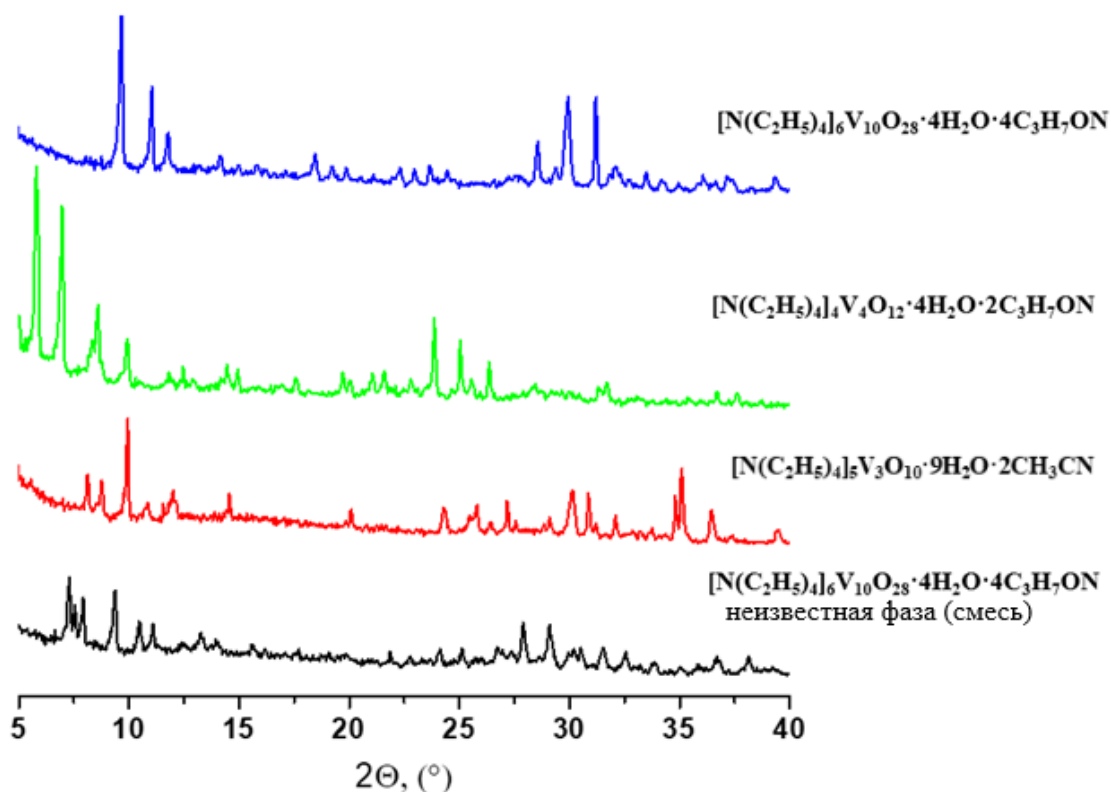


Рис. 6. Рентгенограммы изополиванадатов

Выводы

1. Методом потенциометрического титрования и математического моделирования изучено состояние изополиванадат-анионов в системах Na_3VO_4 ($C=0,01$; $0,1$ мол/л) – HCl – NaCl – $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ (CH_3CN) – H_2O при $25,0 \pm 0,1$ °C. Предложены диаграммы распределения доминирующих изополианионов в подкисленных водно-диметилформамидных ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) и в водно-ацетонитрильных (CH_3CN) растворах ортованадата натрия.

2. Установлено, что на осаждение изополиванадатов влияет кислотность, концентрация, соотношение исходных компонентов, природа катиона и полярность растворителя.

3. Определено стабилизирующее воздействие диметилформамидной среды на три-; тетра- и декаванадат -анионы. В водно-ацетонитрильной среде стабилизируются протонированный тетра- и декаванадат анионы.

4. На основании данных химического, ИК – спектроскопического методов анализа идентифицированы синтезированные соединения изополиванадатов тетраэтиламмония в водно-диметилформамидной среде состава: $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot 4\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_4\text{V}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_5\text{V}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot \text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$. В водно-ацетонитрильной среде получены мелкокристаллические соли состава: $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 3\text{H}_2\text{O} \cdot 7\text{CH}_3\text{CN}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_5\text{V}_3\text{O}_{10} \cdot 9\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{CH}_3\text{CN}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_3(\text{HV}_4\text{O}_{12}) \cdot 7\text{H}_2\text{O} \cdot 3\text{CH}_3\text{CN}$,

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012400342-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Catalytic application of polyoxovanadates in the selective oxidation of organic molecules/ J.Li, D.Zhang, Y.Chi, C.Hu // Polyoxometalates.–2022.–Vol.1, no.2.–P.9140012.– DOI: 10.26599/POM.2022.9140012. – URL: <https://www.sciopen.com/article/10.26599/POM.2022.9140012>
2. Пассивация никеля в присутствии ванадия на катализаторах крекинга / И. И. Шакиров, С. В. Лысенко, С. В. Кардашев и др. // Нефтехимия. – 2024. – Т. 64, № 3. – С. 204–219. – DOI: 10.31857/S0028242124030027.
3. Ванадийсодержащие гетерополиокислоты структуры Кеггина как прекурсоры сульфидных катализаторов. Закономерности превращения дибензотиофена и нафталина на непротонированных Мо–V-катализаторах / В. В. Тимошкина, С. В. Юдинцев, Е. Д. Френкель, Ал. А. Пимерзин // Нефтехимия. – 2022. – Т. 63, № 5. – С. 691–701. – DOI: 10.31857/S0028242122050082.
4. Anjass M. Molecular Vanadium Oxides for Energy Conversion and Energy Storage: Current Trends and Emerging Opportunities / M. Anjass, G. A. Lowe, C. Streb // Angewandte Chemie International Edition.– 2020. – Vol. 60, No14. – P. 7522-7532. – DOI:10.1002/anie.202010577.
5. Tuning the light absorption of a molecular vanadium oxide system for enhanced photooxidation performance / J .Forster et al. // Chemical Communications. – 2011. – V. 47, –n. 11. – P. 3114-3116. – DOI: 10.1039/c0cc05536k
6. A new decavanadate polyoxovanadate nanocluster: Synthesis, characterization and rapid adsorption of methylene blue / H. Naslhajian, M. Amini, S. M. F. Farnia et al. // Journal of Coordination Chemistry. – 2017. – Vol. 1. – P. 1-19. – DOI: 10.1080/00958972.2017.1383601
7. A Modular Programmable Inorganic Cluster Discovery Robot for the Discovery and Synthesis of Polyoxometalates. / Daniel S. Salley, Graham A. Keenan, De-Liang Long et al. // ACS Central Science Received. – 2020. – Vol. 8. – 7 p. – DOI: 10.1021/acscentsci.0c00415
8. Оптимизация синтеза солей $[\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{6-}$ для получения $[\text{VO}_2(\text{DMSO})_4](\text{CF}_3\text{SO}_3)$ и нанесение его на ПЭТ для каталитических приложений / П. А. Абрамов, Н. Б. Компаньков, В. С. Суляева, М. Н. Соколов // Ж. координационной химии. – 2024.– Т. 50, № 12. – С. 809–816. – DOI: 10.31857/SO132344X24120017. – EDN: LMIEVQ.
9. Long D.L. Polyoxometalate clusters, nanostructures and materials: From self assembly to designer materials and devices / D.L. Long, E. Burkholder, L. Cronin // Chem. Soc. Rev. – 2007. –Vol. 36, No 1. – P. 105–121. – DOI: 10.1039/b502666k

10. Decavanadate Salts of Cytosine and Metformin: A Combined Experimental-Theoretical Study of Potential Metallodrugs Against Diabetes and Cancer / E. Sánchez-Lara, S. Trevino, B. L. Sánchez-Gaytán et al. // *Frontiers in Chemistry*. – 2018. – Vol. 6. – P. 402–417. – DOI: 10.3389/fchem.2018.00402
11. Krivosudsky L. Tuning the interactions of decavanadate with thaumatin, lysozyme, proteinase K and human serum proteins by its coordination to a pentaquacobalt(II) complex cation / L. Krivosudsky, A. Roller, A. Rompel // *New J. Chem.* – 2019. – Vol. 43. – P. 17863–17871. – DOI: 10.1039/C9NJ02495F
12. Fraqueza G. Polyoxovanadates Contribution to Pharmacological, Antimicrobial and Toxicological Actions of Vanadium / G. Fraqueza, M. Aureliano // *Biosystems in Toxicology and Pharmacology - Current Challenges*. – 2022. – Vol. 11, No. 1. – P. 12844. – DOI: 10.3390/BiTaP-12844.
13. Aureliano M. Polyoxovanadates with emerging biomedical activities / M. Aureliano, N. I. Gumerova, G. Sciortino // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2021. – Vol. 447. – P. 214143. – DOI: 10.1016/j.ccr.2021.214143.
14. Reichard C. Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry / C. Reichard, T. Welton. – New York: VCH. – 2010. – 718 p.
15. Gholami M.R. Dual-parameter correlations on rate of an aromatic nucleophilic substitution reaction in aqueous solutions of methanol, ethanol and propan-2-ol / M. R. Gholami, A. H. Yangieh // *Int. J. Chem. Kinet.* – 2001. – Vol. 33, No 2. – P. 118 – 123.
16. Hush N.S. Solvent Effects on the Electronic Spectra of Transition Metal Complexes / N.S. Hush, J.R. Reimers // *Chemical Reviews*. – 2000. – Vol. 100, No 2. – P. 775–786.
17. Розанцев Г. М. Некоторые уточнения состояния ионов ванадия (V) в водном растворе / Г. М. Розанцев, О. И. Сазонова, Ю. В. Холин // *Журн. неорг. химии*. – 1999. – Т. 44, № 12. – С. 1992–1997.
18. Розанцев Г. М. Влияние ионной силы на константы образования изополианионов ванадия (V) в водном растворе / Г. М. Розанцев, О. И. Сазонова // *Вопросы химии и хим. технологии*. – 2000. – № 1. – С. 86–88.
19. Холин Ю.В. Количественный физико-химический анализ комплексообразования в растворах и на поверхности химически модифицированных кремнезёмов: содержательные модели, математические методы и их приложения / Ю.В. Холин. – Харьков: Фолио, 2000. – 288 с.
20. Александров В. В. Кислотность неводных растворов / В. В. Александров. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – С. 32–90.
21. Papanastasiou, G. Determination of hydrogen ion activity in various binary dimethylformamide/water and ternary dimethylformamide/dioxane/water solvent systems / G. Papanastasiou, I. Ziogas // *Analitica Chimica Acta*. – 1989. – No 221. – P. 295–303.
22. Пойманова Е.Ю. Определение условий образования декавольфрамат-анионов в водно-диметилформамидной среде / Е.Ю. Пойманова, Г.М. Розанцев, Е.Е. Белоусова // *Вестник Донецкого национального университета. Сер. А: Естественные науки*. – 2012. – № 1. – С. 152–156.
23. Пойманова, Е.Ю. Полиоксовольфрамат-анионы в водно-органических растворах и их соли: Автореферат дис. канд. хим. наук. – Краснодар: КубГУ. – 2018. – 20 с.
24. Особенности синтеза изополимолибдатов из водно-диметилформамидных растворов / Белоусова Е.Е., Пойманова Е.Ю., Хомутова Е.В. // *Вестник Донецкого национального университета. Сер. А: Естественные науки*. – 2020. – № 1. – С. 54–121.
25. Migron, Y. Polarity and Hydrogen-bonding Ability of Some Binary Aqueous-Organic Mixtures / Y. Migron, Y. Marcus // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* – 1991. – Vol. 87, No 9. – P. 1339–1343.
26. Елфимов В. И. Исследование области существования декаванадат-ионов с целью совершенствования методики синтеза кристаллических декаванадатов из растворов / В.И. Елфимов, С.С. Бабкина, Н.А. Улахович // *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. – 2014. – Т. 156, № 2. – С. 9–15.
27. Hexaachromium (III) trihydrogenisopolyvanadate $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]_3[\text{V}_{10}\text{O}_{28}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Synthesis and study / A. F. Stepnova et al. // *Russian Journal of Coordination Chemistry*. – 2013. – Vol. 39, No 6. – P. 475–477.
28. Синтез изополиванадатов и изополивольфраматов иттрия в водных и водно-диметилформамидных растворах / Белоусова Е. Е., Задорожная Е. С., Кретьева Е. А., Хомутова Е. В. // *Химические проблемы современности 2022 : Сборник материалов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк, 17–19 мая 2022 г.* – Донецк: Донецкий национальный университет, 2022. – С. 68–69.

Поступила в редакцию 25.08.2025 г.

PHYSICO-CHEMICAL STUDY OF THE PROCESSES OF ISOPOLIVANADATE FORMATION IN AQUEOUS-ORGANIC MEDIUM

E. E. Belousova, V. S. Golubovich, E. V. Khomutova, N. V. Yablochkova

Based on the results of modeling the processes of complexation of isopolyvanadate anions in Na_3VO_4 ($C=0.01$; 0.1 mol/L) – HCl – NaCl – $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ (CH_3CN) – H_2O systems at $25.0 \pm 0.1 \text{ S}$, polycondensation reactions in aqueous dimethylformamide ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) and aqueous acetonitrile (CH_3CN) solutions of sodium orthovanadate were studied; diagrams of the distribution of dominant isopolyanions depending on the acidity and nature of the medium are proposed; it is found that it is more expedient to use solutions with a concentration of $C(\text{VO}_4^{3-}) > 0.1 \text{ mol/l}$ and an organic solvent content of 20–30 vol.% for the synthesis of salts. Data from chemical, X-ray phase, IR spectroscopic are synthesized and characterized composition $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot 4\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_4\text{V}_4\text{O}_{12} \cdot 4 \text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_5\text{V}_3\text{O}_{10} \cdot 4 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$; $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4]_6\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 3\text{H}_2\text{O} \cdot 7\text{CH}_3\text{CN}$.

Keywords: complex formation, modeling, water-dimethylformamide and water-acetonitrile medium, synthesis, tetraethylammonium isopolyvanadates.

Белюсова Екатерина Евгеньевна

Кандидат химических наук, доцент;
доцент кафедры неорганической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: kat.belousova.dgu@mail.ru

Belousova Ekaterina Evgenievna

Candidate of Chemical Sciences, docent;
Associate Professor of Department of Inorganic
Chemistry,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Голубович Виктория Сергеевна

Заведующий лабораторией кафедры
неорганической химии,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ
E-mail: viktoriya_golubovich@mail.ru

Golubovich Viktoriya Sergeevna

Head of the Laboratory of the Department of Inorganic
Chemistry,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Хомутова Екатерина Валерьевна

Кандидат биологических наук;
И. о. директора ФГБНУ «Институт
физикоорганической химии и углехимии
им.Л.М.Литвиненко», г. Донецк, ДНР, РФ
E-mail: ek.khomutova75@andex.ru

Khomutova Ekaterina Valerievna

Candidate of Biological Sciences; acting director,
L.M.Litvinenko institute of physical organic and coal
chemistry, Donetsk, DPR, RF

Яблочкова Наталья Васильевна

Кандидат химических наук, доцент;
заведующий кафедрой неорганической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: n.iablochkova@donnu.ru

Yablochkova Natalia Vasilyevna

Candidate of Chemical Sciences, docent
Head of the Department of Inorganic Chemistry
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЛИГНИНА, ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ГЕМИЦЕЛЛЮЛОЗ В РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПО ИК-СПЕКТРАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИ СМОДЕЛИРОВАННЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

© 2025. С. Г. Кострюков, А. Ю. Асфандеев

В работе представлена методика количественного определения лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в растительной биомассе с использованием ИК-Фурье спектроскопии, основанная на математическом построении градуировочных зависимостей. Основу методики составляет получение смесевых спектров путем математического сложения спектров индивидуальных компонентов с учетом их весового содержания. Модельные градуировочные функции отражают зависимость интенсивности поглощения аналитических полос от содержания соответствующих компонентов: лигнина ($1490\text{--}1520\text{ см}^{-1}$), целлюлозы ($1308\text{--}1350\text{ см}^{-1}$) и гемицеллюлозы ($1710\text{--}1755\text{ см}^{-1}$). Особенностью подхода является исключение необходимости подготовки большого количества реальных калибровочных образцов, что значительно сокращает время и стоимость анализа. Методика позволяет значительно сократить время подготовки калибровки по сравнению с традиционными методами, сохраняя при этом высокую точность анализа. Разработанная методика была апробирована на 20 образцах растительной биомассы различных видов, а полученные результаты сопоставлены с данными традиционных методов анализа. Результаты представляют ценность для контроля качества сырья в биоэнергетике и целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: ИК-Фурье спектроскопия, математическое моделирование, растительная биомасса, лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза, количественный анализ, градуировочные функции.

Введение. ИК-Фурье спектроскопия зарекомендовала себя как один из наиболее эффективных инструментов анализа растительных материалов [1, 2]. Ключевые преимущества метода включают: минимальные требования к пробоподготовке, возможность неразрушающего контроля, высокую скорость получения результатов и информативность. В последние десятилетия данный метод нашел широкое применение для решения разнообразных аналитических задач, связанных с исследованием растительных материалов и продуктов их переработки, например, исследовался компонентный состав древесины [3], стойкость термомодифицированных образцов древесины к грибкам бурой или белой гнили [4], разработана методика ИК-визуализация и картирование растительных материалов [5, 6], разработана методика для оценки содержания фитоканнабиноидов в цветках и экстрактах каннабиса [7] и ряда других лекарственных трав [8, 9], для проверки ботанических материалов на фальсификацию [10], для прогнозирования закономерностей минерализации углерода и азота растительного опада [11], для анализа химических изменений в растительных материалах, происходящих во время термического разложения [12], для анализа археологической древесины [13]. Определение компонентного состава растительной биомассы необходимо для оптимизации технологий её переработки и повышения эффективности получения целевых продуктов, полученные с помощью ИК спектроскопии данные способствуют разработке новых методов обработки и переработки растительного сырья [14–17].

В России использование ИК-спектроскопии для анализа древесины берёт начало во второй половине XX века [18], и с тех пор это направление исследований продолжает активно развиваться. Благодаря этому методу стали возможны точное определение содержания лигнина в таких материалах, как бумага [19] и сульфатная целлюлоза [20, 21].

Активное внедрение ИК-спектроскопии в практику анализа растительных материалов в последние годы [22, 23] обусловлено такими преимуществами метода, как универсальность, экспрессность и отсутствие необходимости сложной пробоподготовки. Если традиционная средняя ИК-область даёт возможность быстрого анализа, то ближняя ИК-спектроскопия открывает новые перспективы за счёт повышенной чувствительности к функциональным группам и структурным элементам биомассы [24–28].

Постановка задачи. Настоящее исследование направлено на разработку и валидацию экспресс-методики количественного анализа целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина в растительной биомассе с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Методика основана на построении градуировочных зависимостей через математическое моделирование смесевых спектров как суммы спектров индивидуальных компонентов с весовыми коэффициентами, соответствующими их содержанию.

В ходе наших более ранних исследований была разработана аналитическая методика количественного определения целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Данный подход основан на установлении градуировочных зависимостей между содержанием компонентов и интенсивностью их характеристических полос поглощения [29, 30]. В этих работах для построения калибровочных кривых использовались специально приготовленные тройные смеси с варьируемым содержанием лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы.

В данной работе был апробирован новый подход к построению калибровочных зависимостей, построенных по спектрам тройных смесей, полученных в результате математического сложения ИК-спектров целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы с соответствующими коэффициентами. На наш взгляд такой подход позволит исключить трудоемкий этап приготовления тройных смесей; позволит минимизировать погрешности, связанные с неоднородностью реальных смесей; сократить время подготовки данных для построения градуировочных графиков.

Экспериментальная часть. Материалы и методы исследования.

Исходные вещества. В качестве стандартов основных структурных компонентов растительной биомассы были использованы микрокристаллическая целлюлоза (Sigma-Aldrich, 435236), технический лигнин крафт-процесса (Sigma-Aldrich, 471003), ксилан из кукурузных початков, 90.0 %, CAS 9014-63-5 (компания Молекулаб). Все образцы перед спектроскопическими исследованиями подвергали стандартной процедуре кондиционирования, включающей: сушку в термостате при температуре 105 ± 2 °C в течение 5 ч и охлаждение в эксикаторе над CaCl_2 .

В исследовании использовали 20 образцов растительных материалов различного происхождения: древесину, сельскохозяйственные отходы и травянистые остатки. Сельскохозяйственные отходы включали: пшеничную солому (сорт Саратовская 36), ячменную солому (сорт Казанский 6/4), овсяную солому (сорт Победа), стебли и сердцевины початков кукурузы (сорт Стерлинг), стебли и скорлупу семян подсолнечника (сорт Енисей). Эти материалы были предоставлены местными сельхозпроизводителями. Также были исследованы дикорастущие виды: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), золотарник канадский (*Solidago canadensis*), донник белый (*Melilotus albus*), стебли лопуха (*Arctium lappa*), стебли цикория (*Cichorium*), стебли крапивы двудомной (*Urtica dioica*). Образцы растительных материалов собрали в пойме реки Инсар в июле.

Подготовка образцов включала сушку при комнатной температуре в течение недели. Доведение до абсолютно сухого состояния при 105 °C в термовентилируемой печи (5 часов), измельчение до фракции 50 мкм на ультрацентрифужной мельнице Retsch ZM 200 и экстракцию хлористым метилом для удаления неполярных и слабополярных экстрактивных веществ, которые могут мешать последующему анализу основных структурных компонентов (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы).

Определение неполярных и слабополярных экстрактивных веществ, зольности и целлюлозы проводили по стандартным методикам, приведенным в пособие [31]. Лигнин определяли по методике, приведенной в ГОСТе [32]. Гемицеллюлозу определяли по методике, приведенной в работе [33].

Методика ИК-спектроскопического анализа. ИК-спектры всех образцов регистрировали в режиме пропускания для таблеток с бромидом калия. Подготовка образцов осуществлялась в соответствии со стандартизированным протоколом, включающим следующие этапы: соотношение растительного материала и KBr (1:100); толщина прессованных таблеток ($0,55 \pm 0,02$ мм) с помощью калиброванного микрометра; однородная дисперсность порошков (< 20 мкм) достигалась путем механического измельчения в агатовой ступке, а затем в полуавтоматическом вибрационном контейнере из карбида вольфрама на вибрационной мельнице Herzog HP-M 100 в течение 40 с. Для обеспечения воспроизводимости результатов добивались одинаковой дисперсности образцов, поскольку время измельчения и размер частиц оказывают значительное влияние на форму ИК-спектров [34]. Из полученных порошков отбирали 200 мг и прессовали таблетки на гидравлическом прессе («Lab Tools») при давлении 20 МПа. Для каждого образца записывали по три независимых ИК-спектра.

Спектры получали на ИК-Фурье-спектрометре «Инфра ЛЮМ ФТ-08» в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . Для повышения качества данных использовалась аподизация функцией Бесселя. Время накопления составляло 60 секунд. Спектры записывали при температуре окружающей среды от 20 до 25 °С, при нормальном атмосферном давлении и относительной влажности воздуха не выше 80 %. Обработка спектров осуществлялась с помощью программного обеспечения СпектрАЛЮМ версии 2.0.1.295.

На рис. 1 приведены ИК-Фурье спектры целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, наложенные друг на друга. При рассмотрении спектров можно выделить различия: гемицеллюлоза отличается полосой поглощения $\sim 1737\text{ см}^{-1}$, лигнин $\sim 1511\text{ см}^{-1}$, а для целлюлозы были выбраны две, наиболее выделяющиеся полосы $\sim 1165\text{ см}^{-1}$ и $\sim 1355\text{ см}^{-1}$, но на них в той или иной степени накладываются полосы лигнина и гемицеллюлозы.

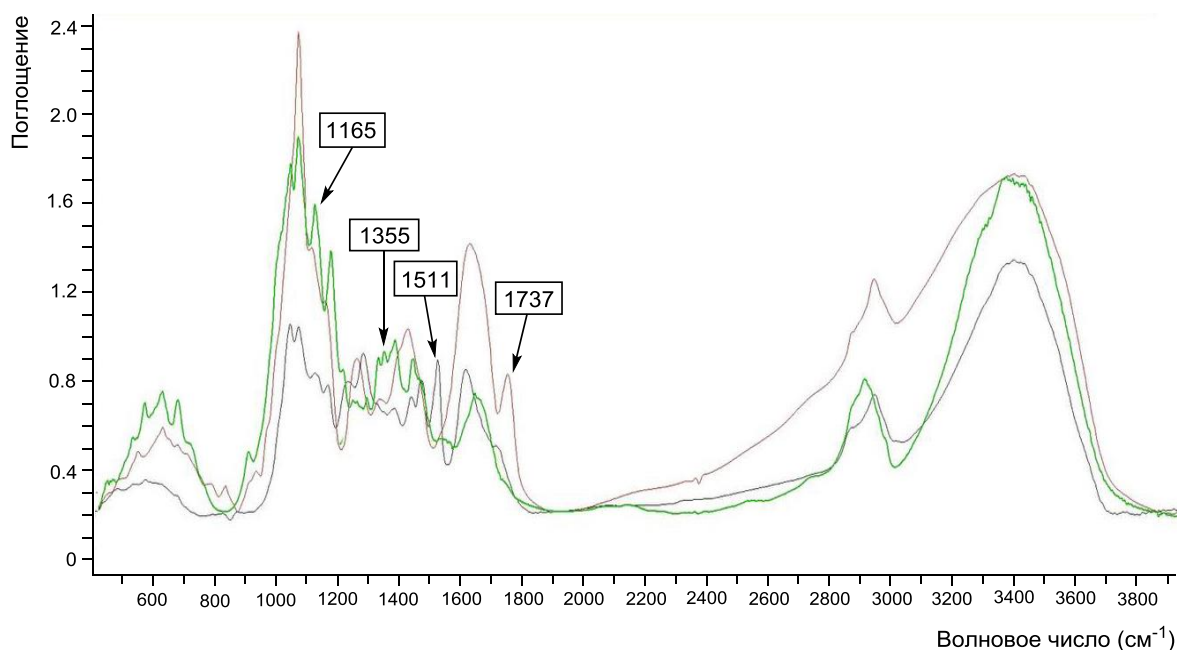


Рис 1. ИК-Фурье спектры гемицеллюлозы, лигнина и целлюлозы, наложенные друг на друга

Стрелками указаны полосы поглощения, которые были использованы для построения калибровочных графиков.

Анализ результатов. При анализе ИК-спектров целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы выявляются характерные различия в интенсивностях и положениях отдельных полос поглощения, что позволяет использовать их для качественного и количественного определения компонентов. Так, для определения гемицеллюлозы была выбрана область спектра $1710\text{--}1755\text{ см}^{-1}$, которая соответствует валентным колебаниям $\text{C}=\text{O}$ в ацетильных группах ацетилксилозы, являющихся характерной структурой гемицеллюлозных соединений. Для идентификации лигнина использовалась область $1490\text{--}1520\text{ см}^{-1}$, обусловленная скелетными колебаниями ароматического кольца, что является типичным признаком лигнина. В случае целлюлозы были использованы две области $1150\text{--}1175\text{ см}^{-1}$ и $1308\text{--}1350\text{ см}^{-1}$. Такой подбор характеристических полос поглощения является целесообразным, поскольку он позволяет дифференцировать компоненты растительной биомассы и повышает точность количественного анализа за счет использования наиболее ярко выраженных и уникальных спектральных признаков каждого из них.

ИК спектры целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина были использованы для математического построения модельных спектров тройных смесей. Модельные спектры тройных смесей были построены с помощью программы «СпектраЛюм», используя команду «Смесь», представляющую собой операцию сложения нескольких спектров с коэффициентами (Вычисление – Смесь).

Составы модельных тройных смесей, использованных для построения градуировочных зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы модельных тройных смесей стандартных веществ в %

Для определения гемицеллюлозы			Для определения лигнина			Для определения целлюлозы		
Гемицеллюлоза	Целлюлоза	Лигнин	Лигнин	Гемицеллюлоза	Целлюлоза	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлоза
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	80	10	10	80	10	10	80	10
10	10	80	10	10	80	10	10	80
10	70	20	10	70	20	10	70	20
10	20	70	10	20	70	10	20	70
10	60	30	10	60	30	10	60	30
10	30	60	10	30	60	10	30	60
10	50	40	10	50	40	10	50	40
10	40	50	10	40	50	10	40	50
20	70	10	20	70	10	20	70	10
20	10	70	20	10	70	20	10	70
20	60	20	20	60	20	20	60	20
20	20	60	20	20	60	20	20	60
20	50	30	20	50	30	20	50	30
20	30	50	20	30	50	20	30	50
20	40	40	20	40	40	20	40	40
30	60	10	30	60	10	30	60	10
30	10	60	30	10	60	30	10	60
30	50	20	30	50	20	30	50	20
30	20	50	30	20	50	30	20	50
30	40	30	30	40	30	30	40	30
30	30	40	30	30	40	30	30	40

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	50	10	40	50	10	40	50	10
40	10	50	40	10	50	40	10	50
40	40	20	40	40	20	40	40	20
40	20	40	40	20	40	40	20	40
40	30	30	40	30	30	40	30	30
50	40	10	50	40	10	50	40	10
50	10	40	50	10	40	50	10	40
50	30	20	50	30	20	50	30	20
50	20	30	50	20	30	50	20	30
60	30	10	60	30	10	60	30	10
60	10	30	60	10	30	60	10	30
60	20	20	60	20	20	60	20	20
70	10	20	70	10	20	70	10	20
70	20	10	70	20	10	70	20	10
80	10	10	80	10	10	80	10	10

Полученные в результате математического сложения спектры тройных смесей целлюлоза-лигнин-гемицеллюлоза, приведены на рисунке 2.

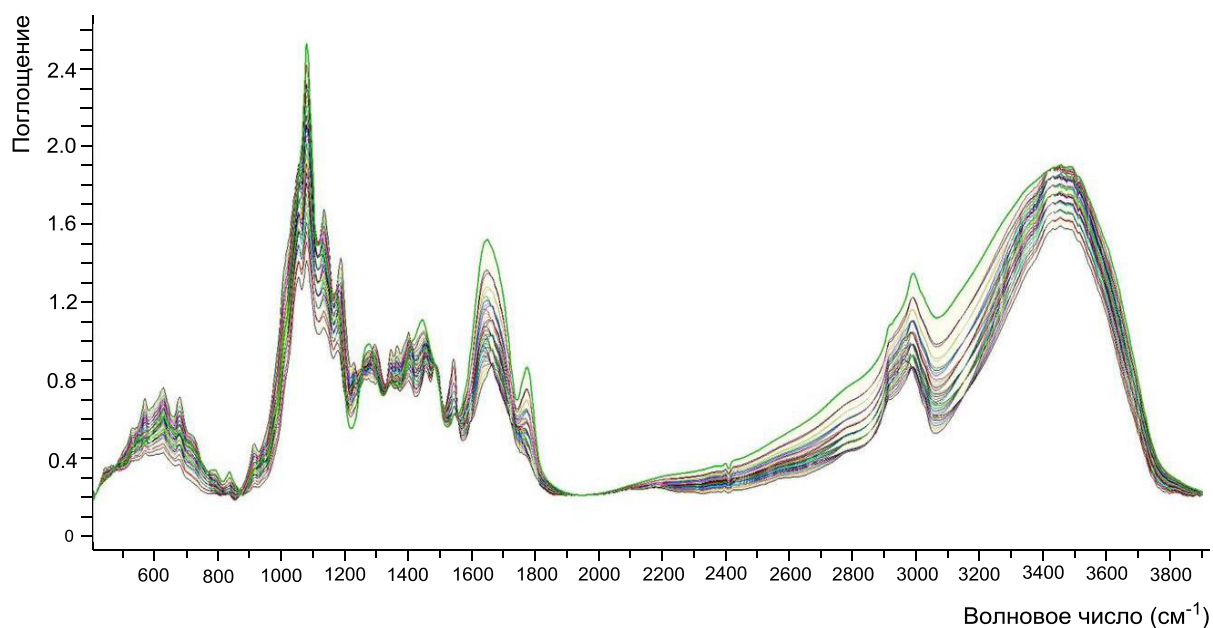


Рис. 2. ИК-Фурье спектры тройных смесей, полученных математическим сложением

Для построения градуировочного графика был использован диапазон от 10 % до 80 %. В этом диапазоне для каждого массового содержания исследуемого компонента использовалось следующее количество измерений: при 10 % – 8 точек, при 20 % – 7 точек, при 30 % – 6 точек, при 40 % – 5 точек, при 50 % – 4 точки, при 60 % – 3 точки, при 70 % – 2 точки и при 80 % – одна точка.

Градуировочные зависимости были построены с помощью программы «СпектралЮм», используя команду «Градуировка» по площадям аналитических пиков с коррекцией базовой линии: для гемицеллюлозы 1710–1755 см^{-1} , для лигнина 1490–1520 см^{-1} . Для целлюлозы были использованы два варианта: 1150–1175 см^{-1} и 1308–1350 см^{-1} . Полученные зависимости, уравнения линейной регрессии и коэффициенты корреляции приведены на рисунках 3–6.

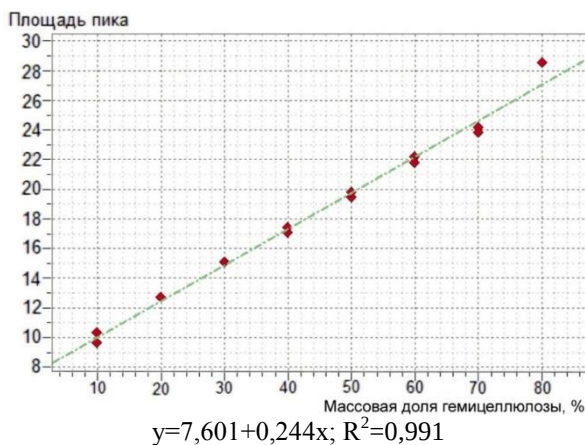


Рис. 3. Уравнение, график градуировочной зависимости и коэффициент корреляции для определения гемицеллюлозы

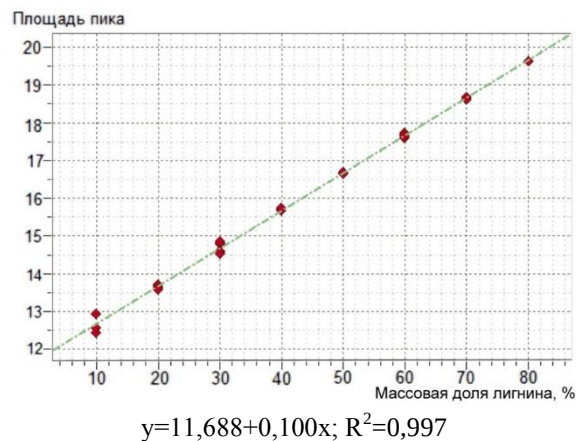


Рис. 4. Уравнение, график градуировочной зависимости и коэффициент корреляции для определения лигнина

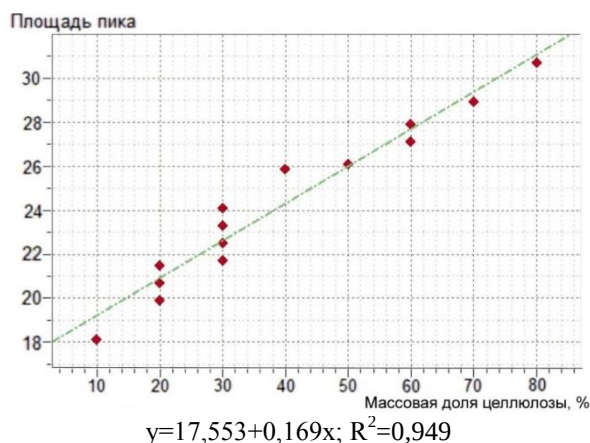


Рис. 5. Уравнение, график градуировочной зависимости и коэффициент корреляции для определения целлюлозы (полоса определения 1150–1175 см⁻¹)

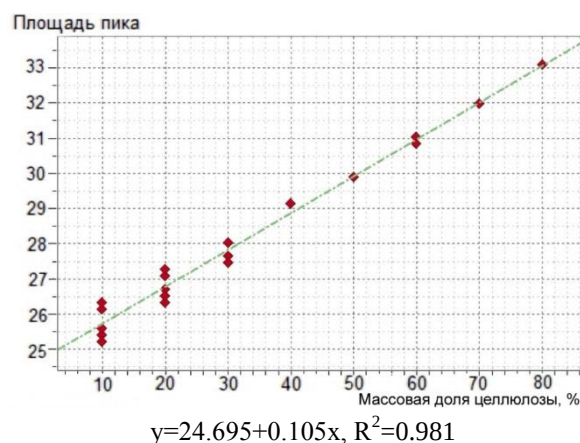


Рис. 6. Уравнение, график градуировочной зависимости и коэффициент корреляции для определения целлюлозы (полоса определения 1308–1350 см⁻¹)

Таким образом, градуировочные зависимости для определения гемицеллюлозы, лигнина и целлюлозы в тройных смесях представляют линейные функции (рис. 3–6) с коэффициентами корреляции близкими к единице. Стоит отметить, что коэффициент корреляции для уравнения определения целлюлозы по полосе поглощения 1150–1175 см⁻¹ меньше, чем для полосы поглощения 1308–1350 см⁻¹, вследствие чего далее в расчётах использовалось второе уравнение.

Применяя полученные уравнения, было вычислено содержание целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы в растительных материалах, которые предварительно были обработаны хлористым метилом для удаления неполярных и слабополярных экстрактивных веществ. Для каждого образца лигноцеллюлозной биомассы регистрировались три спектра, из которых операцией «Вычестъ» был удален спектр «пустой» таблетки KBr, затем была выполнена коррекция базовой линии по двум точкам (850 см⁻¹ и 2 000 см⁻¹), после чего спектры усреднялись и по усредненному спектру определяли площадь соответствующего пика. Перечень образцов лигноцеллюлозной биомассы и вычисленное по уравнениям содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы приведены в таблице 2. Для сравнения приведены данные, полученные с помощью химических методов анализа.

Таблица 2

Перечень образцов лигноцеллюлозной биомассы и массовая доля лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы

№	Образец	Содержание, масс. %					
		Лигнина		Целлюлозы		Гемицеллюлозы	
		ИК	Метод Класона [32]	ИК	Метод Кюршнера–Хоффера [31]	ИК	Щелочная экстракция с ультразвуком [33]
1	Древесина сосны	22,8	26,0	45,1	44,7	22,4	19,5
2	Древесина ели	26,6	27,4	46,0	45,0	21,3	20,7
3	Древесина березы	20,8	20,0	41,4	39,1	27,8	27,3
4	Древесина дуба	27,1	25,4	42,3	40,6	22,6	21,9
5	Древесина тополя	28,1	20,1	41,6	39,1	23,4	20,5
6	Древесина ивы	17,8	17,7	44,2	43,4	24,1	23,8
7	Ячменная солома	10,7	14,2	38,2	35,9	29,4	28,9
8	Пшеничная солома	13,8	13,1	39,3	33,5	32,2	30,1
9	Овсяная солома	14,6	16,7	40,1	35,0	26,1	26,7
10	Стебли кукурузы	12,6	14,5	40,8	38,9	34,2	32,2
11	Сердцевинки початков кукурузы	8,1	10,0	41,2	45,4	28,3	29,1
12	Стебли подсолнечника	12,7	18,6	42,4	34,5	27,9	25,2
13	Скорлупа семян подсолнечника	24,1	26,1	49,2	29,1	21,3	20,7
14	Листья рогоза широколистный	9,8	12,9	28,3	23,8	15,8	14,5
15	Стебли рогоза широколистный	9,7	16,4	41,6	39,3	25,7	24,3
16	Золотарник канадский	12,2	13,0	36,5	33,6	17,9	19,8
17	Донник белый	9,7	12,2	31,8	29,0	21,5	18,6
18	Стебли лопуха	14,6	16,9	32,7	31,9	24,1	23,4
19	Стебли цикорий	12,4	14,5	33,7	34,2	27,2	21,8
20	Крапива двудомная	12,6	10,7	42,3	40,4	20,5	19,7

Как видно из таблицы 2, полученные на основании ИК спектров результаты измерений содержания лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в целом соответствуют результатам, полученным методами химического анализа. Это подтверждает возможность использования ИК-Фурье спектроскопии в качестве альтернативного способа анализа состава растительных материалов. Большим достоинством использования ИК-Фурье спектроскопии является экспрессность анализа, минимальная подготовка (достаточно измельчения и высушивания), небольшие количества образца и то, что анализ является неразрушающим. Однако для получения достоверных результатов требуется измельчение образца до частиц <100 мкм для уменьшения рассеяния света, а сам образец нужно высушить для удаления воды.

Выводы. Таким образом, предложенная методика определения основных компонентов лигноцеллюлозных материалов с использованием ИК-Фурье спектроскопии в сочетании со стандартным методом приготовления таблеток на основе бромида калия является достаточно достоверной. Надежность метода подтверждена его апробацией на широком спектре растительных образцов и сравнением полученных результатов с данными, полученными химическими методами. К ключевым преимуществам методики следует отнести: возможность одновременного определения трех компонентов, сокращение времени анализа, минимизацию использования химических реагентов, неразрушающий характер измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore, A.K. Infrared spectroscopic studies of solid wood / A.K. Moore, N.L. Owen // *Applied Spectroscopy Reviews*. – 2001. – Vol. 36, № 1. – P. 65-86. – DOI 10.1081/ASR-100103090.
2. Xu, F. Analysis of Lignocellulosic Biomass Using Infrared Methodology / F. Xu, D. Wang // *Pretreatment of Biomass*. – 2015. – Charter 2. – P. 7-20. – DOI 10.1016/B978-0-12-800080-9.00002-5
3. Pandey, K.K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy / K.K. Pandey // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1999. – Vol. 71, Iss. 12. – P. 1969-1975. – DOI 10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D.
4. ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi / O. Ozgenc, S. Durmaz, I. Hakki Boyaci, H. Eksi-Kocak // *Drewno*. – 2018. – Vol. 61, No 201. – P. 91-105. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.247.02.
5. Advances of infrared spectroscopic imaging and mapping technologies of plant material / J. Pallua, C. Pezzeti, V. Huck-Pezzei et al. // *Current Bioactive Compounds*. – 2011. – Vol. 7, No 2. – P. 106-117. – DOI 10.2174/157340711796011179.
6. Wetzel, D. L. Synchrotron powered FT-IR microspectroscopy enhances spatial resolution for probing and mapping of plant materials / D. L. Wetzel, J. A. Sweat, D. D. Panzer // *AIP Conf. Proc.* – 1998. – No 430. – P. 354-357. – DOI 10.1063/1.55798.
7. Mid-infrared spectroscopy as process analytical technology tool for estimation of THC and CBD content in Cannabis flowers and extracts / N. Geskovski, G. Stefkov, O. Gigopulu et al. // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2021. – Vol. 251. – ID 119422. – DOI 10.1016/j.saa.2020.119422.
8. Study on Angelica and its different extracts by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation IR spectroscopy / H.-X. Liu, S.-Q. Sun, G.-H. Lv, K.K.C. Chan // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2006. – Vol. 64, Iss. 2. – P. 321-326. – DOI 10.1016/j.saa.2005.07.026.
9. Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared Spectroscopy on Intact Dried Leaves of Sage (*Salvia officinalis* L.): Accelerated Chemotaxonomic Discrimination and Analysis of Essential Oil Composition / G. Gudi, A. Krähmer, H. Krüger, H. Schulz // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2015. – Vol. 63, Iss. 39. – P. 8743-8750. – DOI 10.1021/acs.jafc.5b03852.
10. Chen, J.-B. Adulteration screening of botanical materials by a sensitive and model-free approach using infrared spectroscopic imaging and two-dimensional correlation infrared spectroscopy / J.-B. Chen, Q. Zhou, S.-Q. Sun // *Journal of Molecular Structure*. – 2016. – Vol. 1124. – P. 262-267. – DOI 10.1016/j.molstruc.2015.10.011.
11. Empirical predictions of plant material C and N mineralization patterns from near infrared spectroscopy, stepwise chemical digestion and C/N ratios / S. Bruun, B. Stenberg, T.A. Breland et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2005. – Vol. 37, Iss. 12. – P. 2283-2296. – DOI 10.1016/j.soilbio.2005.04.006.
12. Lammers, K. FT-IR study of the changes in carbohydrate chemistry of three New Jersey pine barrens leaf litters during simulated control burning / K. Lammers, G. Arbuckle-Keil, J. Dighton // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2009. – Vol. 41, Iss. 2. – P. 340-347. – DOI 10.1016/j.soilbio.2008.11.005.
13. Traoré, M. Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood / M. Traoré, J. Kaal, A.C. Martínez // *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2016. – № 153. – P. 63-70. – DOI 10.1016/j.saa.2015.07.108.
14. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava / M. Vallejo, R. Cordeiro, P.A.N. Dias et al. // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2021. – Vol. 8, No 1. – ID 25. – DOI 10.1186/s40643-021-00377-3.
15. Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept / B. Kumar, N. Bhardwaj, K. Agrawal et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – Vol. 199. – ID 106244. DOI 10.1016/j.fuproc.2019.106244.
16. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels / A.K. Dalai, S. Nanda, J. Mohammad et al. // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2014. – Vol. 4. – P. 157-191. – DOI 10.1007/s13399-013-0097-z.
17. Pathways of lignocellulosic biomass deconstruction for biofuel and value-added products production / S.F. Ahmed, M. Mofijur, S.N. Chowdhury et al. // *Fuel*. – 2022. – Vol. 318. – ID 123618. – DOI 10.1016/j.fuel.2022.123618.
18. Карклинь, В.Б. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. VI. Определение содержания лигнина в препаратах сульфатной целлюлозы по ИК-спектрам / В.Б. Карклинь, А.П. Трейманис, В.С. Громов // *Химия древесины*. – 1975. – № 2. – С. 45-52.

19. Деркачева, О.Ю. Оценка содержания лигнина в волокнах бумаги по данным ИК спектроскопии отражения / О.Ю. Деркачева, Д.О. Цыпкин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2017. – Т. 84, № 6. – С. 993-999.
20. Estimation of the content and assessment of structural transformations of residual lignin and resin in deciduous kraft pulp by Fourier IR spectroscopy / N.I. Afanas'ev, T.F. Lichutina, M.A. Gusakova, et al. // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2006. – Vol. 79. – P. 1686-1689. – DOI 10.1134/S1070427206100260.
21. Деркачева, О.Ю. Оценка состояния лигнина в сульфатных волокнах по данным ИК спектроскопии / О.Ю. Деркачева, Д.А. Сухов, А.В. Федоров // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2017. – № 1. – С. 64-71.
22. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review / F. Xu, J. Yu, T. Tesso et al. // Applied Energy. – 2013. – Vol. 104. – P. 801-809. – DOI 10.1016/j.apenergy.2012.12.019.
23. Comparative FT-IR prospecting for cellulose in stems of some fiber plants: Flax, velvet leaf, hemp and jute / R. Vârban, I. Crişan, D. Vârban et al. // Applied Scientific Research. – 2021. – Vol. 11, No 18. – ID 8570. – DOI 10.3390/app11188570.
24. Tsuchikawa, S. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper / S. Tsuchikawa // Applied Spectroscopy Reviews. – 2007. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 43-71. – DOI 10.1080/05704920601036707.
25. Tsuchikawa, S. A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2) / S. Tsuchikawa, M. Schwanninger // Applied Spectroscopy Reviews. – 2013. – Vol. 48, Iss. 7. – P. 560-587. – DOI 10.1080/05704928.2011.621079.
26. Zhang K. Development of near-infrared spectroscopy models for quantitative determination of cellulose and hemicellulose contents of big bluestem / Zhang K., Xu Y., Johnson L. et al. // Renewable Energy. – 2017. – Vol. 109. – P. 101-109. – DOI 10.1016/j.renene.2017.03.020.
27. Huang, J. Determination of cellulose, hemicellulose and lignin content using near-infrared spectroscopy in flax fiber / J. Huang, C. Yu // Textile Research Journal. – 2019. – Vol. 89, No 23-24. – P. 4875-4883. – DOI 10.1177/0040517519843464.
28. Comparison of near infrared and mid infrared spectroscopy for the prediction of Pinus radiata bark chemical properties relevant to a biorefinery / J.H. Bridson, A. Thumm, M. Cooke-Willis et al. // Biomass and Bioenergy. – 2024. – Vol. 185. – ID 107235. – DOI 10.1016/j.biombioe.2024.107235.
29. Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy / S.G. Kostryukov, H.B. Matyakubov, Yu.Yu. Masterova et al. // Journal of Analytical Chemistry. – 2023. – Vol. 78, No 6. – P. 718-727. – DOI 10.1134/S1061934823040093.
30. On the Possibility of Quantitative Determination of Lignin and Cellulose in Plant Materials Using IR Spectroscopy / S.G. Kostryukov, N.A. Malov, Yu.Yu. Masterova et al. // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. – 2023. – Vol. 49, No 7. – P. 1628-1635. – DOI: 10.1134/S106816202307083X.
31. Носкова, О.А. Химия древесины и целлюлозы: учеб.-метод. пособие / О.А. Носкова, К.А. Синяев. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 45 с.
32. ГОСТ 11960-79 полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигнина. Постановлением комитета СССР по стандартам от 21.12.1979 г. № 4931: дата введения 1992-01-01.
33. Cang Sun, R. Characterization of hemicelluloses obtained by classical and ultrasonically assisted extractions from wheat straw / R. Cang Sun, J. Tomkinson // Carbohydrate Polymers. – 2002. – Vol. 50, Iss. 3. – P. 263-271. – DOI 10.1016/S0144-8617(02)00037-1.
34. Schwanninger, M. Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose / M. Schwanninger, J.C. Rodrigues, H. Pereira, B. Hinterstoisser // Vibrational Spectroscopy. – 2004. – Vol. 36, Iss. 1. – P. 23-40. – DOI 10.1016/j.vibspec.2004.02.003.

Поступила в редакцию 26.08.2025 г.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF LIGNIN, CELLULOSE, AND HEMICELLULOSES IN PLANT MATERIALS USING IR SPECTROSCOPY AND MATHEMATICALLY MODELED CALIBRATION CURVES

S. G. Kostryukov, A. Yu. Asfandeyev

The paper presents a methodology for quantitative determination of lignin, cellulose, and hemicellulose in plant biomass using Fourier-transform infrared spectroscopy, based on mathematical construction of calibration dependencies. The basis of the methodology consists in obtaining composite spectra through mathematical

summation of spectra of individual components taking into account their weight content. Model calibration functions reflect the dependence of absorption intensity of analytical bands on the content of corresponding components: lignin (1490–1520 cm^{-1}), cellulose (1308–1350 cm^{-1}), and hemicellulose (1710–1755 cm^{-1}). A feature of the approach is the elimination of the need for preparation of a large number of actual calibration samples, which significantly reduces the time and cost of analysis. The methodology allows to significantly reduce the time of calibration preparation compared to traditional methods, while maintaining high accuracy of analysis. The developed methodology was tested on 20 samples of plant biomass of various species, and the obtained results were compared with data from traditional methods of analysis. The results are valuable for quality control of raw materials in bioenergy and pulp-and-paper industry.

Keywords: Fourier-transform infrared spectroscopy, mathematical modeling, plant biomass, lignin, cellulose, hemicellulose, quantitative analysis, calibration functions.

Кострюков Сергей Геннадьевич

кандидат химических наук; доцент;
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва»; г. Саранск, Россия.
E-mail: kostryukov_sg@mail.ru
ORCID 0000-0002-1774-0836
Author ID: 55668

Sergey G. Kostryukov

Candidate of Chemical Sciences; Associate Professor;
National Research Ogarev Mordovia State University;
Saransk, Russia.
E-mail: kostryukov_sg@mail.ru

Асфандеев Андрей Юрьевич

аспирант по научной специальности
1.4.3. Органическая химия;
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва»; г. Саранск, Россия.
E-mail: asfandeev.a.yu@gmail.com
ORCID 0000-0003-1641-2504

Andrei Yu. Asfandeev

Postgraduate in Organic Chemistry;
National Research Ogarev Mordovia State University;
Russia, Saransk.
E-mail: asfandeev.a.yu@gmail.com

ОКСИД ЦЕРИЯ В СОСТАВЕ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ И АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2025. *А. Д. Верескун, Д. Э. Радченко, В. М. Михальчук, Р. И. Лыга,
Н. А. Мальцева, В. А. Глазунова, О. Ф. Николаева*

Синтезированы эпоксидные композиты на основе низковязкого циклоалифатического олигомера ST-3000 и аминного отвердителя Jeffamine T-403, наполненные диоксидом церия с концентрацией 1–5 масс.%. На поверхности алюминиевого сплава Д16 получены тонкие пленочные покрытия, и исследованы их защитные свойства. Пластины сплава с нанесенными композиционными покрытиями подвергали электрохимической коррозии и климатическим испытаниям. Изучено влияние CeO_2 на теплофизические свойства композитов, устойчивость к высокотемпературному окислению и термоокислительной деструкции, а также антикоррозионные свойства. Установлено, что введение диоксида церия в композиты не препятствует формированию однородной полимерной структуры, что подтверждается значениями температуры стеклования и температуры завершения перехода в высокоэластическое состояние. Композиты, содержащие неорганический наполнитель, являются более устойчивыми к термоокислительной деструкции в изотермических и не изотермических условиях. При толщине покрытия 10 мкм эпоксидно-неорганические покрытия обладают эффективностью антикоррозионной защиты, равной 98 %. Установлено, что антикоррозионные свойства полученных покрытий зависят от способа предварительной подготовки металлического субстрата. Определены составы композиционных покрытий, устойчивых к влажной воздушной среде и переменной температуре.

Ключевые слова: оксид церия; эпоксидные композиты; теплофизические свойства; термоокислительная деструкция; антикоррозионные покрытия; алюминиевый сплав.

Введение. Современные производственные отрасли предъявляют повышенные требования к долговечности и надежности конструкционных материалов. Одной из ключевых задач является обеспечение защиты металлических материалов от коррозионного разрушения, которое приводит к снижению эксплуатационных характеристик, преждевременному выходу из строя оборудования и значительным экономическим потерям.

Алюминиевые сплавы широко применяются в авиационной, транспортной, строительной и энергетической промышленности благодаря их высокой удельной прочности, низкой плотности и хорошей обрабатываемости. Эти материалы являются основой для производства элементов конструкций летательных аппаратов, где требуется сочетание малой массы и высокой надежности [1]. Одним из наиболее используемых в авиации деформируемых алюминиевых сплавов является Д16, обладающий оптимальным сочетанием прочности и пластичности, что делает его востребованным при создании нагруженных деталей фюзеляжей и крыльев [2].

Существенным недостатком алюминиевых сплавов является низкая коррозионная стойкость. Наличие в структуре интерметаллидных соединений меди и магния приводит к возникновению гальванических микропар, которые становятся центрами локальной коррозии. В условиях эксплуатации это проявляется в виде питтинговой и межкристаллитной коррозии, а при длительном воздействии агрессивной среды возможно развитие коррозионного растрескивания под напряжением [3].

Традиционные методы антикоррозионной защиты, основанные на использовании ингибиторов, покрытий и легирования, часто ограничены экологическими факторами, токсичностью компонентов или недостаточной эффективностью в агрессивных средах

[4]. Композиционные материалы рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений антикоррозионной защиты, так как позволяют совмещать высокие механические характеристики с функциональными свойствами, включая стойкость к агрессивным средам. Их многокомпонентная структура обеспечивает возможность целенаправленного регулирования параметров покрытия за счет варьирования полимерной матрицы, природы и концентрации наполнителей, а также условий формирования [5]. В отличие от традиционных лакокрасочных или металлических защитных систем, композиты обладают меньшей массой, высокой адгезией к подложке и возможностью введения активных ингибирующих компонентов.

Среди оксидных неорганических наполнителей интерес вызывают наночастицы диоксида церия. Известно, что соли и оксиды церия проявляют выраженные ингибирующие свойства в отношении коррозии стали, формируя пассивирующие слои, препятствующие доступу агрессивных ионов к металлической поверхности [6]. Для алюминиевых сплавов, включая сплав Д16, соединения церия используются как компоненты конверсионных покрытий и добавки в полимерные композиции, обеспечивающие улучшенную коррозионную стойкость и повышение электрохимических характеристик защитных систем [7, 8]. Их вводят в состав композитов в качестве эффективных армирующих агентов для улучшения термических и механических свойств противозадирных покрытий, а также для обеспечения антикоррозионной стойкости и теплового расширения без потери модуля упругости, а также используют для создания конверсионных покрытий [9, 10]. Описано применение церия в качестве ингибитора в гибридных золь-гель покрытиях для алюминиевого сплава АА2024-Т3 (аналога сплава Д16 по свойствам), где такая добавка значительно повысила барьерные характеристики и коррозионную стойкость покрытия [11].

В полимерных композитах наночастицы CeO_2 повышают электрическое сопротивление и продолжительность барьерного эффекта покрытий [12]. Ранние исследования [13, 14] показали, что введение различных форм частиц церия способствует повышению импеданса, уменьшению плотности тока коррозии и увеличению поляризационного сопротивления, что свидетельствует о повышении защитной способности покрытий. Также известно об использовании частиц церия одновременно с введением в состав покрытия других наночастиц (TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2) для регулирования параметров покрытий на основе полимерной матрицы [11].

Целью данного исследования является разработка полимерных композитов с повышенной антикоррозионной стойкостью посредством введения в полимерную матрицу неорганического наполнителя – диоксида церия, а также исследования свойств полученных композитов и покрытий на поверхности алюминиевого сплава.

Экспериментальная часть. Для формирования полимерной матрицы композитов использовали диглицидиловый эфир дициклогексилпропана ST-3000 с эпоксидным эквивалентом 240 г/экв (KUKDO Chemical Co., Ltd) и полиэфирамин Jeffamine T-403 с эквивалентной массой 81 г/экв (Huntsman Holland B.V.) в массовом соотношении 1 : 0,3476, что обеспечивало стехиометрическое соотношение атомов водорода аминогрупп и эпоксидных групп смолы. Для получения композитов в реакционную систему вводили от 1 до 5 % по массе высокодисперсного диоксида церия (CeO_2 , квалификации х.ч., ООО «ПРОФСНАБ», размер частиц от 150 нм).

Для формирования покрытий на металлическую поверхность наносили жидкую композицию. В качестве подложки использовали пластины алюминиевого сплава Д16 состава (%): Al – от 90,8 до 94,7; Cu – от 3,8 до 4,9; Mg – от 1,2 до 1,8; Mn – от 0,3 до 0,9; Fe < 0,5; Si < 0,5; Zn < 0,3; Ti < 0,1; Ni < 0,1. Перед нанесением покрытия пластины

сплава обезжиривали ацетоном и промывали водой; часть пластин дополнительно активировали в горячем щелочно-солевом растворе.

Термомеханические параметры композитов получены с использованием установки, состоящей из термокриокамеры ТК-500, программного регулятора ТРМ251 и модуля введения МВА8. На плёночные образцы воздействовали постоянной растягивающей нагрузкой при скорости нагревания $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$. Определяли температуру стеклования T_g как температуру начала перехода композитов из стеклообразного состояния в высокоэластическое при нагревании, а также температуру завершения T_e этого перехода.

Спектры комбинационного рассеяния получены в диапазоне от 150 до 2200 см^{-1} с использованием Raman laser 3D scanning confocal microscope Confotec NR500 (SOL instruments GmbH, Germany), зеленого лазера (длина волны 532 нм) и программного обеспечения Nano SP и PanoramaSetup. Время сканирования составляло 10 секунд с трехкратным накоплением спектров.

Выход (содержание) золь-фракции W_{sol} в немодифицированном полимере и эпоксидно-неорганических композитах определяли путем экстрагирования органическим растворителем из пленочных образцов в течение трех суток при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Скорость поглощения кислорода плёночными образцами при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении кислорода 0,1 МПа рассчитывали по данным газовольнометрических исследований, которым подвергали ненаполненный полимер и композиты толщиной 200 мкм и массой 0,22–0,30 г.

Термогравиметрические исследования осуществляли на дериватографе Q 1500 D системы Paulik – Paulik – Erdey (Венгрия) в среде кислорода воздуха при $25\text{--}820\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости нагревания $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$.

Электрохимические испытания композитных покрытий проводили в водном 3 %-ном растворе хлорида натрия при комнатной температуре с использованием потенциостата ПИ-50-1, программатора ПР-8 и трехэлектродной ячейки. Электролитическая ячейка содержала хлорсеребряный электрод сравнения, вспомогательный платиновый электрод и алюминиевую пластинку в качестве рабочего электрода. Поляризационные кривые получали со скоростью развертки $2\text{ мВ}\cdot\text{с}^{-1}$. Значения потенциалов коррозии E_{corr} , питтинговой коррозии E_{pitt} , плотности тока коррозии I_{corr} , антикоррозионного сопротивления R_{corr} и эффективности антикоррозионной защиты η определяли так же, как и в работе [15].

Климатические испытания и получение образцов покрытий на металлической поверхности проводились в соответствии с ГОСТ 9.401-91, адгезию покрытия оценивали методом решетчатых надрезов (ГОСТ 15140-78_1995).

Анализ результатов. Эпоксидно-неорганические композиты, содержащие частицы диоксида церия, синтезировали посредством механического перемешивания компонентов и последующего отверждения. Полученные образцы представляли собой пленки (толщина 200 мкм), находящиеся в стеклообразном состоянии при комнатной температуре (табл. 1), а также покрытия (толщина 10 мкм) на поверхности алюминиевого сплава Д16. Содержание цериевого наполнителя составляло 1–5 масс. %.

Установлено, что введение наполнителя в состав композитов в целом пластифицирует их полимерную матрицу, но во всем диапазоне концентраций оксида церия температуры стеклования композитов и температуры завершения перехода в высокоэластическое состояние практически неизменны. С увеличением степени наполнения однородность структуры образцов не снижается, что видно из значений α -релаксационного перехода ΔT . Таким образом, диоксид церия не препятствует

формированию органической полимерной матрицы композитов. Отмечено, что в присутствии наполнителя до 1,5 раз уменьшается предельная деформация L образцов по сравнению с ненаполненным полимером, но скорость деформации при этом не изменяется (рис. 1). Заметно уменьшается выход золь-фракции композитов (табл. 1), что, все-таки, вызвало вопрос о влиянии наполнителя на взаимодействие связующего с амином. Эксперимент показал, что присутствие в реакционной системе оксида церия уменьшило время гелеобразования композиции с 38 до 37 часов, но относительно малая разница во времени не позволяет сделать однозначный вывод о влиянии наполнителя на этот параметр.

Таблица 1

Параметры, описывающие топологическую структуру полимера ST-3000/T-403 и композитов ST-3000/T-403/CeO₂ при разной концентрации наполнителя. Температурные параметры получены при нагрузке на растяжение

Концентрация CeO ₂ , масс.%	T_g , °C	T_e , °C	ΔT , °C	L , мкм	W_{sol} , масс.%
0	73	80	7	22	2,9
1	57	65	8	17	2,1
2	57	65	8	17	1,3
3	60	66	6	14	1,8
4	57	65	8	15	1,3
5	60	66	6	16	1,6

Результаты термомеханического анализа при наибольшей степени наполнения (5 масс.%) композита продемонстрировали наличие структурных элементов (рис. 1, кривая 5), имеющих меньшую сегментальную подвижность, что можно отнести к межфазному слою матрица/наполнитель.

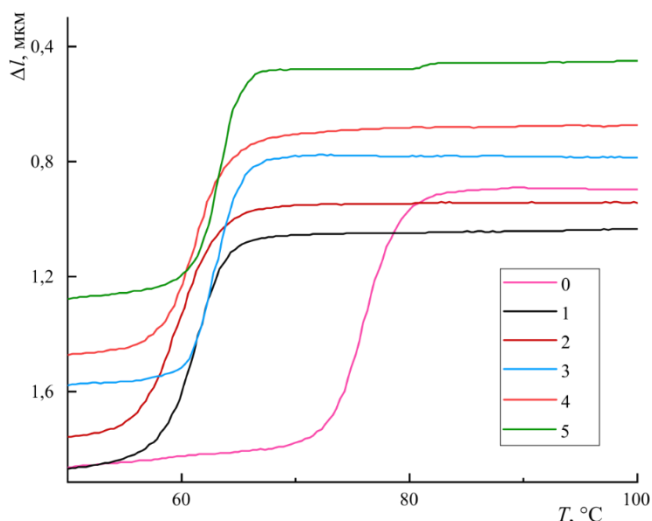


Рис. 1. ТМА-кривые полимера ST-3000/T-403 (0) и композитов ST-3000/T-403/CeO₂ (1–5) при нагрузке на растяжение. Номер кривой отвечает концентрации CeO₂: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 масс.%

Для изучения структурных особенностей эпоксидных композитов, модифицированных наночастицами диоксида церия, была применена спектроскопия комбинационного рассеяния. Получены Раман спектры как исходных компонентов, так и композитов (рис. 2 и 3). На спектрах индивидуальных веществ (рис. 2) отчетливо

Верескун А. Д., Радченко Д. Э., Михальчук В. М., Лыга Р. И.,
Мальцева Н. А., Глазунова В. А., Николаева О. Ф.

различимы характерные полосы, позволяющие провести интерпретацию спектров CeO_2 -наполнителя, аминного отвердителя Jeffamine T-403 и эпоксидной смолы ST-3000. Нанопорошок CeO_2 демонстрирует интенсивную полосу при 463 см^{-1} , соответствующую симметричной моде растяжения F_{2g} кубической фазы флюорита. Благодаря высокой интенсивности и отсутствию перекрытия с другими компонентами, данный пик может быть использован в качестве селективного маркера наличия и распределения нанонаполнителя в матрице композита.

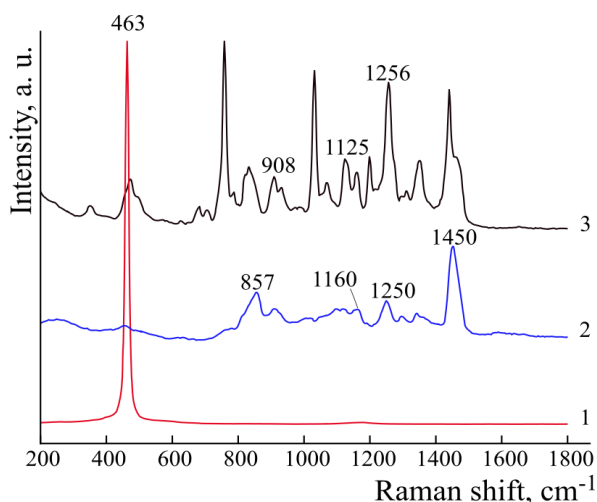


Рис. 2. Раман спектры исходных веществ: 1 – CeO_2 , 2 – Jeffamine T-403, 3 – ST-3000

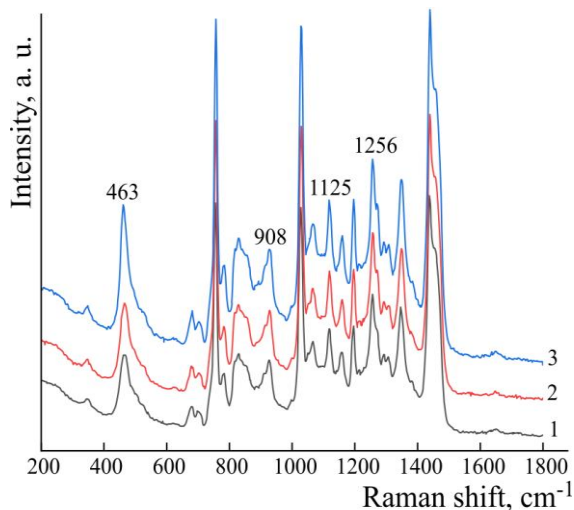


Рис. 3. Раман спектры полимера и композитов: 1 – полимер, 2 – композит с 2 масс.% CeO_2 , 3 – композит с 5 масс.% CeO_2

Раман спектр эпоксидной смолы ST-3000 характеризуется наличием полос при 908 см^{-1} и 1125 см^{-1} , связанных с колебаниями эпоксидного кольца, а также полосой при 1256 см^{-1} , интенсивность которой линейно коррелирует с концентрацией эпоксидных групп в смоле [16]. При взаимодействии с амином во времени эти полосы претерпевают изменения формы и интенсивности (рис. 4), и спектр 2 отвечает полностью отвержденному полимеру. Дополнительно наблюдаются колебания в области $830\text{--}860 \text{ см}^{-1}$, соответствующие C--O--C -фрагментам эпоксидных групп, а также полоса при $1450\text{--}1470 \text{ см}^{-1}$, обусловленная деформационными колебаниями метиленовых и метильных групп.

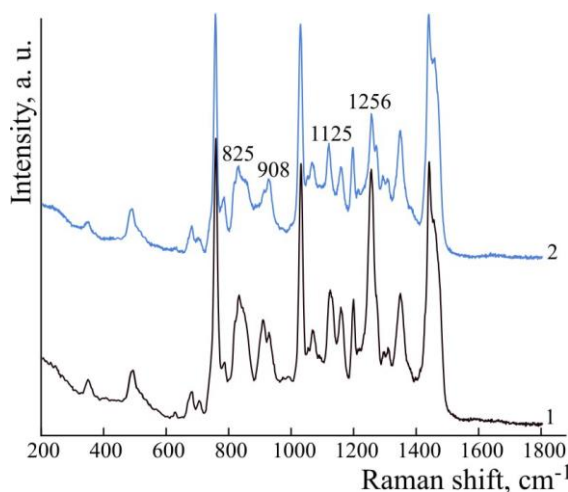


Рис. 4. Раман спектры композиции ST-3000/Jeffamine T-403: 1 – 0 суток; 2 – 14 суток

Верескун А. Д., Радченко Д. Э., Михальчук В. М., Лыга Р. И.,
Мальцева Н. А., Глазунова В. А., Николаева О. Ф.

Аминный отвердитель Jeffamine T-403 проявляет менее выраженные полосы, однако его вклад идентифицируется в диапазоне $800\text{--}1500\text{ см}^{-1}$. Полоса при 857 см^{-1} связана с колебаниями связей C–N, а пик при 908 см^{-1} соответствует колебаниям C–O. В области $1100\text{--}1120\text{ см}^{-1}$ фиксируются валентные колебания C–O–C фрагментов, характерные для этиленоксидных-пропиленоксидных групп, причём близость пиков указывает на их случайное или чередующееся распределение (рис. 2). Полоса 1160 см^{-1} отражает присутствие вторичных C–N связей, а в области около 1250 см^{-1} регистрируются валентные колебания связей C–N. Пики при 1300 см^{-1} , 1350 см^{-1} и 1450 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям метиленовых $\delta(\text{CH}_2)$ и метильных $\delta(\text{CH}_3)$ групп. Набор этих полос можно использовать для идентификации аминного отвердителя Jeffamine T-403 в смесевых составах.

Изменения, выявленные при сравнении спектров эпоксидной смолы и отверждённого композита, подтверждают развитие химических процессов в полимерной структуре. Уменьшение интенсивности полос при 908 см^{-1} , 1125 см^{-1} и 1256 см^{-1} указывает на взаимодействие эпоксидных групп с аминным отвердителем, что приводит к раскрытию эпоксидных колец. В частности, пик при 1263 см^{-1} , связанный с растяжением эпоксидного кольца, является подходящим объектом для отслеживания степени отверждения, поскольку его интенсивность линейно зависит от концентрации эпоксидных групп [16].

Сравнительный анализ спектров композитов с различным содержанием CeO_2 показал, что с увеличением концентрации нанонаполнителя интенсивность полосы при 463 см^{-1} значительно возрастает (см. рис. 3). При отсутствии наполнителя в этой области наблюдается полоса 465 см^{-1} , связанная с колебаниями эпоксидной матрицы, однако её интенсивность ниже по сравнению с характерным пиком диоксида церия. При концентрациях диоксида церия 2 и тем более 5 масс.% он становится доминирующим, что позволяет использовать его для качественного и количественного анализа нанонаполнителя в композите.

Таким образом, спектроскопия комбинационного рассеяния позволила не только подтвердить наличие оксидного нанонаполнителя в структуре композита, но и проследить отверждение полимерной матрицы. Наличие и увеличение интенсивности полосы при 463 см^{-1} является ключевым индикатором наполнения композита и может быть использовано для определения содержания неорганического наполнителя.

Диоксид церия оказывает влияние на термоокислительную деструкцию композитов в неизотермических условиях (рис. 5, а): скорость основной стадии деструкции снизилась (рис. 5, б), и повысились температуры 5 %-ной и 10 %-ной потери массы композитов на 16 и 37°C соответственно. Температура максимальной скорости деструкции композитов увеличилась только на 9°C .

После полного выгорания эпоксидно-аминной полимерной матрицы композитов остаток образца представляют собой хлопья белого цвета – диоксид церия. Плотность остатков возрастает с увеличением концентрации наполнителя в исходном композите (рис. 6). Масса хлопьев-остатков соответствует исходному содержанию оксида церия в образцах.

Результаты газовольюмометрических исследований ненаполненного полимера и композитов показали, что введение диоксида церия до 4 масс.% практически не влияет на скорость высокотемпературного окисления субстрата кислородом (рис. 7). Только при наибольшей степени наполнения скорость окислительного процесса заметно возрастает, что может быть связано со структурными особенностями такого композита, выявленными с помощью термомеханического анализа.

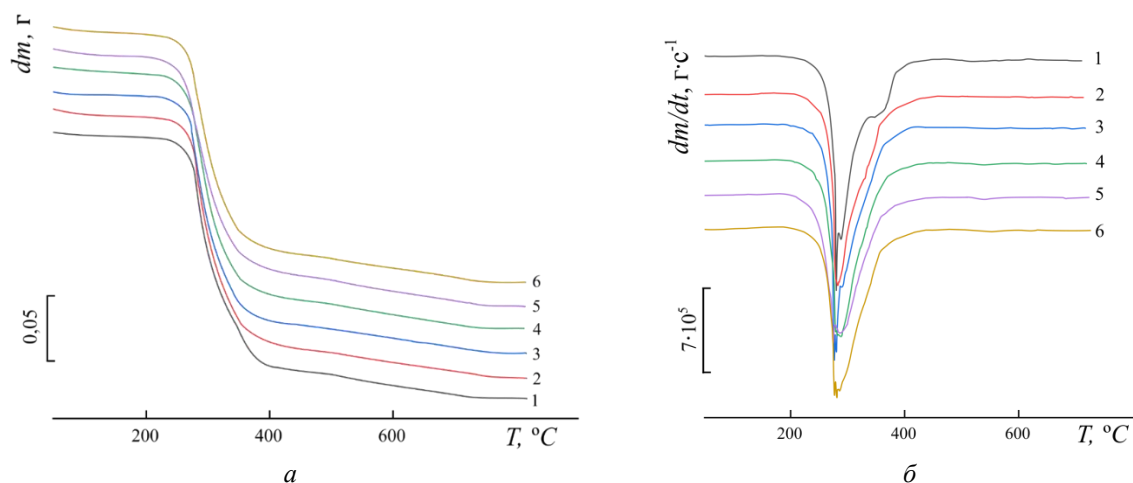


Рис. 5. Дериватографические кривые потери массы (а) и скорости потери массы (б) полимера и композитов. Номер кривой отвечает $w(\text{CeO}_2)$: 1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4; 6 – 5 масс.%

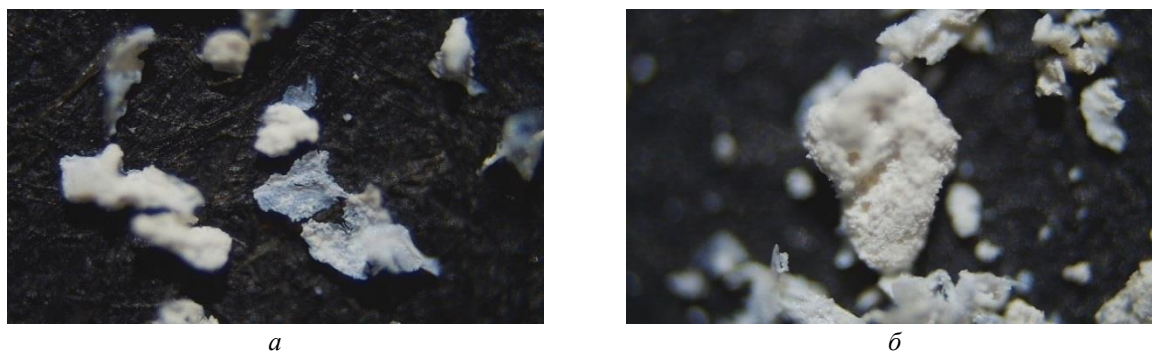


Рис. 6. Фотографии остатков образцов композитов после выгорания органической составляющей. Концентрация CeO_2 : а – 2, б – 3 масс.%

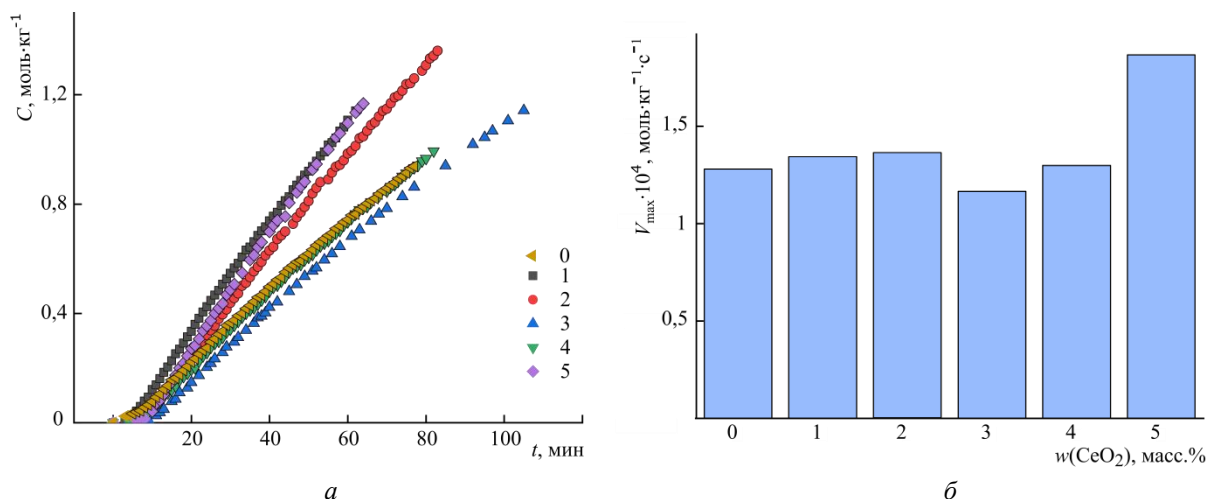


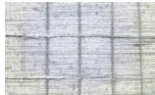
Рис. 7. Кинетические кривые окисления образцов полимера и композитов кислородом (а) при 180 °С и зависимость скорости окисления композитов от концентрации оксида церия (б)

Композиционное покрытие, содержащее 3 масс.% наполнителя, хорошо проявило себя на неактивированной поверхности алюминиевого сплава при проведении климатических испытаний в условиях влажности и переменной температуры (табл. 2). На активированной поверхности сплава Д16 наилучший результат отмечен при содержании 2 масс.% оксида церия: через два месяца испытаний зафиксирован один небольшой очаг коррозии.

Верескун А. Д., Радченко Д. Э., Михальчук В. М., Лыга Р. И.,
Мальцева Н. А., Глазунова В. А., Николаева О. Ф.

Таблица 2

Результаты климатических испытаний покрытий на поверхности алюминиевого сплава Д16

Период испытаний	Полимер (неактив.)	Полимер (актив.)	3 масс.% CeO_2 (неактив.)	2 масс.% CeO_2 (актив.)
Начало испытаний				
3 суток				
30 суток				
60 суток				

Оценка адгезии методом решетчатых надрезов определила следующие значения: 2 балла для ненаполненного полимера на неактивированной поверхности и 3 балла – на активированной. На необработанных пластинах введение и увеличение содержания CeO_2 улучшило адгезию покрытий (адгезия оценена в 2 и 1 балл), тогда как на активированной поверхности наблюдалось её снижение до 3 баллов.

Электрохимические испытания покрытий на алюминиевом сплаве продемонстрировали интересные результаты (рис. 8). На химически активированной поверхности сплава композиционные покрытия с разными концентрациями оксида церия имеют эффективность антикоррозионной защиты более 92 %. Плотность тока коррозии подложки в присутствии покрытий снижается на 2 порядка (табл. 3). При этом на необработанной поверхности сплава покрытия проявили себя лучше, демонстрируя более высокое антикоррозионное сопротивление за исключением состава с наибольшей концентрацией неорганического наполнителя.

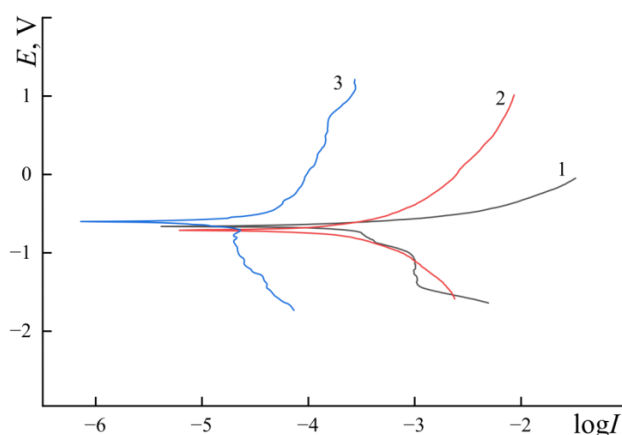


Рис. 8. Потенциодинамические кривые алюминиевого сплава Д16 без покрытия (1) и с композитными покрытиями (2, 3). Содержание CeO_2 : 2 – 0; 3 – 2 масс.%. Активированная поверхность сплава

Таблица 3

Электрохимические характеристики композиционных покрытий ST-3000/T-403/CeO₂ при различных концентрациях наполнителя (активированная и *неактивированная поверхность сплава)

Концентрация CeO ₂ , масс. %	E_{corr} , мВ	E_{pit} , мВ	R_{corr} , кОм·см ²	I_{corr} , А·см ⁻²	η , %
сплав Д16	-660	-650	0,25	$1,00 \cdot 10^{-4}$	—
1	-685	-103	4,50	$5,55 \cdot 10^{-6}$	94,4
	-640*	-422*	5,57*	$4,49 \cdot 10^{-6*}$	95,5*
2	-600	-515	3,28	$7,62 \cdot 10^{-6}$	92,4
4	-664	-657	0,75	$3,30 \cdot 10^{-5}$	67
	-643*	-135*	22,66*	$1,10 \cdot 10^{-6*}$	98,9*
5	-785	-160	11,45	$2,18 \cdot 10^{-6}$	97,8
	-665*	-623*	1,23*	$2,03 \cdot 10^{-5*}$	79,7*

Выводы. Проведенные исследования подтвердили литературные данные о перспективности применения соединений церия в составе композиционных материалов на основе полимерных матриц. В данной работе получены эпоксидно-цериевые композиты путем практически одновременного смешения компонентов без применения специальных диспергационных методов.

Уникальна серия полученных композитов тем, что в диапазоне концентраций оксида церия от 1 до 5 масс.% все образцы имели одинаковые температуры начала и завершения перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое. При этом увеличение содержания наполнителя в 5 раз не привело к заметному снижению однородности структуры композитов.

Влияние концентрации диоксида церия на другие свойства композитов является более существенным. Введение CeO₂ в состав композитов снижает скорость самой быстрой стадии термоокислительной деструкции и повышает температурные параметры – критерии устойчивости образцов к неизотермическим условиям. Только максимально наполненный образец проявил меньшую устойчивость к высокотемпературному окислению кислородом.

При климатических испытаниях в течение двух месяцев более устойчивыми к коррозионным процессам и к отслаиваниям оказались эпоксидно-цериевые покрытия также со средними концентрациями наполнителя. Это обусловлено более высокой адгезией таких покрытий к поверхности алюминиевого сплава. Данные результаты коррелируют с определенными электрохимическими параметрами: на два порядка увеличилось антикоррозионное сопротивление покрытой подложки. Таким образом, замедление коррозионных процессов на поверхности алюминиевого сплава в присутствии цериевого наполнителя в композиционных покрытиях обусловлено адгезионными силами взаимодействия между покрытием и субстратом, а также барьерным эффектом, препятствующим проникновению коррозионных агентов к металлической поверхности.

Исследования проводились в соответствии с государственным заданием «Моделирование и экспериментальные исследования антикоррозионной активности низкомолекулярных соединений, иммобилизованных в полимерных покрытиях» (номер госрегистрации 124012400357-1). Результаты спектроскопических исследований обсуждены также в рамках научно-исследовательской работы «Формирование структуры и свойств перспективных многофункциональных материалов» (FREZ-2023-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry / S.-S. Li [et al.] // J. Mater. Res. Technol. – 2023. – Vol. 27. – P. 944-983. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274
2. Peltier, F. Review of Cr-free coatings for the corrosion protection of aluminum aerospace alloys / F. Peltier, D. Thierry // Coatings. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 518. – DOI: 10.3390/coatings12040518
3. Microstructure and its effect on the intergranular corrosion properties of 2024-T3 aluminum alloy / C. Liao [et al.] // Corros. Sci. – 2023. – Vol. 215. – P. 111024. – DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111024
4. Cerium methacrylate assisted preparation of highly thermally conductive and anticorrosive multifunctional coatings for heat conduction metals protection / F. Xu [et al.] // Nano-Micro Lett. – 2023. – Vol. 15. – P. 201. – DOI: 10.1007/s40820-023-01163-w
5. Cerium tartrate as a pigment in epoxy coatings for corrosion protection of AA2024-T3 / T. Hu [et al.] // Prog. Org. Coat. – 2017. – Vol. 105. – P. 123-131. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.01.002
6. Ghasem, M. Enhancement the anticorrosive resistance of epoxy coatings by incorporation of CeO₂@polyaniline@2-mercaptobenzotiazole nanocomposite / M. Ghasem, K. Aboutalebi // Synth. Met. – 2019. – Vol. 250. – P. 63-72. – DOI: 10.1016/j.synthmet.2019.03.001
7. In-situ growth of cerium nanoparticles for chrome-free, corrosion resistant anodic coatings / L. Selegard [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2021. – Vol. 410. – P. 126958. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126958
8. Selection of appropriate electrochemical deposition regime for cerium conversion coating on anodized AA2024-T3 aircraft alloy / C. Girginov [et al.] // J. Appl. Electrochem. – 2024. – Vol. 54. – P. 1171-1202. – DOI: 10.1007/s10800-023-02012-9
9. Investigation on the composition and corrosion resistance of cerium-based conversion treatment by alkaline methods on aluminum alloy 6063 / C. Lu [et al.] // RSC Adv. – 2020. – Vol. 10, No. 60. – P. 36654-36666. – DOI: doi.org/10.1039/D0RA07201J
10. Polymer/Inorganic nanocomposite coatings with superior corrosion protection performance: A review / S. Pourhashem [et al.] // J. Ind. Eng. Chem. – 2020. – Vol. 88. – P. 29-57. – DOI: 10.1016/j.jiec.2020.04.029
11. Surface pretreatments of AA5083 aluminum alloy with enhanced corrosion protection for cerium-based conversion coatings application: combined experimental and computational analysis / M. R. Shishesaz [et al.] // Molecules. – 2021. – Vol. 26, No. 24. – P. 7413. – DOI: 10.3390/molecules26247413
12. Construction of a high-performance anti-corrosion epoxy coating in the presence of poly(aniline-co-pyrrole) nanospheres / M. Mirzaee [et al.] // React. Funct. Polym. – 2024. – Vol. 194. – P. 105794. – DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105794
13. Synthesized PANI/CeO₂ nanocomposite films for enhanced anti-corrosion performance / A. M. Alsaad [et al.] // Nanomaterials (Basel). – 2024. – Vol. 14, No. 6. – P. 526. – DOI: 10.3390/nano14060526
14. The effect of ceria and zirconia nanoparticles on the corrosion behaviour of cathaphoretic epoxy coatings on AA6060 alloy / L. S. Živković [et al.] // Prog. Org. Coat. – 2019. – Vol. 136. – P. 105219. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105219
15. Эпоксидно-кремнеземные композиты и покрытия, содержащие ингибитор коррозии металлов – бензотриазол / И. Е. Чабак [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 4. – С. 61-72. – DOI: 10.5281/zenodo.14227501
16. Völker-Pop, L. Combined rheology and spectroscopy methods to characterize the cure behavior of epoxy resins / L. Völker-Pop, J. A. R. Agudo, C. Giehl // AIP Conf. Proc. – 2023. – P. 2997. – DOI: 10.1063/5.0159798

Поступила в редакцию 05.09.2025 г.

CERIUM OXIDE IN EPOXY COMPOSITES AND ANTI-CORROSION COATINGS

**A. D. Vereskun, D. E. Radchenko, V. M. Mikhal'chuk, R. I. Lyga, N. A. Maltseva,
V. A. Glazunova, O. F. Nikolaeva**

Epoxy composites based on low-viscosity cycloaliphatic oligomer ST-3000 and amine hardener Jeffamine T-403 filled with cerium dioxide with a concentration of 1–5 wt.% were synthesized. Thin film coatings were obtained on the surface of aluminum alloy D16, and their protective properties were studied. Alloy plates with applied composite coatings were subjected to electrochemical corrosion and climatic tests. The effect of CeO₂ on the thermophysical properties of composites, resistance to high-temperature oxidation and thermooxidative destruction, as well as anticorrosive properties were studied. It was found that the introduction of cerium dioxide into composites does not prevent the formation of a homogeneous polymer structure, which is confirmed by the values of the glass transition temperature and the temperature of completion of the transition to

Верескун А. Д., Радченко Д. Э., Михальчук В. М., Лыга Р. И.,
Мальцева Н. А., Глазунова В. А., Николаева О. Ф.

the highly elastic state. Composites containing the inorganic filler are more resistant to thermo-oxidative destruction under isothermal and non-isothermal conditions. With a coating thickness of 10 μm , epoxy-inorganic coatings have an anti-corrosion protection efficiency of 98 %. It was established that the anti-corrosion properties of the obtained coatings depend on the method of preliminary preparation of the metal substrate. The compositions of composite coatings resistant to a humid air environment and variable temperature was determined.

Keywords: cerium oxide; epoxy composites; thermophysical properties; thermal-oxidative degradation; anti-corrosion coatings; aluminum alloy.

Верескун Анастасия Дмитриевна

аспирант кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: nastyave22@gmail.com

Vereskun Anastasiya Dmitrievna

Graduate Student at the Department of Physical
Chemistry, FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: nastyave22@gmail.com

Радченко Денис Эдуардович

лаборант кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: denis.rakich2003@mail.ru

Radchenko Denis Eduardovich

Laboratory Assistant at the Department of Physical
Chemistry, FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: denis.rakich2003@mail.ru

Михальчук Владимир Михайлович

доктор химических наук, профессор,
профессор кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: v.m.mikhalchuk@mail.ru
ORCID: 0009-0007-0897-9136
AuthorID: 192329

Mikhal'chuk Vladimir Mihaylovich

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Physical Chemistry
FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: v.m.mikhalchuk@mail.ru

Лыга Рита Ивановна

кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: lygarita@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5012-5424
AuthorID: 958761

Lyga Rita Ivanovna

Candidate of Chemical Sciences, Docent, Assistant
Professor at the Department of Physical Chemistry,
FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: lygarita@mail.ru

Мальцева Наталья Александровна

младший научный сотрудник кафедры физической
химии ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: malt.natalia@gmail.com
ORCID: 0009-0008-5916-4727
AuthorID: 1232113

Maltseva Natalia Alexandrovna

Junior Research Fellow at the Department of Physical
Chemistry, FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: malt.natalia@gmail.com

Глазунова Валентина Александровна

научный сотрудник отдела физики высоких
давлений и перспективных технологий
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт
им. А. А. Галкина», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: glasunova-2007@rambler.ru

Glazunova Valentina Alexandrovna

Researcher of High Pressure and Advanced
Technology Department, FSBSI “Galkin Donetsk
Institute for Physics and Engineering”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: glasunova-2007@rambler.ru

Николаева Ольга Федоровна

младший научный сотрудник кафедры физической
химии ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: nikolaevso_1975@mail.ru

Nikolaeva Olga Fedorovna

Junior Research Fellow at the Department of Physical
Chemistry, FSBEI HE “Donetsk State University”,
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: nikolaevso_1975@mail.ru

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 577.3.35

DOI: 10.5281/zenodo.17199887

EDN: BCKGTD

ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КЛЕТОК МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

© 2025. Е. А. Аникина, С. В. Чуфицкий, С. М. Романчук, Р. И. Горбунов, Е. С. Сергеева

Представлены результаты исследования состояния поверхностных вод реки Крынка, включая Ханженковское, Ольховское и Зуевское водохранилища, за осенний период 2024 года. Анализ токсичности проб воды проводили методом биотестирования на лабораторной тест-культуре клеток *Chlorella sorokiniana*. Для более детальной оценки изменения состояния культуры микроводорослей использовали методы флуориметрического определения фотосинтетической активности клеток по индукционным кривым флуоресценции хлорофилла. Согласно полученным результатам исследования выявлено стимулирующее действие проб воды из Зуевского и Ольховского водохранилищ на тест-культуру, что отражалось в увеличении содержания хлорофилла в тест-культуре и возрастании фотосинтетической активности клеток путем повышения эффективности переноса электронов между фотосистемами.

Ключевые слова: биотестирование, флуоресценция, хлорофилл, *Chlorella sorokiniana*, река Крынка.

Введение. На территории Донецкой Народной Республики находится большое скопление предприятий тяжелой и угледобывающей промышленности, деятельность которых приводит к значительному ухудшению экологического состояния региона. Шахтные и промышленные сточные воды являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды, а в особенности – поверхностных и природных вод. Длительное время на территории региона существует проблема недостатка водных ресурсов, что ведет к интенсивному использованию доступных запасов, вызывая обмеление водохранилищ и ухудшение качества поверхностных вод. На данный момент потребности населения региона в пресной и питьевой воде не могут быть удовлетворены в полном объеме. Высокий уровень антропогенной нагрузки и загрязнение поверхностных вод в значительной мере усугубляет проблему водообеспечения.

Основными водотоками в Донецкой Народной Республике являются реки: Кальмиус, Миус, Крынка, Грузской Еланчик, верховья рек Лугань, Сухой и Мокрый Еланчик, Осикова, Лозовая, Водяная [1]. В бассейны рек Кальмиус и Крынка входит ряд водохранилищ, обеспечивающих близлежащие населенные пункты питьевой водой. Река Крынка является правым притоком р. Миус, образуется слиянием рек Садки и Булавин юго-западнее г. Енакиево [2]. В бассейне р. Крынка находится 123 малых водоема и 5 водохранилищ технического и питьевого назначения: Ханженковское и Зуевское – непосредственно в русле реки Крынка, Ольховское – на р. Ольховой, Волынцевское – р. Булавин и водохранилище около с. Благодатное. Основными источниками загрязнения водотоков бассейна р. Крынка являются промышленные, бытовые, сточные, а также шахтные воды [3].

Сложившаяся экологическая ситуация требует как постоянного мониторинга состояния водных объектов региона, так и поиска доступных, нетрудоемких и

экспрессных методов, позволяющих выявлять степень загрязнения поверхностных вод. Мониторинг включает в себя физико-химические и биологические (биоиндикация и биотестирование) методы исследования. Однако, оценить состояние водного объекта только по одним физико-химическим показателям недостаточно, поскольку не учитывается состояние гидробионтов [4]. Для того, чтобы понять каким образом живой организм реагирует на те или иные изменения в среде, применяют методы биотестирования. Под биотестированием понимают процесс установления токсического действия на тест-объекты различных уровней организации, среди которых наиболее распространенными являются одноклеточные водоросли (*Chlorella sorokiniana*, *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin, *Scenedesmus quadricauda*) [5,6]. Фотосинтетическая активность, количественный и пигментный состав клеток фитопланктона чувствительны к воздействию различных антропогенных и экологических факторов. Методы регистрации флуоресценции отличаются своей простотой и информативностью, а также позволяют получать информацию о физиологическом состоянии культур микроводорослей [7]. В частности, для оценки функционального состояния фотосинтетического аппарата используют метод регистрации кривых индукции флуоресценции. Кривая индукции, как правило, состоит из трех последовательных пиков – J, I и P, каждый из которых отражает изменение состояния электрон-транспортной цепи фотосистемы II. [8]. Флуоресцентный метод оценки концентрации хлорофилла нашел широкое применение в экологии и гидробиологии как при работе с водорослями, так и с экстрагированными из них растворами пигментов [9].

Целью исследования являлась оценка состояния поверхностных вод реки Крынка с применением методов флуориметрического анализа и биотестирования.

Материалы и методы. Исследования проводились на участке русла реки Крынка, включающем Ханженковское, Ольховское и Зуевское водохранилища, а также с учетом притоков – рек Ольховка и Ольховая. Чтобы учесть особенности изменения гидрорежима реки и водохранилищ, а также все предполагаемые источники загрязнения реки, было выбрано 10 мониторинговых точек (рис. 1).

Мониторинговая точка 1 расположена в русле р. Крынка до впадения в Ханженковское водохранилище. Непосредственно из Ханженковского водохранилища пробы отбирали в верховье и низовье (мониторинговые точки 2 и 4, соответственно). Мониторинговая точка 3 располагалась в русле р. Ольховка, которая является северным притоком Ольховского водохранилища и подвержена частому сбросу шахтных вод. Точке 5 соответствует русло р. Ольховая, точка 6 – низовье Ольховского водохранилища. После Зуевского водохранилища, на территории н.п. Зуевка река Ольховая впадает в реку Крынка (точка 7). Пробу воды из Зуевского водохранилища отбирали в верховье, около н.п. Водобуд (точка 8) и в низовье, в черте города Зугрэс, около дамбы (точка 9). Пробу из русла р. Крынка, после каскада водохранилищ, отбирали в мониторинговой точке 10, на территории поселка Шахтное.

При исследовании проб воды за основу были взяты рекомендации Росгидромета по биотестированию [9] на лабораторной культуре клеток *Chlorella sorokiniana*. С целью удаления клеток природного фитопланктона и зоопланктона, пробы фильтровали через ацетилцеллюлозные мембранные фильтры с диаметром пор 0,6 мкм. Биотестирование выполняли для каждой мониторинговой точки не менее, чем в трех повторностях. Содержание хлорофилла а и кривые индукции флуоресценции клеток *Ch. sorokiniana* регистрировали с помощью флуориметра ФС-2, разработанного на базе Донецкого государственного университета.

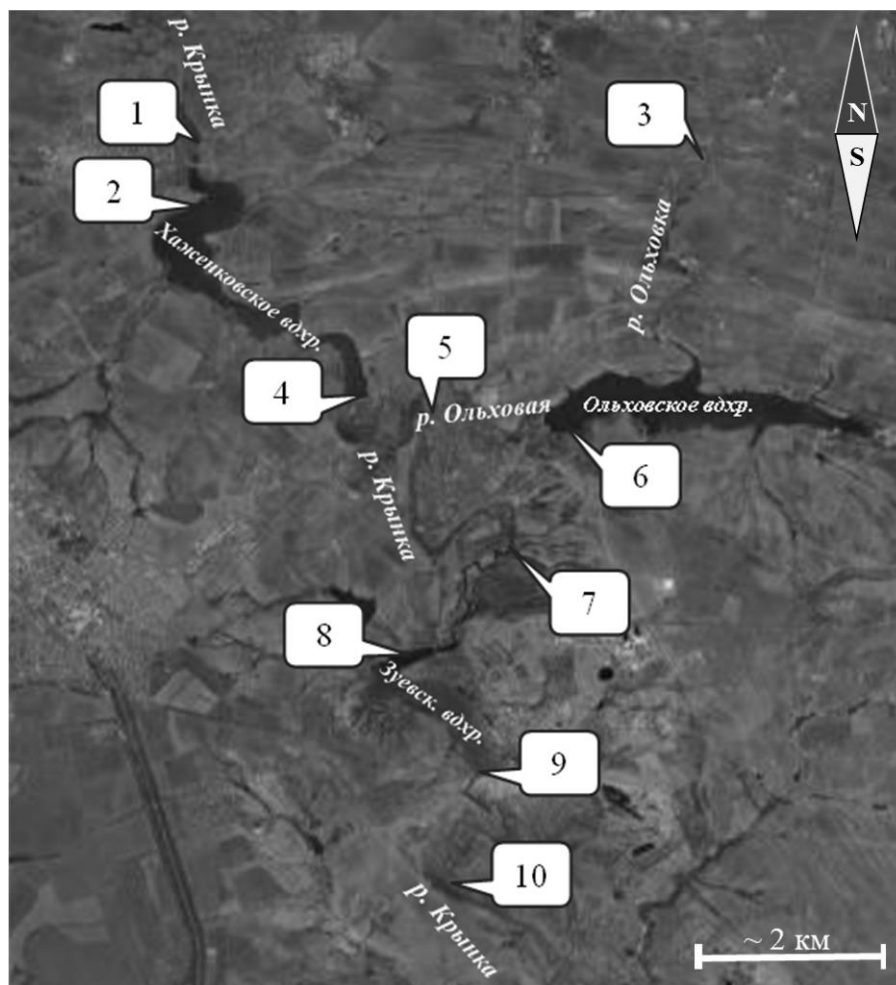


Рис. 1. Расположение мониторинговых точек реки Крынка

Анализ индукционных кривых флуоресценции выполняли при помощи программы ruPhotoSyn [10], определяя следующие параметры:

F_0 – минимальный уровень флуоресценции, соответствующий состоянию, когда все реакционные центры (РЦ) фотосистемы II (ФС II) открыты;

F_m – максимальный уровень флуоресценции, соответствующий состоянию, когда все реакционные центры (РЦ) фотосистемы II (ФС II) закрыты;

$\Phi_0 = \frac{F_m - F_0}{F_m}$ – квантовый выход флуоресценции, показатель эффективности протекания первичной фотохимической реакции в ФС II;

F_t – флуоресценция, излучаемая в момент времени t ;

F_J – флуоресценция, измеренная на 2 мс во время фазы J;

F_I – флуоресценция, измеренная на 30 мс, после начала освещения – во время фазы I;

$V_t = \frac{F_t - F_0}{F_m - F_0}$ – относительная величина переменной флуоресценции в момент времени t ;

$V_J = \frac{F_J - F_0}{F_m - F_0}$ – относительная величина переменной флуоресценции в фазе J после 2 мс освещения (отражает количество закрытых РЦ по отношению к общему числу РЦ, которые могут быть закрыты);

$V_I = \frac{F_I - F_0}{F_m - F_0}$ – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы I (30 мс), связанную с промежуточным стационарным уровнем восстановления пула пластохинонов (отражает способность ФС I и ее акцепторов окислять PQH₂);

PI – показатель функциональной активности ФС II, ФС I и цепи переноса электронов между ними.

$\frac{RE_0}{ET_0}$ – эффективность, с которой поглощенный электрон ФС II передается от PQH₂ к акцепторам ФС I;

$\frac{RE_0}{TR_0}$ – эффективность, с которой поглощенный электрон ФС II передается акцепторам ФС I;

$\frac{DI_0}{ABS}$ – квантовый выход энергии диссипации в ФС II;

$\frac{RC}{ET_0}$ – поток электронов, переносимых через один активный реакционный центр;

$\frac{RC}{RE_0}$ – поток электронов, переносимых через один активный реакционный центр и редуцирующих крайние акцепторы на акцепторной стороне ФС I [8, 11].

Токсичность устанавливали в зависимости от времени проявления токсического эффекта. Острое токсическое действие (ОТД) устанавливали после 24 часов, хроническое токсическое действие (ХТД) – после 96 часов. Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием W-критерия Вилкоксона [12]

Результаты исследования. Согласно результатам биотестирования по методике [3] острого и хронического токсического действия фильтрата проб на тест-культуру не было выявлено. В таблице 1 представлены коэффициенты прироста тест-культуры клеток *Chlorella sorokiniana* после 24 и 96 часов экспозиции в фильтрате из исследуемых мониторинговых точек.

Таблица 1

Результаты биотестирования токсичности проб воды из бассейна р. Крынка

Исследуемые пробы	Количество клеток, отклонение от контроля, %	Концентрация хлорофилла а, отклонение от контроля, %	Токсическое действие
Острое токсическое действие (24 ч.)			
Точка 1	25,71	12,50	Нет ОТД
Точка 2	42,86	-13,48	Нет ОТД
Точка 3	40,91	-22,70	Нет ОТД
Точка 4	31,43	-21,64	Нет ОТД
Точка 5	28,57	-20,57	Нет ОТД
Точка 6	-17,14	28,01	Нет ОТД
Точка 7	11,43	-9,58	Нет ОТД
Точка 8	31,43	31,91	Нет ОТД
Точка 9	45,71	30,85	Нет ОТД
Точка 10	45,71	-13,12	Нет ОТД
Хроническое токсическое действие (96 ч.)			
Точка 1	120,12	25,29	Нет ХТД
Точка 2	114,29	-1,16	Нет ХТД
Точка 3	-40,00	-10,89	Нет ХТД
Точка 4	-30,00	-4,67	Нет ХТД
Точка 5	-24,29	-6,23	Нет ХТД
Точка 6	1,43	15,57	Нет ХТД
Точка 7	-27,14	-5,83	Нет ХТД
Точка 8	-30,00	41,25	Нет ХТД
Точка 9	-30,00	6,62	Нет ХТД
Точка 10	-14,29	21,79	Нет ХТД

В отличие от методики [3] для тест-культуры микроводорослей проводили флуориметрический анализ фотосинтетической активности. Полученные параметры кривых индукции флуоресценции соотносятся с результатами биотестирования. На рисунке 2 приведены результаты кривых индукции флуоресценции клеток *Chlorella sorokiniana* после 24 часов экспозиции. Наблюдалось стимулирующее воздействие на клетки фильтрата из Зуевского и Ольховского водохранилищ (точки 6, 8 и 9). Для данных проб было отмечено увеличение содержания хлорофилла относительно контроля, а также возрастание вероятности переноса электронов между фотосистемами II и I ($\frac{RE_0}{TR_0}$ и $\frac{ET_0}{TR_0}$). Эффекты для точек 7 и 10 не установлены, т.к. не было получено достоверных отличий от контрольной группы.

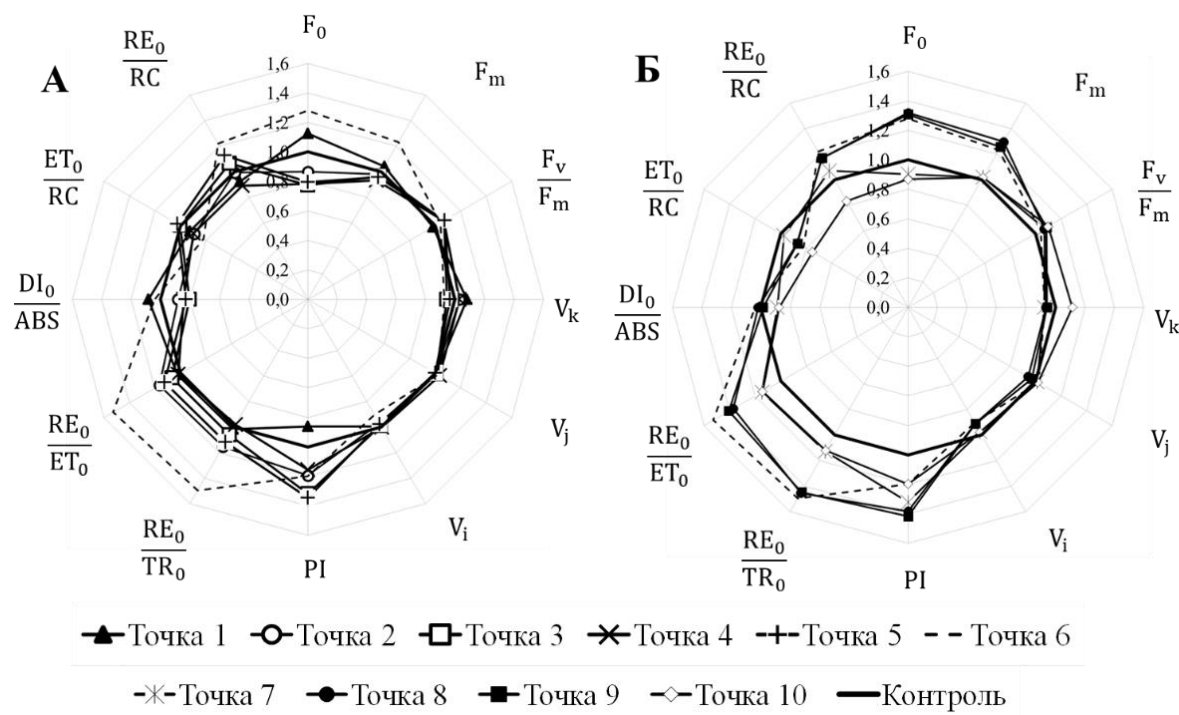


Рис. 2. Параметры ОЖР-теста культуры *Chlorella sorokiniana* после 24 часов экспозиции:
А – Мониторинговые точки 1–6; Б – Мониторинговые точки 6–10

На рисунке 3 приведены результаты кривых индукции флуоресценции после 96 часов экспозиции. Наблюдалось стимулирующее действие фильтрата из Зуевского и Ольховского водохранилищ (точки 6, 8 и 9), увеличение содержания фотопигментов и вероятности переноса электронов между фотосистемами. Для точки 10 было выявлено повышение индекса фотосинтетической активности и установлены достоверные отличия от контрольной группы.

Согласно мониторинговым исследованиям [13], выполненным за тот же отчетный период, было выявлено повышенное содержание сульфатов, хлоридов и фенолов, которые поступают в реку, в связи сбросом в нее шахтных сточных вод. Изменение физико-химического состава поверхностных вод, а также изменение видового состава природного фитопланктона реки Крынка свидетельствуют о повышении общего уровня сапробности [13]. Таким образом, результаты, приведенные в работе [13], объясняют стимулирующее действие фильтрата из Ольховского и Зуевского водохранилищ на тест-культуру клеток зеленых микроводорослей.

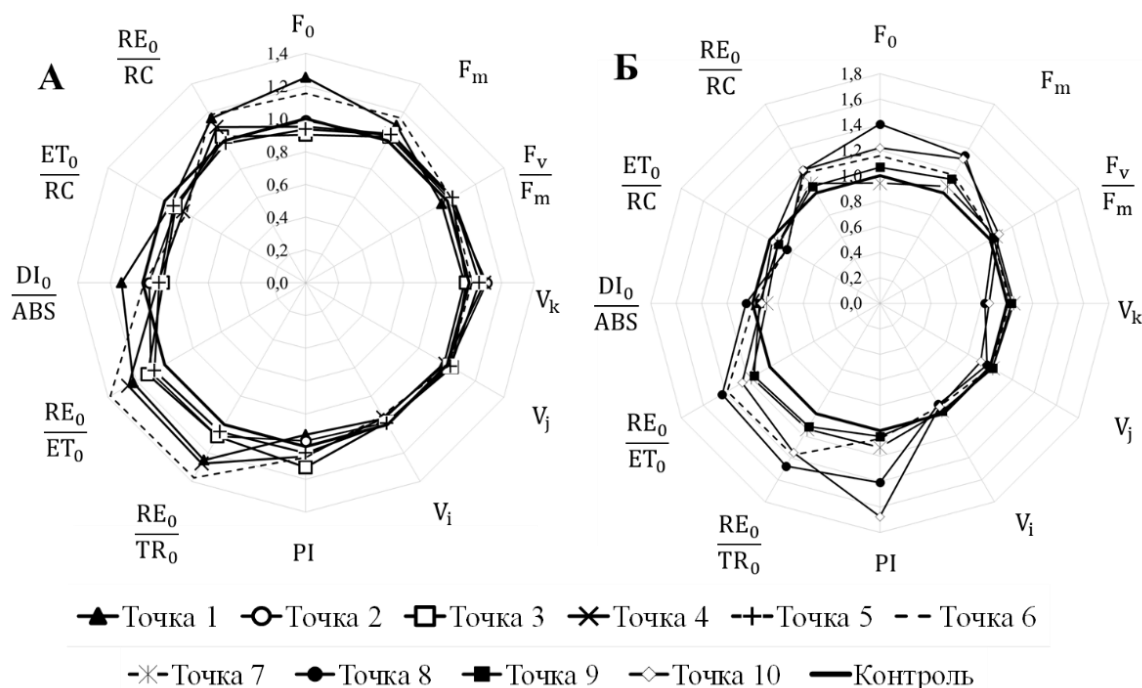


Рис. 3. Параметры ОЖР-теста культуры *Chlorella sorokiniana* после 96 часов экспозиции:
А – Мониторинговые точки 1–6; Б – Мониторинговые точки 6–10

Заключение. В ходе биотестирования не было установлено токсического и хронического действия исследуемых проб воды на культуру микроводорослей *Chlorella sorokiniana*. Выявлено стимулирующее действие на культуру клеток из проб воды Ольховского и Зуевского водохранилищ, выражающееся в увеличении содержания хлорофилла. Стимулирующее воздействие также проявлялось в возрастании фотосинтетической активности микроводорослей путем повышения эффективности переноса электронов между фотосистемами II и I. Полученные результаты флуориметрических исследований согласуются с результатами биотестирования, дают возможность получить более полное представление о состоянии тест-объекта, отражая изменения в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата и эффективности его функционирования.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Разработка интеллектуальных систем анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов» (регистрационный номер 124012400344-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даниленко, Е. П. Проблемы водопользования и хозяйственной деятельности на землях Донецкой Народной Республики / Е. П. Даниленко, А. А. Попова // Вектор ГеоНаук. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 70-74. – EDN YBDPVB.
2. Зражевская, Ю. П. Исследование качества воды некоторых поверхностных водоемов Донбасса / Ю. П. Зражевская, Е. А. Трошина, Н. Н. Белоус // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник материалов XV Международной конференции аспирантов и обучающихся : посвящается 100-летию Донецкого национального технического университета 95-летию Заповедника «Хомутовская степь», Донецк, 13–15 апреля 2021 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. – С. 200-202. – EDN IZPGZO.
3. Гнатюк, Н. Ю. К изучению флоры бассейна реки Крынки (бассейн реки Миус) / Н. Ю. Гнатюк // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2010. – № 1(10). – С. 47-56. – EDN WPXDGG.

4. Бакаева, Е. Н. Биологические подходы к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем / Е. Н. Бакаева, А. М. Никаноров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 1(185). – С. 72-83. – EDN TPOXNP.
5. Скоростинская, А. А. Определение токсичности воды г. Кургана с помощью водорослей хлорелла / А. А. Скоростинская // Молодой ученый. – 2019. – № 5(243). – С. 100-101. – EDN YWNVBJ.
6. Об интегральной диагностике качества морской воды с использованием фито- и зоопланктона / Н. И. Рабазанов, А. Ф. Сокольский, С. С. Евсеева, Р. Н. Рабазанов // Аридные экосистемы. – 2019. – Т. 25, № 3(80). – С. 79-84. – EDN JFSFDK.
7. Маторин, Д. Н. Флуоресценция хлорофилла для оценки состояния водорослей / Д. Н. Маторин, Л. Б. Братковская, А. А. Алексеев // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 686-689. – EDN YLBFSX.
8. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла а - теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений / В. Н. Гольцев, М. Х. Каладжи, М. А. Кузманова, С. И. Аллахвердиев. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 220 с. – ISBN 978-5-4344-0180-7. – EDN LZSAJX.
9. Р 52.24.808-2014. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла а. Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2014 23 с.
10. Chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors / T. Antal, I. Konyukhov, A. Volgusheva et al. // Physiologia Plantarum. – 2018. – Vol. 165, Iss. 3 –P. 476–486. – DOI: 10.1111/ppl.12693.
11. Использование флуоресценции хлорофилла "а" для биотестирования водной среды / В. А. Осипов, Г. М. Абдурахманов, А. А. Гаджиев [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 93-100. – EDN PLRCBX.
12. Новиков Д.А., Новочадов В.В. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте. – Волгоград: ВолГМУ, 2005. – 84 с.
13. Assessment of Surface Water Quality in the Krynka River Basin Using Fluorescence Spectroscopy Methods / S. Chufitskiy, S. Romanchuk, B. Meskhi [et al.] // Plants. – 2025. – Vol. 14, No. 13. – DOI 10.3390/plants14132014. – EDN RNRTRH.
14. Аристархова, Э. А. Проблема экологической безопасности водной среды в условиях антропогенной эвтрофикации / Э. А. Аристархова // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 5, № 4(13). – С. 47-49. – EDN REEBUX.

Поступила в редакцию 04.09.2025 г.

FLUORIMETRIC ASSESSMENT OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF MICROALGAE CELLS DURING BIOTESTING

E. A. Anikina, S. V. Chufitskiy, S. M. Romanchuk, R. I. Gorbunov, E. S. Sergeeva

The results of a study of the surface waters of the Krynka River, including the Khanzhenskoye, Olkhovskoye and Zuyevskoye reservoirs, for the autumn period of 2024 are presented. The toxicity of water samples was analyzed by biotesting on a laboratory test culture of *Chlorella sorokiniana* cells. For a more detailed assessment of changes in the state of microalgae culture, methods of fluorimetric determination of photosynthetic activity of cells by induction curves of chlorophyll fluorescence were used. According to the results of the study, the stimulating effect of water samples from the Zuyevsky and Olkhovsky reservoirs on the test culture was revealed, which was reflected in an increase in the chlorophyll content in the test culture and an increase in photosynthetic activity of cells by increasing the efficiency of electron transfer between photosystems.

Keywords: biotesting, fluorescence, chlorophyll, *Chlorella sorokiniana*, Krynka River.

Аникина Елизавета Александровна

стажер-исследователь научно-исследовательской части
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.

E-mail: elizavetaalexandrovna2505@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-4398-0307

AuthorID: 1252375

Anikina Elizaveta Aleksandrovna

intern-researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Чуфицкий Сергей Викторович

старший преподаватель кафедры физиологии и биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: chufitsky@donnu.ru
ORCID: 0009-0006-6126-7958
AuthorID: 1017035

Chufitskiy Sergey Viktorovich

senior lecturer of Physiology and Biophysics
Department,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Романчук Сергей Михайлович

кандидат технических наук, проректор, ведущий научный
сотрудник научно-исследовательской части
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: s.romanchuk@donnu.ru
AuthorID: 1194977

Romanchuk Sergey Mikhailovich

candidate of technical sciences,
leading researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Горбунов Руслан Игоревич

ведущий инженер научно-исследовательской части
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: r.gorbunov@donnu.ru
AuthorID: 1278345

Gorbunov Ruslan Igorevich

Lead engineer,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Сергеева Екатерина Сергеевна

старший преподаватель кафедры физиологии и биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: sergeeva.bf@mail.ru
ORCID: 0009-0009-0341-1511
AuthorID: 1258262

Sergeeva Ekaterina Sergeyevna

senior lecturer of Physiology and Biophysics
Department,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

К МОНИТОРИНГУ ЭПИФИТНОЙ ЛИХЕНОБИОТЫ ЭТАЛОННЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИ ЦЕННЫХ ЛЕСОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025. Л. Н. Анищенко, А. А. Гайворонская

Проведено обобщение лихенологической информации при обследовании биологически ценных лесных сообществ Брянской области за 2017–2024 гг. Цель исследований – оценка современного распространения, приуроченности к местообитаниям макролишайников рода *Bryoria* Brodo et D. Hawksw. и *Usnea* Dill. ex Adans. на территории Брянской области как основы мониторинговых исследований и использования ряда видов как биоиндикаторов. Впервые рассчитан созологический индекс видов. Приведены сведения о 14 местонахождениях, особенностях заселения биотопов в лесах различных сообществ для 8 видов семейства *Parmeliaceae*. Впервые для ценозов эталонных и биологически ценных лесов указываются виды *Bryoria nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. vrangiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. kuemmerliana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *Usnea longissima* Ach. Созологический индекс для видов изменяется от 85 до 105: от 105 до 90 баллов – угрожаемые виды: *B. nadvornikiana*, *B. kuemmerliana*, *B. vrangiana*, *U. dasopoga*, *U. longissima*; редкие виды – 75–89 баллов – очень редкие: *B. fuscescens* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. capillaris* (Ach.) Brodo & D. Hawksw., *Usnea subfloridana* Stirt.

Для ООПТ Брянской области и лесных сообществ с обнаруженными видами документально и фактически подтверждена целесообразность государственной охраны, действенность мер по сохранению редких видов, а также наличие уникальных биотопов системы EUNIS лесов высокой природоохранной ценности. Присутствие редких и интересных в эколого-биологическом аспекте видов лишайников в местообитаниях свидетельствует о значительном возрасте лесных насаждений, о малой антропогенной нагрузке, благоприятных, близких к оптимальным, условиях экотопов.

Ключевые слова: лесные сообщества, лихенобиота, виды рода *Bryoria* и *Usnea*, созологический статус, биоиндикаторы, Нечерноземье РФ.

Введение. Исследования лихенобиотического разнообразия часто выступает сопутствующим звеном при биомониторинговых, лесоэкологических и фитоценологических работах. В экотонных сообществах Брянской области многолетние экспедиционные работы позволили сформировать значительную флористическую и биоценологическую базу, обнародовать результаты в двух изданиях региональной Красной книги, обосновать паспортизацию уникальных сообществ в Зелёной книге. Отдельное направление биомониторинга в период с 2012 г. по настоящее время – эколого-биологическая инвентаризация биологически ценных лесов, насаждений старинных усадебных парков. К 2017 г. появилась одна из первых обобщённых сводок видов лишайников для заповедника «Брянский лес» (Суземский и Трубчевский районы); в последующие 6 лет – собрана информация по лихенобиоте многих охраняемых объектов, в том числе и лесных [1–3]. В дальнейшем одна из задач комплексной эколого-биологической инвентаризации биоразнообразия включила лихенологическую составляющую; актуальными стали индикационные, таксономические, биохимические исследования лихенобиоты в северных и южных, юго-западных районах области как наименее изученных. В настоящее время необходимо обнародовать сведения об интересных в экологическом аспекте видах эпифитной части сообществ, наиболее уязвимых при антропогенном изменении среды, нарушении структуры биоценозов и изменении микроклимата. Также в рамках подготовки третьего издания Красной книги Брянской области важно зафиксировать динамику современного распространения охраняемых видов, их полиморфизм, возможность диагностировать ключевые местообитания в административном центре староосвоенного региона. Некоторые из описанных видов лихенобиоты в сопредельных областях и

Республике Беларусь выступают объектами, имеющими важное систематико-таксономическое значение, поэтому и информация о них будет способствовать ликвидации пробелов в биогеографическом аспекте [4].

Цель исследований – оценка современного распространения, приуроченности к местообитаниям макролишайников родов *Bryoria* Brodo et D. Hawksw. и *Usnea* Dill. Ex Adans. на территории Брянской области как основы мониторинговых исследований и использования ряда видов как биоиндикаторов.

Материалы, методы, методики исследования. Объект исследования – ценные лесные массивы (леса высокой природоохранной ценности) в пределах Брянской области, включающие лесные сообщества на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). По программе инвентаризации биологического разнообразия и ведения региональной Красной книги Брянской области масштабные исследования, проводящиеся с 2017 г., включали геоботанические и флористические работы в 8 лесных памятниках природы, 12 участковых лесничествах с фиксацией наблюдений и сбором гербарных образцов. Сбор материалов проводился со всех субстратов в лесных сообществах при маршрутном учёте, для анализа отбирались эпифитные виды, информация о которых отвечала цели работы. Лихенобиота местообитаний как наименее исследованная в административном центре Нечерноземья РФ дополнила систематические списки, включающие около 275 видов; позволила выделить биоиндикаторы ценных биотопов и расширить представления об ареалах видов, интересных в эколого-биологическом аспекте [3].

Собранные образцы лишайников предварительно идентифицировали (по возможности) в полевых условиях, затем устанавливали видовую принадлежность в лабораторных условиях лихенологическими методами. Анализ 37 образцов был произведён для интересных и ценных с эколого-биологических позиций видов рода *Bryoria* и *Usnea*, пополнившие актуальные списки лихенобиоты.

Окончательную принадлежность видов подтвердили А.Г. Цуриков – д.б.н., профессор кафедры ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины (Республика Беларусь), Л.А. Конорева – к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории лихенологии и бриологии БИН имени В.Л. Комарова РАН (2024–2025 гг.). Ревизия лишайников включала морфологические исследования; хроматографические (химические) и молекулярно-генетические изыскания (на базе оборудования и лаборатории Гомельского государственного университета). Актуальная задача инвентаризации именно эпифитных видов двух родов необходима для устранения пробелов в понимании биоиндикаторов биологически ценных лесов антропогенно изменённых местообитаний, решения вопроса о статусе видов региональной Красной книги (2016), получения сведений о динамике ареала интересных видов [5]. Созологический статус видов – существующий или предполагаемый – определялся с использованием адаптированных критериев МСОП (для регионального уровня), а также критериев, предложенных отечественными специалистами [6]. Индекс токсифобности присваивался видам на основе непосредственных наблюдений и литературных данных [7].

Номенклатура видов соответствует сводке по лишайникам Фенноскандии с учётом сведений по лихенофлоре России [8, 9].

Результаты исследований и их обсуждение. За восьмилетний период наблюдений получены новые сведения о распространении и местонахождении видов родов *Bryoria* и *Usnea*, дополнены списки лихенобиоты региональных ООПТ. Во второе издание Красной книги Брянской области были внесены виды: *Usnea dasopoga* (Ach.) Mot., *U. barbata* Stirt. (L.) F. Y. Wigg. (охраненный статус 3) [5]. Ни один вид рода

Bryoria не рассматривался ввиду отсутствия достоверных данных о местообитаниях лишенобиоты на территории Брянской области.

При подготовке третьего издания региональной Красной книги приказом № 693 (от 26.12.2024) внесены дополнения в списки видов и предложены к охране: два вида рода уснея, повысив их природоохранный статус: *Usnea subfloridana* Stirt. (охранный статус 2), *Bryoria capillaris* (Ach.) Brodo et D. Hawksw. (охранный статус 1), *B. implexa* (Hoffm.) Brodo et D. Hawksw. (охранный статус 2). Ранее опубликованные работы (2017–2023 гг.) расширили сведения о лишенобиоте экотонных местообитаний Брянской области, в том числе и встречаемости видов родов бриория и уснея [2, 3].

При обследовании крупного биосферного резервата Неруссо-Деснянское Полесье (208 видов лишайников) и прилегающих местообитаний в Трубчевском, Суземском, Севском районе области в списках видов были приведены *B. capillaries*, *B. cf. fuscescens* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. implexa* [3]. Единичные находки видов рода бриория не дали возможности создать целостное представление о распространении и встречаемости видов.

Несмотря на неоднократные указания лихенологов (Е.Э. Мучник, 2017–2018 гг.) как сомнительных находок для территории области лишайников рода бриория, например, *B. nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. геоботанические и флористические описания экотонных местообитаний, хвойно-широколиственных и широколиственных лесов в северных и южных частях области расширили не только список лишенобиоты, но и позволили диагностировать редкие виды, виды ключевых местообитаний, в том числе и старовозрастных лесов.

Обработка лихенологических коллекций позволила выявить местообитания видов рода *Bryoria*, видов рода *Usnea* (семейство *Parmeliaceae*).

B. nadvornikiana (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. – редкий северный вид, внесённый в краснокнижные списки охраняемых видов стран Западной Европы, обнаружен в четырёх реперных точках, диагностирован как облигатный эпифит на стволе *Betula pendula* L. местообитания вида: региональный памятник природы «Брасовские дубравы» (Брасовский район), в сложной дубраве на границе с опушечным сообществом, обрастание на высоте 1,85–2,4 м на ветви (10.08.2019, гербарий BRSU – гербарий Брянского государственного университета). Также в единственном местообитании памятника природы Рёвны (Навлинский район) дубово-берёзовом лесу – на дереве лесного окна, обрастание на высоте 1,8–2,3 м на ветви (11.08.2022). Третье местонахождение зарегистрировано в 2,8 км к северу от д. Рассуха (Унечский район) в сосняке сложном (01.09.2020, гербарий БИН РАН), единичная особь на высоте 1,78 м. на ветви дерева. Одна находка сделана в памятнике природы Петровское болото (Клетнянский район), в сосняке сложном, высота – 1,85 м (15.06.2021, гербарий БИН РАН). Состояние популяций *B. nadvornikiana* может быть оценено как удовлетворительное, однако значительного распространения вид не имеет: лимитирующими факторами выступают абиотические условия – освещённость, влажность и кислотность коры деревьев. При сравнении эколого-биологических характеристик вида в Брянской области, литературных данных выяснено, что вид экопластичен: заселяет подходящие в данных условиях для него субстраты, однако найден в зрелых и старовозрастных лесах, в том числе и малонарушенных, что позволяет отнести вид к индикаторам лесов высокой природоохранной ценности и ключевых местообитаний [10]. Прогноз по целостности местообитаний бриории Надворника в целом благоприятный, однако, небольшая буферная зона памятников природы не способствует уменьшению антропогенной нагрузки в виде рекреации, сенокошения, несанкционированных вырубок. Исследователями также отмечается, что для видов рода бриория наиболее благоприятными местообитаниями являются границы ООПТ [11]. Местонахождения

видов носят островной характер. Для Московской области вид указывается как редко встречающийся, находящийся под охраной. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4» – выдерживают умеренное загрязнение и могут встречаться в лесопарках и на ООПТ городов, в усадебных парках [7].

Виды *B. vrangiana*, *B. kuemmerliana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. рассматривались как хемотипы морфологически разнородного вида *B. implexa* s.l. [4, 12], их находки идентифицированы для местообитаний Брянской области А.Г. Цуриковым (2024) и свидетельствуют о гетерогенности вида *B. implexa* секции *Implexae*, охватывающего ареал в Европе и Азии [4].

Единичная находка *B. vrangiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. – свидетельствует о сохранности в урочищах ландшафтов уникальных местообитаний, пригодных для поселения стенотопного вида. Небольшие талломы обнаружены в березняке можжевельником в окрестностях д. Житня (6,5 км к северу от населённого пункта, Почепский район), редком для области сообществе; вид – облигатный эпифит – на стволе берёзы повислой на высоте от 1,6 до 1,9 м (07.08.2018, гербарий BRSU). Вид встречается в сообществах средней освещённости, достаточно низкой влажности, так как в сообществе фактически не формируется подлесок. Однако осадки, стекающие по стволу дерева, доступны популяции, что обеспечивает нормальное развитие особей. Вид не охвачен мерами охраны на территории области. Бриория Вранга отмечена как редкий вид в Московской области, а также как наиболее чувствительный к изменениям в старовозрастных насаждениях [7, 10]. Вид *B. vrangiana* в Республике Беларусь также предпочитает поселяться на берёзе повислой – 16,4 %, являясь самым распространённым представителем рода бриория из идентифицированных по находкам и сборам; также широко распространён в Фенноскандии [4]. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4».

Вид *B. kuemmerliana* также имеет единичное местонахождение в памятнике природы Владимирская дубрава (Комаричский район) в сообществе дубравы разнотравной, на границе ООПТ; отмечен на стволе берёзы повислой на высоте от 1,85 до 1,9 м (14.08.2019, гербарий BRSU). Также как и вид (хемотип) *B. vrangiana* для местообитаний Республики Беларусь отмечен не часто, и в 2023 г. указывался как впервые выявленный. Вид освоил кору берёзы повислой, что указывается в 15 % находок для Беларуси [4]. Бриория известна по единичным и разрозненным находкам на северо-западе России, в Средней России (Костромская и Нижегородская область), на Северном Кавказе, в западной Европе – от Скандинавии до Пиреней.

В целом локалитеты двух видов – *B. vrangiana* и *B. kuemmerliana* – начало мониторинга распространения популяций малоизученных элементов лишенобиоты.

Bryoria fuscescens (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. – бореальный мультирегиональный вид рассеянно встречающийся в подзоне хвойно-широколиственных лесов, достаточно редко обнаруживается в местообитаниях широколиственных лесов и лесостепи. Облигатный эпифит на стволе *B. pendula*, особи обнаружены в Пальцовском лесничестве в окрестностях п. Жиркины Дворы (Брянский район), в сложном сосняке, обрастание на высоте 1,9–2,0 м (08.07.2021, гербарий БИН РАН). Популяции этого вида отмечались на ООПТ федерального значения в Брянской области, однако особи были малочисленны, состояние популяций, как и обнаруженной в Брянском районе, удовлетворительное. Для Московской области вид указывается как часто встречающийся, находящийся под охраной. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4».

Достаточно многочисленны локалитеты *B. capillaris* (Ach.) Brodo & D. Hawksw. – бореальный голарктический вид, характеризующие его как облигатного эпифита.

Авторы отмечают оптимум для этого вида в горных широколиственно-еловых лесах, что свидетельствует о широкой экологической амплитуде популяций вида. Популяции бриории волосовидной зарегистрированы на стволе *B. pendula* в Дятьковском лесничестве, кв. 23 (Дятьковский район), в сосняке сложном, обрастание на высоте 1,72–2,1 м (11.08.2022, гербарий БИН РАН). Также в единственном местообитании Семецкого лесничества, кв. 51 (Почепский район) в ельнике мертвопокровном, на стволе ели европейской – 1,6–1,75 м (05.07.2019). Третье местонахождение обнаружено также в Почепском районе в региональном памятнике природы Семецкие дубравы в сосняке сложном на экотонном пространстве (15.08.2022, гербарий БИН РАН), единичная особь на высоте 1,88 м на стволе берёзы повислой. Состояние популяций *B. capillaris* может быть оценено как удовлетворительное, особи вида распространены единично, даже на стволе хвойного дерева. Бриория волосовидная также как и некоторые бриории достаточно пластична и является эвритопом [7].

Местообитания памятника природы и мёртвопокровный ельник имеют экологические условия и типологию сформировавшихся сообществ, характеризующихся ключевые местообитания в системе EUNIS, поэтому вид – индикатор биологически ценных лесов и маркирует ключевые экотопы. Прогноз по целостности местообитаний *B. capillaris* в целом удовлетворительный, однако, поражение елей короедом-типографом и санитарные рубки, в том числе и на территории ООПТ области снижает вероятность распространения вида, обнаруженного на стволе ели европейской. Для Московской области вид указывается как часто встречающийся, находящийся под охраной [7, 10]. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4».

Usnea subfloridana Stirt. как бореальный вид имеет локалитеты, описанные в северных районах области: в Семецком лесничестве, кв. 56 (Почепский район) в ельнике высокотравном на ветвях ели европейской (04.10.2022, гербарий БИН РАН). Второе местообитание – региональный памятник природы Петровское болото (Клетнянский район), на стволе берёзы повислой (07.08.2021, гербарий БИН РАН). Популяции вида немногочисленны, с невысоким проективным покрытием. Сохранность популяций удовлетворительная, однако в Семецком лесничестве зарегистрированы значительные рубки ухода, лишаящие субстратов для поселения этого редкого вида. Вид – типичный эвритоп, для Московской области имеются указания на разнообразные субстраты для его поселения, в том числе и на иве козьей. Эта полисубстратность уменьшает лимитирующее влияние микроусловий на распространение вида. По данным авторов *U. subfloridana* – полиотолерантен, достаточно устойчив к загрязнению воздуха, так как зарегистрирован даже на территории г. Москвы [13]. На территории России вид относится к достаточно распространённым видам. В Республике Беларусь уснея пости цветущая приурочен к соснякам (36 % от местообитаний), к ельникам (20 %), к дубравам (11 %) и другим местообитаниям; в основном заселяет стволы берёзы повислой [14]. Для Брянской области вид находится на границе ареала, его распространение слабо изучено. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4».

U. longissima Ach. обнаружена в единственном местонахождении – в разнотравном ельнике (приручевом ельнике) Дятьковского лесничества в 2 км к северу от п. Любохна (Дятьковский район). Несколько особей вида зарегистрированы на стволе *Picea abies* (L.) Karst. на высоте 1,95 м (05.09.2022, гербарий БИН РАН) Уснея длиннейшая – вид лесной зоны, распространён и в лесном поясе горных местностей. Местонахождение уснеи указывалось и для Смоленской области; в равнинной части Европейской России локалитеты известны из Вологодской, Костромской области, Республики Марий Эл [15, 16].

Вид требователен к режиму влажности и освещённости – это типичный стеногигрофит и стенофит. По данным авторов вид осваивает только ненарушенные антропогенным вмешательством биотопы. Обнаружение *U. longissima* в условиях Брянской области свидетельствует о высокой сохранности лесов зоны хвойно-широколиственных лесов в отдельных местообитаниях. Уснея длиннейшая – типичный биоиндикатор старовозрастных эталонных лесных сообществ, а также высокой чистоты атмосферного воздуха. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «5».

Usnea dasopoga (Ach.) Nyl. – бореальный ацидофит, зарегистрирован в памятнике природы Рёвенские дубравы (Навлинский район) в дубраве разнотравной на стволе дуба черешчатого на высоте 1,65–1,7 м (12.09.2020, гербарий BRSU). Состояние популяции удовлетворительное, вид зарегистрирован на коре дерева с кислой реакцией среды. Также как и некоторые виды рода Уснея – уснея густобородая эвритопный вид, характерный для таёжных лесов – равнинных и горных, редкий для подзоны широколиственных лесов. Основным адаптационным признаком – разнообразие субстратов для поселения, включающих виды форофитов с кислой реакцией среды.

Авторы отмечают, что популяции вида зарегистрированы для малонарушенных и старовозрастных лесов, могут служить биоиндикаторами состояния атмосферного воздуха. По биоиндикационным свойствам виду присвоен индекс токсифобности «4».

Таким образом, обнаруженные виды лишенобиоты – результаты одного из этапов биомониторинга биологического разнообразия в экотонных пространствах Брянской области; при накоплении материалов ревизия состояния популяций позволит сформировать рекомендации по спискам охраняемых видов региональной Красной книги. В соседних с Брянской областью регионах охраняются лишь некоторые биологически ценные виды (таблица 1).

Таблица 1

Встречаемость видов рода *Bryoria* и *Usnea* в списках охраняемых видов центра Нечерноземья РФ

Виды лишенобиоты	Перечень охранных документов					Примечание
	КрМО*	КрСм	КрКл	КрКр	КрОр	
1 <i>B. nadvornikiana</i>	+	–	–	–	–	нередко встречается в зоне хвойных лесов, охраняется в Западной Европе
2 <i>B. fuscescens</i>	+	–	–	–	+	химически и экотопически полиморфный вид
3 <i>B. capillaris</i>	+	–	–	–	–	химически и экотопически полиморфный вид
4 <i>B. kuemmerliana</i>	–	–	–	–	–	отмечен для Республики Беларусь в нескольких локалитетах ввиду трудности определения; необходимость актуализации данных о распространении
5 <i>B. vrangiana</i>	+	–	–	–	–	трудность определения вида, необходимость актуализации данных о распространении
6 <i>U. subfloridana</i>	+	–	–	+	+	распространённый вид в зоне хвойных лесов
7 <i>U. dasopoga</i>	+	–	–	–	–	местообитания в зоне хвойных и хвойно-широколиственных лесов
8 <i>U. longissima</i>	–	–	–	–	–	не отмечался в Нечерноземье ввиду северного ареала

Примечание: Красные книги – КрМО – Московской области (2018), КрСм – Смоленской области (2012), КрКл – Калужской области (2015), КрКр – Курской области (2017), КрОр – Орловской области (2021) [17].

В региональных Красных книгах центра Нечерноземья РФ, исключая достаточно изученные местообитания Московской области, не отмечены как единицы, подлежащие охране, *U. longissima*, *B. kuemmerliana*. Поэтому необходимо оптимизировать ареалогические изыскания локалитетов этих видов, особенно в зоне хвойно-широколиственных лесов Смоленской, Калужской области.

Созологическая оценка видов по итогам описания местообитаний и сопутствующих данных для обоснования мер охраны и природоохранного статуса в Брянской области приведена в таблице 2.

Таблица 2

Созологическая оценка видов рода *Bryoria* и *Usnea* в Брянской области

Признаки	Виды лишайников *** / Баллы созологической оценки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Число местонахождений	4	4	4	4	4	4	4	4
Встречаемость / обилие вида в типичных экотопах	4	3	3	4	3	3	3	4
Антропоотолерантность	4	4	3	4	4	3	4	4
Эколого-ценотическая амплитуда	3	3	3	4	3	3	3	4
Биогеографическая значимость	3	3	3	3	3	3	3	3
Топография ареала	2	2	2	2	2	2	2	2
Официальный природоохранный статус*	2	1	2	2	4	2	2	4
Территориальная защищённость	2	2	1	4	2	1	2	4
Возможность трансплантации / культивирования	3	3	3	3	3	3	3	3
Хозяйственное / практическое значение**	3	2	2	2	2	2	3	3
Итоговое число баллов	97	89	85	104	95	85	92	105

Примечание: * Природоохранный статус приводится с учётом таблицы 1. ** Хозяйственное значение принято по литературным данным. *** Виды лишайников указаны аналогично таблице 1.

Созологический индекс для описываемых видов изменяется от 85 до 105 (максимум по рекомендуемым критериям – 120 баллов) [6], что свидетельствует о эколого-биологических факторах уязвимости видов и необходимости дальнейших биомониторинговых исследований. Согласно рекомендациям по созологическому анализу интегральные оценки 8 видов позволили выделить две группы видов (120–90 баллов) – угрожаемые: *B. nadvornikiana*, *B. kuemmerliana*, *B. vrangiana*, *U. dasopoga*, *U. longissima*; редкие (89–60 баллов – 75–89 – очень редкие). В дальнейшем все исследованные виды могут быть рекомендованы к включению в списки охраняемых видов региональной Красной книги. Также при планировании долгосрочных наблюдений в таблицу созологической оценки можно расширить, включив сведения о динамике численности видов на десятилетие, о жизненности популяций в местообитаниях, о возрастной структуре.

Заключение. Для всех видов лимитирующими факторами выступают: сведение лесов, нарушение структуры лесных сообществ ввиду различных по характеру и степени антропогенных воздействий, загрязнение воздушного бассейна. Также необходимо учитывать один из вторичных факторов редкой и спорадической встречаемости – нахождение видов на границе ареала (биогеографический критерий).

Для видов рода *Bryoria* выявлено 10 местонахождений, для видов рода *Usnea* – 4 местонахождения.

Эпифитная лишайнофлора лесных сообществ – малоизученная и ценная в созологическом, биоиндикационном, природоресурсном аспекте часть биологического разнообразия. Все найденные и описанные виды не только пополняют биомониторинговую базу на эталонных и фоновых территориях, но и ликвидируют неравномерность

изученности староосвоенной территории. Материалы по видам родов *Bryoria* и *Usnea* пополняют данные по динамике распространения, встречаемости и численности, состояния популяций редких видов, видов мониторингового списка и видов локального распространения. Для ООПТ Брянской области и лесных сообществ с обнаруженными видами документально и фактически подтверждена целесообразность государственной охраны, действенность мер по сохранению редких видов, а также наличие уникальных биотопов системы EUNIS лесов высокой природоохранной ценности.

В экотопах Брянской области виды обнаружены в сложных сосняках, разнотравных дубравах и смешанных лесах, но так же как и в Московской, Смоленской области встречаются на старовозрастных экземплярах берез. Поэтому присутствие этих редких видов лишайников свидетельствует о значительном возрасте насаждений и, безусловно, о малой антропогенной нагрузке, благоприятных, близких к оптимальным условиям местообитания. В связи с вышеизложенным поиски местонахождений видов рода Бриория необходимо расширить на пограничные с Брянской областью территории и ельники, в том числе и заболоченные, сформировав программу лишайнобиологического мониторинга [18]. Однако после 2010 г. еловые насаждения в Брянской области были поражены короедом-типографом и вследствие гибели древостоя леса были пройдены санитарными рубками. Массовое выпадение хвойного вида из состава лесов, вероятно, оказало влияние на распространение редких для области видов.

Нахождение видов бриорий в окрестностях небольших населённых пунктов свидетельствует о существовавших ранее массивов старовозрастных лесов. Также популяции бриорий и усней описаны в экотопах сообществ при отсутствующих крупных загрязняющих производствах с минимальным загрязнением воздуха. Этот факт делает возможным использование всех описанных видов в качестве надёжных биоиндикаторов отсутствия промышленных поллютантов в воздухе.

Виды рода Уснея тяготеют в основном к хвойным лесам – ельникам различной структуры, в Брянской области – это леса южной тайги, некоторые из участков пройдены выборочными рубками вследствие поражения вредителями. Эти местообитания нетипичны для области, поэтому поиск видов должен вестись в северных районах области, а также на границе со Смоленской и Калужской областью. По территории Брянской области проходит южная граница распространения ели европейской, поэтому один из лимитирующих факторов, определяющих наличие видов, – отсутствие субстратов для поселения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мучник Е.Э., Конорева Л.А., Чабаненко С.И., Таран А.А., Анищенко Л.Н. Лихенобиота заповедника «Брянский лес» // Лесоведение. – 2017. – № 5. – С. 73-80. – DOI: 10.7868/S0024114817050084
2. Мучник Е.Э. Дополнения к лишайнобиоте Брянской области // Новости систематики низших растений. – 2020. – № 54 (2). – С. 441-451.
3. Мучник Е.Э., Цуриков А.Г. К изучению лишайнобиоты биосферного резервата «Неруссо-Деснянское Полесье» (Брянская область) // Разнообразие растительного мира. – 2023. – № 2 (17). – С. 12-35. – DOI: 10.22281/2686-9713-2023-2-12-32
4. Цуриков А.Г., Голубков В.В., Белый П.Н., Болсун И.М. Ревизия лишайников рода *Bryoria* Беларуси. II. *Bryoria implexa* s. l. // Экспериментальная биология и биотехнология. – 2023. – № 2. – С. 65-80.
5. Красная книга Брянской области / Ред. А.Д. Булохов, Н.Н. Панасенко, Ю.А. Семенищенков, Е.Ф. Ситникова. – Брянск: РИО БГУ, 2016. – 432 с.
6. Мучник Е.Э. Созологический анализ как возможный инструмент ведения лишайнобиологических разделов Красных книг // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2024. – № 9 (75). – С. 30-38. – DOI: 10.19110/1994-5655-2024-9-30-38
7. Толпышева Т.Ю. Лишайники семейства Parmeliaceae Московского региона и их использование в фоновом экологическом мониторинге // Бюллетень МОИП. – 2024. – Т. 129, вып. 5. – С. 50-56. – DOI: 10.55959/MSU0027-1403-BB-2024-129-5-50-56

8. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-Forming and Lichenicolous Fungi / M. Westberg, R. Moberg, M. Myrdal, A. Nordin, S. Ekman. – Uppsala University : Museum of Evolution, 2021. – 935 p.
9. Список лишенофлоры России / сост. Г. П. Урбанавичус, отв. ред. М. П. Андреев. – СПб.: Наука, 2010. – 194 с
10. Аристархова Е.А., Сулова Е.Г., Шадчинов С.М. Разнообразие и распространение лишайников рода бриория (*Bryoria*) в Московской области // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2020. – № 5. – С. 88-97.
11. Нотов А.А., Нотов В.А., Фертиков В.И. О распространении некоторых редких и охраняемых видов лишайников в Московской части национального парка «Завидово» // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Биология и экология». – 2018. – № 1. – С. 138-150.
12. Myllys L, Velmala S, Holien H. *Bryoria* // Nordic lichen flora. Volume 4 – Parmeliaceae / Thell A., Moberg R., editors. – Göteborg: Zetterqvist Tryckeri AB, 2011. – P. 26-37.
13. Толпышева Т.Ю., Сулова Е.Г. Лишайники рода *Usnea* на особо охраняемых лесных природных территориях Московской области // Лесоведение. – 2019. – № 1. – С. 57-63. – DOI: 10.1134/S002411481901011X
14. Болсун И.М., Цуриков А.Г., Голубков В.В., Белый П.Н. Ревизия лишайников рода *Usnea* Беларуси. II. *Usnea florida* и *Usnea subfloridana* // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. – 2024. – № 2 (64). – С. 65-73.
15. Мучник Е.Э., Тихонова Е.В. Дополнения к лишенофлоре Смоленской области // Ботанический журнал. – 2020. – Т. 105, № 8. – С. 807-815. – DOI: 10.31857/S0006813620080104
16. Урбанавичус Г.П., Урбанавичене И.Н. Находки новых и редких для Мурманской области видов лишайников // Ботанический журнал. – 2021. – Т. 106, № 8. – С. 801-806. – DOI: 10.31857/S0006813621080093
17. Красные книги. Плантариум. [Электронный ресурс]. – <https://www.plantarium.ru/page/redbook/id/324.html>
18. Мучник Е.Э., Прохорова Н.Е. К формированию раздела «Лишайники» Красной книги Калужской области // Разнообразие растительного мира. – 2025. – № 1 (24). – С. 113-121. – DOI: 10.22281/2686-9713-2025-1-113-121

Поступила в редакцию 30.07.2025 г.

TO THE MONITORING OF EPIPHYTIC LICHEN BIOTA OF REFERENCE AND BIOLOGICALLY VALUABLE FORESTS OF THE BRYANSK REGION

L. N. Anishchenko, A. A. Gaivoronskaya

The lichenological information was summarized during the survey of biologically valuable forest communities of the Bryansk region for 2017-2024. The purpose of the research is to assess the current distribution, confinement to habitats of macrolichens of the genus *Bryoria* Brodo et D. Hawksw. and *Usnea* Dill. ex Adans. in the Bryansk region as a basis for monitoring studies and the use of a number of species as bioindicators. For the first time, the sozological index of species was calculated. The paper presents information on 14 locations and features of biotope colonization in forests of various communities for 8 species of the *Parmeliaceae* family. For the first time, the following species are indicated for clusters of standard and biologically valuable forests: *Bryoria nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. vrangiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. kuemmerliana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw. *Usnea longissima* Ach. The sozological index for species varies from 85 to 105: from 105 to 90 points – threatened species: *B. nadvornikiana*, *B. kuemmerliana*, *B. vrangiana*, *U. dasopoga*, *U. longissima*; rare species – 75–89 points – very rare: *B. fuscescens* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *B. capillaris* (Ach.) Brodo & D. Hawksw., *Usnea subfloridana* Stirt.

For the protected areas of the Bryansk region and forest communities with the identified species, the feasibility of state protection, the effectiveness of measures to conserve rare species, and the presence of unique biotopes of the EUNIS system of forests of high conservation value have been documented and actually confirmed. The presence of rare and interesting lichen species in the ecological and biological aspects in the habitats indicates a significant age of forest plantations, low anthropogenic load, favorable, close to optimal, conditions of ecotopes.

Keywords: forest communities, lichen biota, species of the genus *Bryoria* and *Usnea*, sozological status, bioindicators, Non-Black Earth Region of the Russian Federation.

Анищенко Лидия Николаевна

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры географии, экологии и землеустройства, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», г. Брянск, РФ.

E-mail: Lanishchenko@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4842-5174

AuthorID: 260617

Anishchenko Lidiya Nikolaevna

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management, FSBEI HE «Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky», Bryansk, Russian Federation.

E-mail: Lanishchenko@mail.ru

Гайворонская Анжелика Алексеевна

аспирант кафедры географии, экологии и землеустройства, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», г. Брянск, РФ.

E-mail: eco_egf@mail.ru

Gaivoronskaya Anzhelika Alekseevna

postgraduate student of the Department of Geography, Ecology and Land Management, FSBEI HE «Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky», Bryansk, Russian Federation.

E-mail: eco_egf@mail.ru

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ГОРОДА ТОЛЬЯТТИ

© 2025. М. А. Богданова, С. А. Соков

Представлены результаты определения содержания тяжелых металлов в почвенном покрове городского округа Тольятти в различных функциональных зонах. Определено валовое содержание кадмия, кобальта, марганца, меди, свинца и цинка методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Содержания свинца в исследуемых почвах города выше установленного значения ОДК выявлено в промышленной зоне в двух мониторинговых точках в 1,15 и 3 раза выше ОДК. Концентрации цинка, превышающие ОДК выявлены в жилой зоне в 1,05 раза выше ОДК и промышленной зоне в 1,38 раза выше ОДК. Расчет суммарного показателя загрязнения показал, что почвы города можно отнести к «допустимой» категории загрязнения.

Ключевые слова: почва; валовое содержание тяжёлых металлов; атомно-абсорбционный метод.

Введение. Почва представляет собой не только основу сельскохозяйственного производства, но и ключевой элемент функционирования природных экосистем, выполняющий широкий спектр экологических функций. К их числу относятся обеспечение среды для производства биомассы, фильтрация загрязняющих веществ и предотвращение их проникновения в грунтовые воды, участие в буферных и трансформационных процессах химических соединений, поддержание биоразнообразия и сохранение генофонда, формирование условий жизнедеятельности человека, а также служение источником сырья и носителем исторической информации [1–5]. Таким образом, экологическая значимость почвенного покрова выходит далеко за пределы аграрного сектора, охватывая вопросы охраны окружающей среды, устойчивого природопользования и здоровья населения [5–7].

С начала XXI века во многих развитых странах, в том числе в России, фиксируется усиление антропогенного воздействия на почвы, что приводит к деградации земельных ресурсов и ухудшению их качественного состояния [8]. Среди многочисленных загрязнителей особое внимание привлекают тяжелые металлы, поступающие в окружающую среду преимущественно в составе аэрозолей техногенного происхождения [9]. Эти элементы отличаются способностью накапливаться в почвах, где процессы их выведения протекают крайне медленно. В результате почва может становиться источником вторичного загрязнения, изменяя пространственное распределение и химическую форму соединений в ходе миграции [10]. В работах зарубежных авторов подчеркивается, что распределение тяжелых металлов в почвенном покрове определяется сочетанием метеорологических, топографических и геохимических факторов, а также характеристиками источников эмиссий [1, 11–13].

Город Тольятти, расположенный в Самарской области, является одним из крупнейших промышленных центров Поволжья, специализирующимся на машиностроении и химическом производстве. Здесь сосредоточены такие крупные предприятия, как АО «АвтоВАЗ», ООО «Тольяттикаучук», ПАО «КуйбышевАзот» и АО «Тольяттиазот» и ряд других производств [14]. Интенсивная техногенная нагрузка, обусловленная их деятельностью, неизбежно отражается на состоянии всех компонентов окружающей среды, включая почвы, которые аккумулируют многолетнее

антропогенное загрязнение. По данным, представленным в докладах об экологической ситуации Самарской области, объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников на территории города Тольятти в 2024 году увеличился на 3622 тонны по сравнению с 2023 годом [15, 16].

Почвенный покров Тольятти отличается высоким уровнем пространственной и химической неоднородности. В его структуре преобладают террасовые и выщелоченные черноземы на глинах и суглинках различного механического состава, серые лесные и дерново-лесные почвы, а также боровые пески. Разнообразие типов почв в сочетании с их распределением по промышленно-селитебным и природным зонам определяет различную способность к миграции и аккумуляции химических элементов [2, 17].

Климатические условия региона, характеризующиеся континентальностью, сезонной изменчивостью ветров и температур, дополнительно влияют на динамику и направление миграционных потоков загрязнителей [16]. В совокупности природные и антропогенные факторы формируют сложную систему, в рамках которой оценка содержания тяжелых металлов в почвах приобретает ключевое значение для понимания экологического состояния территории и разработки мер по его улучшению. Несмотря на наличие исследований, посвящённых анализу загрязнения почв тяжелыми металлами в различных регионах России со схожим уровнем техногенной нагрузки [6, 18–24] сведения о пространственном распределении этих элементов на территории г. Тольятти остаются фрагментарными и требующим актуализацию [8, 25]. Отсутствует комплексный анализ, учитывающий, как геохимические особенности почвенного покрова, так и влияние локальных источников техногенной эмиссии.

Цель исследования заключалась в проведении оценки содержания тяжелых металлов в почвах города Тольятти для выявления зон с повышенным уровнем загрязнения, установления факторов, определяющих пространственное распределение загрязнителей, и в дальнейшем формирования научно обоснованных рекомендаций по экологическому мониторингу и снижению техногенной нагрузки.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на территории городского округа Тольятти в начале мая 2025 года. Образцы почв отбирались на 15 мониторинговых площадках, которые были выбраны с учетом уровня антропогенной нагрузки. Название мониторинговых точек приведено в таблице 1. Отбор проб осуществляли в различных функциональных зонах: промышленная, автотранспортная, жилая и рекреационная с целью формирования репрезентативной выборки. Ниже приведена краткая характеристика исследуемых территорий.

Промышленные зоны расположены на северо-востоке города, среди жилых кварталов, Центрального, Комсомольского и Автозаводского районов. Включают в себя предприятия различных отраслей промышленности: машиностроительной, химической, теплоэнергетической, лёгкой и пищевой.

Жилые зоны отличаются высокой плотностью размещения жилых объектов с интенсивным движением личного и общественного автотранспорта. Экологическая обстановка неоднородна, с участками повышенной нагрузки в непосредственной близости с промышленными предприятиями и лесными массивами, обеспечивающими относительное благополучие в других.

Все три района города окружены лесами: преимущественно сосновыми на западе, дубовыми, осиновыми, берёзовыми, липовыми на юге. Тольятти обладает развитой сетью рекреационных зон, на территории города насчитывается более 30 парков, скверов и благоустроенных зон отдыха.

Таблица 1

Мониторинговые точки отбора почвенных проб

№ пробы	Место наблюдения	№ пробы	Место наблюдения	№ пробы	Место наблюдения
№1	Автозаводской район, Ленинский пр-т, 3	№6	Автозаводской район, Тополиная, 49	№11	Комсомольский район, микрорайон Шлюзовой, ул. Энергетиков, 23
№2	Центральный район, ул. Голосова, 75	№7	Автозаводской район, ул. Фрунзе, 47	№12	Автозаводской район, Парк культуры и отдыха «Парк Победы» (со стороны ул. Юбилейная)
№3	Центральный район, ул. Советская, 87	№8	Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №6	№13	Центральный район, Центральный парк культуры и отдыха (со стороны ул. Гагарина)
№4	Комсомольский район, ул. Лизы Чайкиной, 27	№9	Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №61	№14	Комсомольский район, Парк культуры и отдыха
№5	Комсомольский район, микрорайон Шлюзовой, ул. Гидротехническая, 7	№10	Центральный район, ул. Новозаводская, 8А	№15	Центральный район, Обводное шоссе, 35

Отбор почвенных проб автотранспортной зоны осуществлялся в северной части города на автодороге областного значения «Тольятти – Димитровград», соединяющей Тольятти и Ставропольский район с восточной частью Ульяновской области.

Для удобства восприятия, на рисунке 1 визуализированы точки отбора проб. Карта была создана с помощью QGIS (версия 3.40.5).

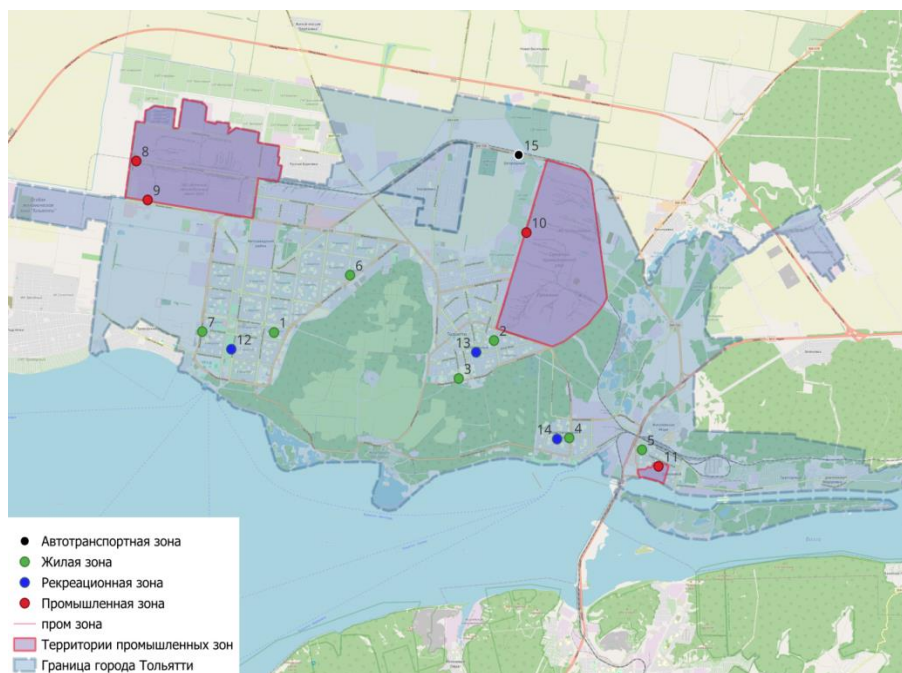


Рис. 1. Точки отбора проб на территории городского округа Тольятти

Отбор проб. Для исследования отбирались объединённые пробы, сформированные из 5 точечных проб, отобранных методом конверта с поверхностного слоя почвы (0–5 см). Отбор проб осуществляли пластмассовым шпателем. Объединенную пробу составляли путем смешивания пяти точечных проб, отобранных на одной пробной площадке. В процессе транспортирования и хранения, во избежание вторичного загрязнения, образцы почвы помещали в пластиковые контейнеры и закрывали крышками.

Лабораторные исследования. Образцы почвы доводили до воздушно-сухого состояния, разложив на слое бумаги на лабораторном столе. После тщательного перемешивания пробу распределяли равномерным слоем (1 см) и отбирали методом квартования. Затем выбирали включения – корни растений, насекомых, камни и др. Почву растирали в ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Валовое содержание тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии согласно ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002. Навеску 0,5 г помещали в фарфоровый тигель и прокаливали в муфельной печи при $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов. Остаток после прокаливания, помещенный в чашку из стеклоуглерода, обрабатывали 20 см^3 хлористоводородной кислоты и нагревают до разложения силикатной части и за тем до влажных солей. Ещё раз добавляли 5 см^3 хлористоводородной кислоты для перевода всех солей в хлориды и выпаривали досуха. К остатку приливали 20 см^3 0,5 М хлористоводородной кислоты и нагревали до растворения остатка. Полученный раствор перенесли в мерную колбу вместимостью 50 см^3 и долили до метки 0,5 М HCl. Измерения выполняли на приборе Shimadzu AA-7000.

Для пересчета массы навески на абсолютно сухую пробу определяли содержание гигроскопической влаги. Для этого свежий образец почвы (5 г) высушивали при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу до постоянной массы и рассчитывали разницу между свежим и сухим весом.

Результаты и обсуждение исследования. Содержание анализируемых металлов в пробе рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{X_p \times V}{m_1},$$

где X_p – массовая концентрация металла в анализируемом растворе, найденная по градуировочному графику, мкг/см^3 ; m_1 – масса навески в пересчете на абсолютно сухое вещество, г; V – объем анализируемой пробы, см^3 .

Полученные данные были сравнены с ПДК/ОДК утвержденными Сан-ПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [26], за исключением кобальта, так как ПДК/ОДК отсутствует. Результаты химического анализа почвенных проб представлены на рис. 2–7.

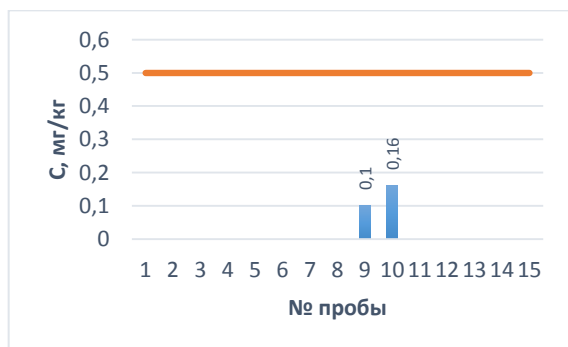


Рис. 2. Содержание Cd в пробах

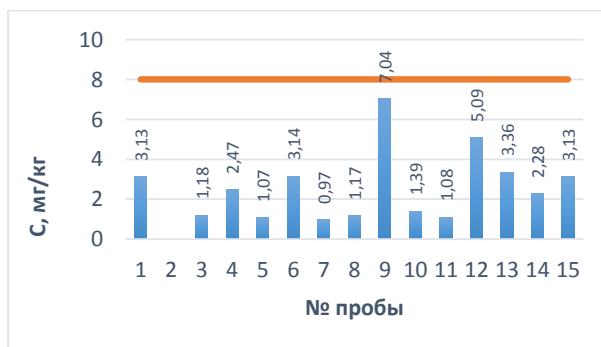


Рис. 3. Содержание Co в пробах



Рис. 4. Содержание Mn в пробах



Рис. 5. Содержание Cu в пробах

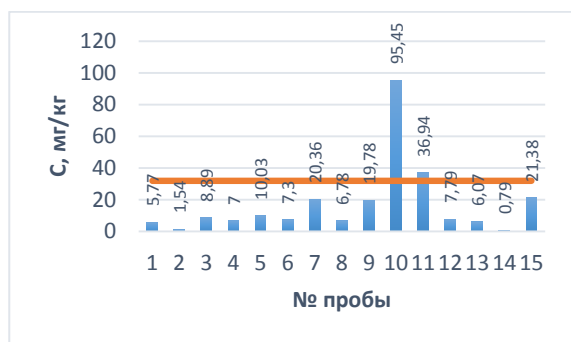


Рис. 6. Содержание Pb в пробах

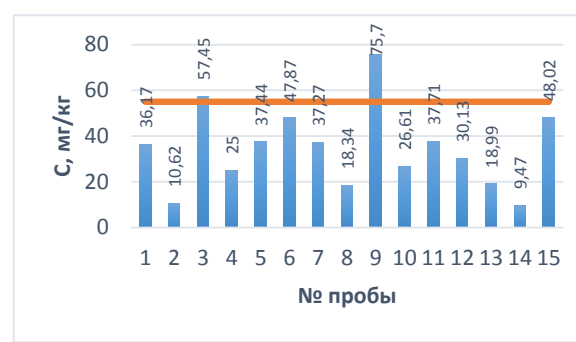


Рис. 7. Содержание Zn в пробах

Для оценки степени загрязнения почвы тяжелыми металлами рассчитывали коэффициент концентрации химического вещества (K_c). K_c определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в почве (C_i) в мг/кг почвы к региональному фоновому C_{fi} .

$$K_c = C_i / C_{fi}$$

и суммарный показатель загрязнения (Z_c). Суммарный показатель загрязнения равен сумме коэффициентов концентрации химических элементов-загрязнителей и выражен формулой:

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n-1),$$

где n – число определяемых суммируемых вещества, K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения.

В зависимости от полученного значения суммарного показателя загрязнения Z_c исследуемые почвы относят к определенной категории загрязнения: $Z_c < 16$ – низкий, допустимый уровень; $Z_c = 16-32$ – средний, умеренно опасный; $Z_c = 32-128$ – высокий, опасный; $Z_c > 128$ – максимальный, чрезвычайно опасный уровень загрязнения.

Для расчета суммарного показателя загрязнения и коэффициентов концентрации были использованы приведенные выше данные. Концентрации тяжелых металлов в исследуемых почвенных образцах сопоставляли с фоновыми значениями, характерными для ненарушенных техногенным влиянием территорий с аналогичными типами почв. В качестве фона были выбраны пробы: №4 Комсомольский район, ул. Лизы Чайкиной, 27 для песчаных почв и №12 Парк культуры и отдыха «Парк Победы» (со стороны ул. Юбилейная) для чернозема. В данных пробах содержание металлов не превышает ПДК/ОДК ни по одному показателю. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов концентрации (K_c) и значения суммарного показателя загрязнения (Z_c) в почвах исследуемых территорий

Место наблюдения	K _c						Z _c
	Cd	Co	Mn	Cu	Pb	Zn	
Жилая зона							
Автозаводской район, Ленинский пр-т, 3	—*	0,61	0,68	0,59	0,74	1,20	—**
Центральный район, ул. Голосова, 75	—*	—*	0,31	0,03	0,20	0,35	—**
Центральный район, ул. Советская, 87	—*	0,23	0,62	1,05	1,14	1,91	0,95
Комсомольский район, микрорайон Шлюзовой, ул. Гидротехническая, 7	—*	0,43	1,64	0,51	1,43	1,50	1,51
Автозаводской район, Тополиная, 49	—*	0,62	0,58	1,28	0,94	1,59	1,00
Автозаводской район, ул. Фрунзе, 47	—*	0,39	1,71	1,25	2,91	1,49	3,75
Промышленная зона							
Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №6	—*	0,47	0,63	0,95	0,97	0,73	—**
Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №61	0,2	2,85	3,35	2,25	2,83	3,03	9,51
Центральный район, ул. Новозаводская, 8А	0,32	0,27	0,33	1,39	12,25	0,88	10,46
Комсомольский район, микрорайон Шлюзовой, ул. Энергетиков, 23	—*	0,44	0,82	0,84	5,28	1,51	4,88
Рекреационная зона							
Центральный район, Центральный парк культуры и отдыха (со стороны ул. Гагарина)	—*	0,66	0,57	0,70	0,78	0,63	—**
Комсомольский район, Парк культуры и отдыха	—*	0,45	0,44	0,38	0,10	0,31	—**
Автотранспортная зона							
Центральный район, Обводное шоссе. 35	—*	0,61	0,86	2,07	2,74	1,59	3,88

Примечание:

* коэффициент концентрации химического вещества не рассчитан, так как содержание определяемого загрязнителя выявлены в значениях ниже предела количественного определения.

** расчетное значение суммарного индекса загрязнения почв ниже нуля

Содержание кадмия в почвах промышленной зоне варьировало в пределах 0,1–0,16 мг/кг. В остальных функциональных зонах его содержание выявлено в значениях менее предела количественного определения методом атомно-абсорбционный спектрометрии. По этой причине при оценке загрязнения почв тяжелыми металлами в городе Тольятти его значения не учитывались.

Наименьшее содержание кобальта зафиксировано в жилой зоне в месте наблюдения Автозаводской район, ул. Фрунзе, 47 (0,97 мг/кг), наибольшее в промышленной зоне Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №61 (7,04 мг/кг). Учитывая наибольшие значения коэффициента концентрации K_c в каждой функциональной зоне, составили следующий ряд уменьшения накопления тяжелых

металлов в почвах города: промышленная зона (2,85) > рекреационная зона (0,66) > жилая зона (0,62) > автотранспортная зона (0,61).

Концентрация марганца не превышает допустимых значений ни в одной точке (65,88–350,26 мг/кг). Наибольшее значение получено в промышленной зоне в месте наблюдения Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ», КПП №61. Накопление марганца в почве наблюдалось в следующей уменьшающейся последовательности: промышленная зона (3,35) > жилая зона (1,71) > автотранспортная зона (0,86) > рекреационная зона (0,57).

Содержание меди в образцах почвы не превышает ОДК ни в одной точке из отобранных проб. Наибольшее содержание определено в Автотранспортной зоне (28,17 мг/кг), наименьшее в рекреационной зоне в месте наблюдения Комсомольский район, Парк культуры и отдыха (0,79 мг/кг). Последовательность функциональных зон содержания меди в порядке уменьшения: промышленная зона (2,25) > автотранспортная зона (2,07) > жилая зона (1,28) > рекреационная зона (0,38).

Превышение содержания свинца выше установленного значения ОДК выявлено в промышленной зоне в двух мониторинговых точках: Центральный район, ул. Новозаводская, 8А (95,45 мг/кг, превышение ОДК в 3 раза) и Комсомольский район, микрорайон Шлюзовой, ул. Энергетиков, 23 (36,94 мг/кг, превышение ОДК в 1,15 раз). Наименьшая концентрация была определена в жилой зоне в месте отбора пробы Центральный район, ул. Голосова, 75 (1,54 мг/кг). Накопление свинца в почвах города находится в следующей уменьшающейся последовательности: промышленная зона (12,25) > жилая зона (2,91) > автотранспортная зона (2,74) > рекреационная зона (0,78).

Концентрации цинка, превышающие ОДК выявлены в жилой зоне в месте наблюдения Центральный район ул. Советская, 87 (57,45 мг/кг превышение ОДК в 1,05 раз) и промышленной зоне в месте наблюдения Автозаводской район, АО «АвтоВАЗ» КПП №61 (75,70 мг/кг, превышение ОДК в 1,38 раз). Наименьше содержание отмечено в жилой зоне в месте наблюдения Центральный район, ул. Голосова, 75 (10,62 мг/кг). Накопление цинка в функциональных зонах находится в следующей уменьшающейся последовательности: промышленная зона (3,03) > жилая зона (1,91) > автотранспортная зона (1,59) > рекреационная зона (0,63).

Расчеты суммарного индекса загрязнения (Z_c) на основе коэффициентов концентрации свидетельствуют о том, что во всех изучаемых районах уровень загрязнения почв тяжелыми металлами находится в пределах допустимых значений ($Z_c=4,49$).

Выводы. Проведенные исследования выявили, что содержание тяжелых металлов в почвенных пробах, отобранных в различных районах города, варьируется. Это свидетельствует о неодинаковой степени антропогенной нагрузки в мониторинговых точках отбора проб. Наибольшие значения суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами определены для точек отбора в непосредственной близости от основных промышленных объектов: химических предприятий, машиностроительного предприятия и ТЭЦ. Лабораторные исследования установили, что в исследуемых образцах содержание свинца и цинка превышает установленные нормативы ОДК. Согласно литературным данным [27] именно данные элементы обладают наибольшей миграционной способностью.

В целом, почвы города Тольятти характеризуются относительно невысоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами. Это может быть связано с климатическими особенностями региона [1], расположение промышленных предприятий на северо-востоке от жилых кварталов минимизирует перенос загрязнений благодаря

особенностям ветрового режима – в холодную часть года преобладают ветры юго-западного и южного, в теплую – северного, западного и юго-западного направлений. [16]. Также низкое содержание тяжелых металлов в почвенном покрове города обусловлено природными особенностями города, значительная часть территорий города занята зелеными насаждениями различного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами / В.А. Большаков, Н.Я. Гальпер, Г.А. Клименко и др. – М.: ВНИИИиТЭИсельхоз, 1978. – 54 с.
2. Экологический атлас г. Тольятти / Горелик Д.О., Ишанин Г.Г., Конопленко Л.А. и др. // Мониторинг. – 1996. – Т. 9. – С. 2-7.
3. Добровольский Г. В. Экология почв. Учение об экологических функциях почв: учебник / Г. В. Добровольский, Е. Д. Никитин. – 2-е изд. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2012. – 412 с. – ISBN 978-5-211-06211-5.
4. Ступин Д. Ю. Загрязнение почв и технологии их восстановления / Д. Ю. Ступин. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 432 с. – ISBN 978-5-507-47269-7.
5. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in anthropogenically-affected soils of Sudan: A systematic review and meta-analysis / Magboul M.S. Siddig, Stephen B. Asabere, Abdullah S. Al-Farraj, et al. // Journal of Hazardous Materials Advances. – 2025. – P. 100601.
6. Козыренко М. И. Подходы к оценке рисков в связи с загрязнением почв на урбанизированных территориях (на основе зарубежного опыта) / М. И. Козыренко, Т. И. Кухарчик // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 22-35.
7. A general methodological framework for predicting and assessing heavy metal pollution in paddy soils using machine learning models / U. Jugnee et al. // Heliyon. – 2025. – Vol. 11. – No 4. – P. e42619.
8. Анализ и оценка уровня загрязнения почвенного покрова промышленных зон / М. В. Кравцова, Д. А. Волков, С. В. Афанасьев и др. // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 9. – С. 62-66.
9. Обущенко С. В. Мониторинг содержания микроэлементов и тяжёлых металлов в почвах Самарской области / С. В. Обущенко, В. В. Гнеденко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 7. – С. 30-34.
10. Оценка защитного потенциала почвенного покрова Московской области к загрязнению тяжелыми металлами и металлоидами / И.О. Алябина, О.В. Чернова, В.А. Кириллова и др. // Материалы Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС. – Москва: Москва, 2021. – С. 987.
11. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents / Heike B. Bradl // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – V. 277, No 1. – P. 1-18.
12. Bruemmer G.W. Heavy metal species, mobility and availability in soils / G.W. Bruemmer, J. Gerth, U. Herms // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. – 1986. – Bd 149. – No 4. – P. 382-398.
13. Hulisz P. Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Torun and Zielona Gora / P. Hulisz, P. Charzynski, A. Greinert // Journal of soils and sediments. – 2018. – Vol. 18. – P. 358-372.
14. Особенности мониторинга атмосферного воздуха крупных городов с развитой промышленностью / П.А. Мельников, Д.М. Гусев, К.В. Селезнева, В.А. Шашенко // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 32-37.
15. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Самарской области в 2023 году. Экологическая безопасность и устойчивое развитие Самарской области. – Самара, 2023.
16. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Самарской области в 2024 году. Экологическая безопасность и устойчивое развитие Самарской области. – Самара, 2024.
17. Сабр С. Содержание тяжелых металлов в почвах г. Ислаха (Ирак) / С. Сабр, Е.П. Проценко // Здоровые почвы – гарант устойчивого развития. – 2022. – С. 32-33.
18. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах и растениях в условиях антропогенного загрязнения городской среды / Петухов А. С. и др. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2022. – № 3. – С. 53-66.
19. Сайдяшева Г. В. Результаты мониторинга содержания тяжелых металлов в почве, растениях и снежном покрове вблизи автомобильных трасс на различном удалении от города Ульяновска / Г. В. Сайдяшева, С. А. Захаров // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17, № 4. – С. 68.

20. Седых В. А. Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове города Липецка / В. А. Седых // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2022. – № 4. – С. 126-130.
21. Современное содержание меди в почвенном покрове урбанизированных территорий Северного Прикаспия / А.В. Синцов, А.Н. Бармин, А.Ю. Васильев, Н.В. Синцова // Геология, география и глобальная энергия. – 2025. – № 1. – С. 5-59.
22. Харина Г. В. Проблема техногенного загрязнения почв в городе Екатеринбурге тяжелыми металлами / Г. В. Харина, Л. В. Алешина, М. С. Топорищев // Редакционная коллегия. – 2024. – С. 179.
23. Чугай Н. В. Оценка загрязнения урбанизированных почв тяжелыми металлами на территории г. Владимира / Н. В. Чугай, И. Н. Курочкин, Е. Ю. Кулагина // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 67-71.
24. Шаяхметов С. Ф. Анализ распределения и накопления подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка в почвах урбанизированной территории г. Свирска (Иркутская область) / С. Ф. Шаяхметов, А. В. Меринов, О. М. Журба // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 9. – С. 56-60.
25. Красновидова М. Е. Оценка содержания тяжелых металлов в почве / М. Е. Красновидова // Шаг в науку: сборник статей по материалам VII научно-практической конференции молодых ученых (V Всероссийской), Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Медиагруппа «ХАСК», 2024. – С. 151-155.
26. Сан-ПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
27. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1995. – С. 336.

Поступила в редакцию 30.07.2025 г.

ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION IN SOILS OF TOGLIATTI CITY

M. A. Bogdanova, S. A. Sokov

The results of a study on the soil cover in various functional zones of the Tolyatti city district are presented. The total content of cadmium, cobalt, manganese, copper, lead, and zinc was determined using atomic absorption spectrometry. Lead content exceeding the established MAC value was detected in the city's studied soils. Specifically, in the industrial zone, lead levels were found to be 1,15 times and 3 times higher than the MAC at two monitoring points. Zinc concentrations exceeding the MAC were detected in the residential zone (1,05 times higher than MAC) and in the industrial zone (1,38 times higher than MAC). The calculation of the total contamination index showed that the city's soils can be classified under the 'permissible' pollution category.

Keywords: soil; heavy metals; total content of heavy metals; atomic absorption method.

Богданова Мария Александровна

аспирант кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение»; ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, Россия.
E-mail: Riabova0705@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-7976-3662
AuthorID: 1302591

Bogdanova Maria Aleksandrovna

Postgraduate student at the Department of Chemical Technology and Resource Conservation,
Togliatti State University, Togliatti, Russia.

Соков Сергей Александрович

кандидат химических наук, доцент;
заведующий кафедрой «Химическая технология и ресурсосбережение», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, Россия.
E-mail: S.A.Sokov.tltsu@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0639-0455
AuthorID: 921220

Sokov Sergey Alexandrovich

Candidate of Chemical Sciences, Docent;
Head of the Department of Chemical Technology and Resource Conservation,
Togliatti State University, Tolyatti, Russia

СПИСОК ВИДОВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ БАССЕЙНА РЕКИ АРГУН ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2025. Э. Ш. Дудагова, М. А.-М., Астамирова, М. А. Тайсумов, Р. С. Магомадова

В статье впервые приводится обширный список (около 318 видов лекарственных растений бассейна реки Аргун, используемых в официальной и народной медицине и занесённых в Красную книгу Чеченской республики и Красную книгу Российской Федерации. Выявлены виды, широко применяемые в народной и официальной медицине, а также перспективные для хозяйственного использования в промышленных масштабах. Отмечены виды, подлежащие региональной охране. Среди лекарственных растений исследуемой территории имеются эндемики различного ранга, связанные происхождением из Кавказа и имеющие большей частью ограниченное распространение.

Ключевые слова: флора, виды, лекарственные, краснокнижные растения, бассейн реки Аргун

Введение. К важнейшим составляющим природной флоры относятся лекарственные растения. Несмотря на широкое внедрение в медицинской практике синтетических лекарственных средств, препараты на основе растительного сырья составляют около 40 % производимой продукции, около половины из них изготавливаются из сырья естественной флоры [1]. Попытки инвентаризации лекарственных растений флоры республики предпринимались ещё во второй половине XX века. В книге «Лекарственные растения Чечено-Ингушской АССР» [2] приводятся сведения о 77 лекарственных видах, включая культивируемые и др. Несколько позже вышло в свет издание «Лекарственные растения Чечено-Ингушетии» [3]. Наиболее полный список лекарственных растений приведён в работе «Флора Чеченской республики и её анализ» [4], где содержатся сведения о 395 дикорастущих лекарственных видах.

Одной из важнейших проблем современности является изучение и сохранение биоразнообразия в целом и фиторазнообразия в частности. На Северном Кавказе в последнее время решению этой проблемы посвящены многие исследования. Проведена инвентаризация флоры Чечни и Российского Кавказа [5–17].

Целью исследования являлось составление списка лекарственных видов растений бассейна реки Аргун.

Методы исследования. Объектом исследования являются виды лекарственных растений бассейна реки Аргун Чеченской Республики. Исследования проводились традиционным маршрутным методом, а наиболее интересные участки исследовались детально и составлялись их флористические списки. Основным способом фиксации информации явились гербарные сборы. Кроме того, использовались гербарные коллекции Чеченского государственного педагогического университета, КНИИ РАН, Академии наук Чеченской Республики. При составлении систематического списка приняты во внимание сведения из «Флора СССР» [18], «Флора Кавказа» [19], «Флора Северного Кавказа» [20], «Конспект флоры Чеченской Республики» [21], а также некоторых коллективных монографий по отдельным таксонам [22, 23]. В ходе экспедиционных исследований помимо гербарных сборов велись наблюдения по фенологии, типам местообитаний, изучалась фитоценотическая роль и экологическая приуроченность видов.

Анализ результатов. По нашим данным флора бассейна реки Аргун насчитывает 1 885 видов, что составляет 80,52 % от всей флоры Чеченской Республики, включающей 2 341 видов [21]. В составе флоры исследуемой территории 318 лекарственных растений, что составляет 16,87 % от всей флоры бассейна реки Аргун.

Ниже приводится список лекарственных видов растения бассейна реки Аргун.

Условные обозначения: + – официальные виды; ⊕ – фармакопейные виды; ♦ – виды, занесённые в Красную книгу Чеченской республики [22] и Красную книгу Российской Федерации [23]

⊕*Achillea millefolium* L., *Acroptilon repens* (L.) DC., *Adonis aestivalis* L., *Agrimonieupatoria* L., *Agrostemma githago* L., *Ajuga chia* Schreb., *Ajuga genevensis* L., *Alismaplantago-aquatica* L., *Alliaria petiolata* (M. Bieb.) Cavara & Grande, +*Allium ursinum* L., +♦*Allium victorialis* L., ⊕*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., ⊕*A. incana* (L.) Moench, ⊕*Althaea armeniaca* Ten., *Amorpha hybrida* L., *A. repens* L., +♦*Anacamptis pyramidalis* (L.) Rich., *Anagallis arvensis* L., *Anthyllis macrocephala* Wender., +*Arctium lappa* L., +*Arctium palladinii* (Marcow.) R.E.Fr. & Soderb., +*Arctostaphylos caucasica*, Lipsch., +*Aristolochia clematitis* L., +*Armeniaca vulgaris* Lam., ⊕*Artemisia absinthium* L., *A. annua* L., *A. vulgaris* L., *Arum orientale* M. Bieb., +♦*Asarum ibericum* (C.A. Mey.) Grossh., +*Asparagus officinalis* L., *Asperula odorata* (L.) Scop., *Asplenium trichomanes* L., *Astragalus glycyphyllos* L., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, ⊕*Atropa caucasica* Kreyer, *Ballota nigra* L., +*Berberis vulgaris* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Betonica perauca* L., ⊕*Betula pendula* Roth., ⊕*Bidens tripartita* L., ⊕*Bistorta carnea* (K. Koch) Kom., +*Brassica juncea* (L.) Czern., +*Bryonia alba* L., *Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst., *Calystegia sepium* (L.) R. Br., ⊕*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Cardaria draba* (L.) Desv., *Carduus nutans* L., ⊕*Carum carvi* L., ⊕*Centaurea cyanus* L., ⊕*Centaureum minus* Moench (*C. littorale* (D. Turner) Gilmour, *C. erythraea* Rafin, *C. umbellatum* Gilib.), *Chamenerion angustifolium* (L.) Scop., ⊕*Chelidonium majus* L., *Chenopodium botrys* L., *Chenopodium album* L., *Chondrilla juncea* L., *Cichorium inthybus* L., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *C. vulgare* (Savi) Ten., *Clinopodium vulgare* L., *Coeloglossum viride* (L.) C. Hartm., +♦*Colchicum speciosum* Steven, +*Conium maculatum* L., ⊕*Convallaria transcaucasica* Utkin ex Grossh., *Convolvulus arvensis* L., *C. lineatus* L., *Conyza canadensis*, *Cornus mas* L., *Corylus avellana* L., +*Cotinus coggygia* Scop., ⊕*Crataegus curvisepala* Gand., ⊕*Cr. monogyna* Jacq., ⊕*Cr. pentagyna* Waldst. et Kit., *Crinitaria villosa* (L.) Grossh., *Cuscuta europaea* L., +*Cichorium inthybus* L., +*Cydonia oblonga* Mill., *Cynodon dactylon* (L.) Pers., +*Cynoglossum officinale* L., ♦*Dactylorhiza euxina* (Nevski) Czer. (*D. caucasica* (Klinge) Soo), +♦*D. incarnata* (L.) Soo (*Orchis latifolia* L.), +♦*D. salina* (Turcz. ex Lindl.) Soo, +♦*D. urvilleana* (Steud.) H. Baumann & Künkele, ♦*Daphne mezereum* L., ⊕*Datura stramonium* L., *Daucus carota* L., *Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl, *Dianthus armeria* L., *Dictamnus caucasicus* (Fisch. & C.A. Mey.) Grossh., *Draba nemorosa* L., +♦*Drosera rotundifolia* L., +*Dryopteris assimilis* S. Walker, +*D. filix-mas* (L.) Schott, +*Echinops sphaerocephalus* L., *Echium vulgare* L., +*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski, +♦*Ephedra procera* Fisch. & C.A. Mey., ⊕*Equisetum arvense* L., *Erigeron acris* ssp. Botschantzevii Greuter, *Erodium cicutarium* (L.) L.Her., *Eryngium campestre* L., *E. planum* L., *Euonymus europaea* L., *Eupatorium cannabinum* L., +*Fagus orientalis* Lipsky, *Falcaria vulgaris* Bernh., *Fallopia convolvulus* (L.) A. Löve, *Ficaria valthifolia* Rchb., *Filago arvensis* L., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *F. vulgaris* Moench, +*Fragaria vesca* L., +*F. viridis* Weston, ⊕*Frangula alnus* Mill., *Fumaria vaillantii* Loisel., *Gagea lutea* (L.) Ker.-Gawl.,

♦*Galanthus angustifolius* G.Koss., ♦*Galanthus caucasicus* (Baker) Grossh, *Galium aparine* L., *G. verum* L., ♦*Gentiana cruciata* L., ♦*G. schistocalyx* (K. Koch) K. Koch, *Geranium robertianum* L., *G. sanguineum* L., *Geum urbanum* L., ♦*Grossularia reclinata* (L.) Mill., ♦*Gymnadenia conopsea* (L.) R. Br., ♦*Gypsophila paniculata* L., ♦♦*Helleborus caucasicus* A. Braun, *Heracleum sibiricum* L., ♦*Herniaria hirsuta* L., *Hieracium pilosella* L., ♦♦*Hippophaë rhamnoides* L., ♦*Humulus lupulus* L., ♦*Huperzia selago* (L.) Bernh. ex Schrank & Mart., *Hylotelephium caucasicum* (Grossh.) H. Ohba, ⊕*Hyoscyamus niger* L., ⊕*Hypericum perforatum* L., *Inula britannica* L., ⊕*I. helenium* L., ♦★*Juniperus oblonga* M. Bieb., ♦*J. sabina* L., *Knautia arvensis* (L.) Coult., *Kohlrauschia prolifera* (L.) P.W. Ball & Heywood, *Lactuca serriola* L., ♦*Lamium album* L., *L. amplexicaule* L., *Lapsana communis* L., ♦*Lathyrus pratensis* L., *L. sylvestris* L., *Lavatera thuringiaca* L., *Lemna minor* L., ⊕*Leonurus quinquelobatus* GILIB., *Lepidium latifolium* L., *L. ruderales* L., ♦*Lepidotheca suaveolens* (Purch) Nutt. (*Matricaria suaveolens* (Pursh) Buschenau; *M. discoidea* DC.; *Chamomilla discoidea* (DC.) J. Gay ex A. Br.), *Leucanthemum vulgare* Lam., *Libanotis transcaucasica* Schischk., *Ligustrum vulgare* L., ♦*Linaria vulgaris* Mill., *Lithospermum officinale* L., *Lonicera caprifolium* L., *Lythrum salicaria* L., ♦*Malus orientalis* Uglitzk., ♦*Malva sylvestris* L., *Marrubium vulgare* L., ⊕*Matricaria recutita* L., *Medicago sativa* Lam., *Melandrium album* (Mill.) Garcke, *Melilotis albus* Medik., ♦*M. officinalis* (L.) Pall., ♦*Mentha aquatica* L., *M. arvensis* L., *M. caucasica* Gand. (*M. longifolia* (L.) Huds.), *Mespilus germanica* L., *Neottia nidus-avis* (L.) Rich., ♦♦ *Neottia ustulata* (L.) R.M. Bateman, Pridgeon et M.W. Chase, *Nepeta cataria* L., *Neslia paniculata* (L.) Desv., ⊕*Ononis arvensis* L., ♦*Onopordum acanthium* L., ♦♦*Orchis coriophora* L., ♦♦*O. mascula* (L.) L., ♦♦*O. militaris* L., ♦♦*O. picta* Loisel. (*O. morio* L. subsp. *picta* (Loisel.) K. Richt.), ♦♦*O. purpurea* Huds., ♦♦*O. simia* Lam., ♦♦*O. tridentata* Scop., ⊕*Origanum vulgare* L., ⊕*Padus avium* Mill., ♦*Paeonia tenuifolia* L., *Paliurus spina-christi* Mill., *Papaver rhoeas* L., *Paris quadrifolia* L., *Parnassia palustris* L., ♦♦ *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O.Schwarz (*Dasiphora fruticosa* (L.) Rydb., *Potentilla fruticosa* L.), ⊕*Persicaria hydropiper* (L.) Delarbre, ⊕*Persicaria maculata* Gray., *Petasites hybridus* (L.) G.Gaertn., B.Mey. & Scherb., *Phlomis pungens* Willd., *Phlomis tuberosa* (L.) Moench, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Phyllitis scolopendrium* (L.) Newman, *Physalis alkekengi* L., *Pimpinella saxifraga* L., ♦*Pinus sosnowskyi* Nakai, *Plantago lanceolata* L., ⊕*Plantago major* L., *P. media* L., ♦*Platanthera bifolia* (L.) Rich., ♦*P. chlorantha* (Custer) Rchb., ⊕*Polemonium caucasicum* N. Busch, *Polygala anatolica* Boiss. et Heldr., ⊕*Polygonum aviculare* L., *Polypodium vulgare* L., *Populus nigra* L., *P. tremula* L., *Portulaca oleracea* L., *Potentilla argentea* L., ♦*Potentilla erecta* (L.) Raeusch., *P. reptans* L., ♦*Primula macrocalyx* Bunge, *Prunella vulgaris* L., *Prunus divaricata* Ledeb., *P. spinosa* L., *Ptarmica biserrata* (M. Bieb.) DC., *Ptarmica ptarmicifolia* (Willd.) Galushko, *Pyrethrum parthenifolium* Willd., *Pyrola rotundifolia* L., ⊕*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., ⊕*Q. robur* L., *Ranunculus repens* L., *Reseda lutea* L., ⊕*Rhamnus cathartica* L., ♦*Rhodococcum vitis-idaea* L., ♦*Rhododendron caucasicum* Pall., *Rosa balsamina* Bess. (*R. klukii* Bess.), *R. boissieri* Crep., ⊕*R. canina* L., *R. dumalis* Beshst. (*R. afzeliana* Fries), *R. iberica* Stev. ex Bieb., *R. mollis* Smith, ♦*R. oxyodon* Boiss., ♦*Rubus idaeus* L., *R. caesius* L., *R. hirtus* Waldst. et Kit., ♦*R. saxatilis* L., ♦*Rumex acetosa* L., ♦*R. alpinus* L., *R. acetoselloides* Balansa, ♦*R. confertus* Willd., *R. crispus* L., *R. obtusifolius* L., *Salix alba* L., *S. caprea* L., *Salvia aethiops* L., *S. glutinosa* L., *S. verticillata* L., *Sambucus ebulus* L., ⊕*S. nigra* L., *Sanicula europaea* L., ♦*Saponaria officinalis* L., *Scrophularia nodosa* L., ♦*Securigera varia*

(L.) Lassen, *Sedum oppositifolium* Sims, *Senecio vulgaris* L., *Sp. Pl.*, *Serratula coronata* L., *Sinapis arvensis* L., *Sisymbrium officinale* (L.) Scop., *Solanum nigrum* L., *S. pseudopersicum* Pojark., *Solidago virgaurea* L., *Sonchus oleraceus* L., ⊕*Sorbus aucuparia* L., ⊕*Stachys sylvatica* L., *Stellaria graminea* L., *S. media* (L.) Vill., ♦*Stipa pennata* L., *Tamarix ramosissima* Ledeb., ⊕*Tamus communis* (L.) Caddick & Wilkin Murr., ⊕*Taraxacum officinale* F.H.Wigg., *Teucrium chamaedrys* L., *T. polium* L., *Thalictrum flavum* L., ⊕*Th. foetidum* L., ⊕*Th. minus* L., ⊕*Thymus marschallianus* Willd., ⊕*Tilia caucasica* Rupr., ⊕*T. cordata* Mill., ⊕*T. platyphyllos* Scop., ♦*Traunsteinera sphaerica* (M. Bieb.) Schltr., *Trifolium medium* L., *T. pratense* L., *Tripolium vulgare* Nees, *Trommsdorffia maculata* (L.) Bernh., *Turritis glabra* L., ⊕*Tussilago farfara* L., *Ulmus minor* MILL., ⊕*Urtica dioica* L., *U. urens* L., ⊕*Vaccinium myrtillus* L., ⊕♦*Valeriana officinalis* L. (*V. grossheimii* Worosch.), ⊕*Verathrum lobelianum* Bernh., ⊕*Verbascum phlomoides* L., *Verbena officinalis* L., *Veronica anagallis-aquatica* L., *V. beccabunga* L., *V. chamaedrys* L., *V. officinalis* L., ⊕*Viburnum opulus* L., ⊕*Viola arvensis* V. *canina* L., *V. odorata* L., ⊕*Viscum album* L., *Xanthium spinosum* L., *X. strumarium* L., *Xeranthemum annuum* L.

Среди перечисленных выше видов имеются растения различного целебного назначения. Перечислены виды, обладающие специфичным или комплексным лечебным воздействием на организм человека: *Leonurus quinquelobatus*, *Valeriana officinalis*, *V. cardamines*, *Viscum album*, виды рода *Thalictrum* – как виды, содержащие сырьё сердечно-сосудистых профиля назначения. *Capsella bursa-pastoris*, *Equisetum arvense*, *Lamium album*, *Sanguisorba officinalis*, *Achillea millefolium* – кровоостанавливающие. *Viburnum opulus*, *Prunella vulgaris*, *Descurainia sophia*, *Juniperus oblonga*, *Pinus kochiana*, *Vaccinium vitis-idaea* – мочегонные; *Urtica dioica*, *Tanacetum vulgare* *Antennaria caucasica* и виды родов *Taraxacum* и *Rosa* – желчегонные. *Ajuga genevensis*, *Mentha longifolia*, *Origanum vulgare*, *Primula macracalyx*, *Pinus kochiana*, *Juniperus oblonga* – отхаркивающие. *Matteuccia struthiopteris*, *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Agrimonia eupatoria*, *Daucus carota* – глистогонные. *Frangula alnus*, *Rhamnus cathartica*, *Convolvulus arvensis*, *Rumex crispus*, *Polygonum carneum*, *Sanguisorba officinalis*, *Plantago major*, *Hypericum perforatum*, виды родов *Quercus* и *Alnus* – укрепляющие и вяжущие. *Plantago major*, *Mentha longifolia*, *Hypericum perforatum*, *Potentilla erecta*, *Sanguisorba officinalis* – антисептические антибактериальные. *Achillea millefolium*, *Artemisia annua*, *Melilotus officinalis*, *Urtica dioica*, *Plantago major*, *P. lanceolata* – ранозаживляющие. Большим содержанием витаминов отличаются следующие растения: витамин «С» – виды рода *Rosa*, *Berberis vulgaris*, *Origanum vulgare*, *Viburnum opulus* и др.; витамин «А» – *Achillea millefolium*, *Chenopodium album*, *Betula pendula*, *Artemisia vulgaris*, *Berberis vulgaris* и др.

Таким образом, в исследуемой флоре примерно 318 видов лекарственных растений, которые могут находить практическое применение в народной или официальной медицинской практике.

Следует отметить, что часть видов лекарственных растений бассейна реки Аргун являются охраняемыми, занесёнными в федеральную и региональную Красные книги.

Заключение. В работе приведен список (около 318 видов), лекарственных растений, используемых в официальной и народной медицине. Среди них растения различного целебного назначения. Перечислены виды специфичным или комплексным лечебным воздействием на организм человека.

На исследуемой территории охране подлежит 132 вида, из которых 116 видов занесены в Красные книги федерального и регионального уровней, 16 видов предлагается к охране. Число уязвимых видов в локальных флорах бассейна реки Аргун возрастает

вдоль высотного градиента и снижается по мере усиления антропогенной нагрузки. Более половины территории находится в системе ООПТ – два заказника республиканского значения и один – федерального.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас ареалов и ресурсов лекарственных растений СССР / Под ред. П.С. Чикова. – М., 1980. – 340 с.
2. Алексеев Б.Д. Лекарственные растения Чечено-Ингушской АССР / Б.Д. Алексеев, Н.А. Мальцева. – Грозный: Чечено-Ингушское книжное изд-во, 1960. – 88 с.
3. Соколов П.П. Лекарственные растения Чечено-Ингушетии / П.П. Соколов, Е.С. Осканова, В.М. Прима. – Грозный: Чечено-Ингушское кн. изд-во, 1982. – 160 с.
4. Омархаджиева Ф.С. Флора Чеченской Республики и ее анализ: автореф. дис... канд. биол. наук: 03.02.01 / Омархаджиева Фатима Сагудиновна. – Астрахань, 2011. – 28 с
5. Тайсумов М.А. Анализ флоры бассейна реки Аргун: Восточный Кавказ, цветковые растения / М.А. Тайсумов, Э.Ш. Дудагова, М.А.-М. Астамирова. – Грозный: Алеф, 2023. – 240 с.
6. Тайсумов М.А. Охрана и использование генофонда флоры бассейна реки Аргун / М.А. Тайсумов, М.А.-М. Астамирова, Э.Ш. Дудагова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 842-852.
7. Распределение видов растений по флористическим районам бассейна реки Аргун / Э.Ш. Дудагова, М.А. Тайсумов, М.А.-М. Астамирова, Э.Р. Байбатырова // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2024. – № 3. – С. 4-13.
8. Анализ распределения видов флоры по высотным поясам бассейна реки Аргун / Э.Ш. Дудагова, М.А.-М. Астамирова, М.А. Тайсумов, Э.Р. Байбатырова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 630-641.
9. Охраняемые и нуждающиеся в охране лесные виды растений восточной части Российского Кавказа / Э.Р. Байбатырова, М.А. Тайсумов, М.А. Астамирова и др. // Экосистемы. – 2024. – № 37. – С. 154-160.
10. Реликты бассейна реки Аргун / М.А. Тайсумов, М.А.-М. Астамирова, Э.Ш. Дудагова // Тезисы докладов XV Делегатского съезда Русского ботанического общества и конференции «Российская ботаника в меняющемся мире», посвященной 300-летию Российской академии наук. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 110-112.
11. Эколого ценотическая структура флоры бассейна реки Аргун / Э.Ш. Дудагова, М.А. Тайсумов, М.А.-М. Астамирова, Э.Р. Байбатырова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 1783-1793.
12. Флористическое районирование высокогорных ландшафтов Центрального и Северо-Восточного Кавказа / М.А.-М. Астамирова, М.А. Тайсумов, А.С. Абдурзакова и др. // Юг России: экология, развитие. – 2023. – Т. 18, № 1. – С. 46-53.
13. Ксерофильные реликты во флоре Северного Кавказа / М.А. Тайсумов, Р.С. Магомадова, М.У. Умаров и др. // Ботанический журнал. – 2019. – Т. 104, № 9. – С. 1446-1459.
14. Государственный реестр лекарственных средств [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://zdravmedinform.ru/grls.html>
15. Государственная фармакопея Российской Федерации. XIV издание, том IV. – М., 2018 – 1831 с.
16. Атлас лекарственных растений СССР / Под ред. А.И. Баныковского, П.К. Енина. – М.: Изд-во Медицинская литература, 1962. – 702 с.
17. Ареалы лекарственных и родственных им растений СССР. – 2-изд. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 224 с.
18. Флора СССР, 1934-1964, Т. I-XXX: Т. I. – Л., 1933. – 302 с.; Т. II. – Л., 1934. – 778 с.; Т. III. – Л., 1935. – 636 с.; Т. IV. – Л., 1935. – 760 с.; Т. V. – М.-Л., 1936. – 762 с.; Т. VI. – М.-Л., 1936. – 956 с.; Т. VII. – М.-Л., 1937. – 790 с.; Т. VIII. – М.-Л., 1939. – 692 с.; Т. IX. – М.-Л., 1939. – 546 с.; Т. X. – М.-Л., 1941. – 673 с.; Т. XI. – М.-Л., 1945. – 432 с.; Т. XII. – М.-Л., 1946. – 919 с.; Т. XIII. – М.-Л., 1948. – 588 с.; Т. XIV. – М.-Л., 1949. – 790 с.; Т. XV. – М.-Л., 1949. – 743 с.; Т. XVI. – М.-Л., 1950. – 648 с.; Т. XVII. – М.-Л., 1951. – 390 с.; Т. XVIII. – М.-Л., 1952. – 803 с.; Т. XIX. – М.-Л., 1953. – 753 с.; Т. XX. – М.-Л., 1954. – 556 с.; Т. XXI. – М.-Л., 1954. – 704 с.; Т. XXII. – М.-Л., 1955. – 862 с.; Т. XXIII. – М.-Л., 1958. – 776 с.; Т. XXIV. – М.-Л., 1957. – 502 с.; Т. XXV. – М.-Л., 1959. – 630 с.; Т. XXVI. – М.-Л., 1961. – 939 с.; Т. XXVII. – М.-Л., 1962. – 758 с.; Т. XXVIII. – М.-Л., 1963. – 654 с.; Т. XXIX. – М.-Л., 1964. – 798 с.; Т. XXX. – М.-Л., 1964. – 732 с.
19. Гроссгейм А.А. Флора Кавказа. 2-е изд. 1939-1967: Т. 1. – Баку: Изд-во Азерб. ФАН СССР, 1939. – 404 с.; Т. 2. – Баку: Изд-во Азерб. ФАН СССР, 1940. – 284 с.; Т. 3. – Баку: Изд-во Азерб. ФАН СССР, 1944. – 322 с.; Т. 4. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 314 с.; Т. 5. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1952. – 456 с.; Т. 6. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 424 с.; Т. 7. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1967. – 894 с.

20. Галушко А.И. Флора Северного Кавказа. Ростов н/Д: РГУ, 1978-1980: Т. 1, 1978. – 317 с.; Т. 2, 1980. – 350 с.; Т. 3, 1980. – 327 с.
21. Тайсумов М.А. Конспект флоры Чеченской Республики (сосудистые растения). – Махачкала: Издательство АЛЕФ, 2024. – 320 с.
22. Красная книга Чеченской Республики (второе издание) / Под ред. М.А. Тайсумова, А.С. Замотайлова. – Ростов-на-Дону: ООО «Южный издательский дом», 2020. – 480 с.
23. Красная книга Российской Федерации / Под ред. Р.В. Камелина и др. – М.: Изд-во КМК, 2008. – 855 с.

Поступила в редакцию 23.07.2025 г.

LIST OF MEDICINAL PLANTS OF THE ARGUN RIVER BASIN OF THE CECHEEN REPUBLIC

E. Sh. Dudagova, M. A.-M., Astamirova, M.A. Taisumov, R.S. Magomadova

The article provides for the first time a complete list of medicinal plant species of the Argun River basin used in folk and official medicine and species listed in the Red Book of the Chechen Republic and the Red Book of the Russian Federation. Species widely used in folk and official medicine, as well as promising for economic use on an industrial scale, are identified, in addition, species subject to regional protection are noted. Among the medicinal plants of the study area there are endemics of various ranks, associated with origin from the Caucasus and having mostly limited distribution.

Key words: flora, species, medicinal, red book plants, Argun River basin.

Дудагова Эльза Шарановна

старший преподаватель кафедры биологии и методики ее преподавания, Чеченский государственный педагогический университет, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: dudagova@mail.ru
ORCID: 0009-0008-1135-1881
AuthorID: 998462

Dudagova Elza Sharanovna

Senior Lecturer, Department of Biology and Methods of Teaching, Chechen State Pedagogical University. Grozny, Chechen Republic, Russian Federation.
E-mail: dudagova@mail.ru

Астамирова Маржан Абдул-Межидовна

доктор географических наук, профессор кафедры биологии и методики ее преподавания, Чеченский государственный педагогический университет, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: astamirova@bk.ru
ORCID: 0000-0003-2251-0696
AuthorID: 750924

Astamirova Marzhan Abdul-Mezhidovna

Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Biology and Methods of its Teaching at the Chechen State Pedagogical University, Grozny, Chechen Republic, Russian Federation.
E-mail: astamirova@bk.ru

Тайсумов Муса Анасович

доктор биологических наук, вице президент, Академия наук Чеченской Республики, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: musa_taisumov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5053-8816
AuthorID: 447622

Taisumov Musa Anasovich

Doctor of Biological Sciences, Vice President of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Chechen Republic, Russian Federation.
E-mail: musa_taisumov@mail.ru

Магомадова Раиса Сайпудиновна

Кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и методики ее преподавания, Чеченский государственный педагогический университет, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: r.s.magomadova@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6658-9354
AuthorID: 373117

Magomadova Raisa Saipudinovna

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Methods of Teaching it, Chechen State Pedagogical University. Grozny, Chechen Republic, Russian Federation.
E-mail: r.s.magomadova@mail.ru

БИОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ КРОВИ В ОСТРЫЕ ПЕРИОДЫ COVID-19 И ГРИППА А

© 2025. *М. Л. Золотавина, Е. А. Гайдабура, А. В. Братова,
О. Ю. Вековищева, О. В. Чернявская*

Недавние исследования показывают, что клиническая картина состояний COVID-19 и гриппа А, сопровождающихся пневмонией, выглядит схожей на начальном этапе, тогда как их терапия различна. Поэтому, перед началом лечения важно определить тип вирусного заболевания. Целью наблюдательного клинического поперечного исследования был поиск маркера среди стандартных биохимических показателей сыворотки крови, при известных значениях которого можно было бы различать состояния острого COVID-19 и гриппа А, сопровождающихся пневмонией.

Исследование проведено по результатам анализов крови пациентов, поступивших в больницы Краснодарского края (Россия) в течение 2020–2022 годов и соответствующих критериям включения. Включаемые в исследование пациенты в возрасте 35–65 лет имели подтвержденные состояния COVID-19 или гриппа А, сопровождающиеся пневмонией 3-ей степени, и не имели никаких хронических заболеваний. У этих пациентов оценивали концентрации ферритина, гемоглобина, сывороточного железа, и С-реактивного белка, а также - количество эритроцитов. В качестве положительного контроля были выбраны образцы крови пациентов без вирусных заболеваний.

Статистический анализ сравнительными и классификационными методами выявил, что состояния острого COVID-19 и гриппа А успешно различаются по концентрациям ферритина и С-реактивного белка.

Ключевые слова: поиск биомаркеров, ферритин, гемоглобин, сывороточное железо, С-реактивный белок, эритроциты, сыворотка крови, COVID-19, грипп А.

Введение. Клиническая картина развития вирусных инфекций, вызывающих пневмонию, зачастую сходна [1–3], тогда как определение природы такой инфекции важно для выбора правильной терапии. В отличие от других вирусных инфекций, заболевание COVID-19 (COVID-19), вызываемое вирусом SARS-CoV-2, имеет специфические клеточные механизмы, которые отличаются от таковых при гриппе А (Influenza A) [4–6]. Так, повреждение клеток при COVID-19 происходит вследствие цитопатического действия вируса и выраженного иммунного ответа, который до сих пор до конца не изучен [7–9]. Поэтому, нахождение биохимического маркера, который мог бы на ранних стадиях развития вирусного заболевания определить природу такого заболевания, видится актуальным. С этой целью были выбраны пять показателей крови, (ферритин (S-Fer), гемоглобин (Hb), сывороточное железо (SI), С-реактивный белок (CRP) и количество эритроцитов (ER)), которые наиболее специфичны для острого течения COVID-19 [10–12] и всегда контролируются в рамках повседневной клинической практики при подозрении на вирусную инфекцию. Эти показатели сравнивались между группами пациентов в состоянии острого COVID-19 или Influenza A, сопровождающихся пневмонией 3ей степени.

Материал и методы. Данное наблюдательное клиническое поперечное исследование проводилось по результатам анализа крови 45 пациентов с острым течением COVID-19 и 14 пациентов с гриппом А, имеющих осложнением пневмонию 3-ей степени в обоих случаях, при поступлении в отделения ГБУЗ НИИ-ККБ № 1 и ГБУЗ «Специализированная клиническая инфекционная больница» в 2020–2022 годах. Все пациенты соответствовали критериям включения: возраст – от 35 до 65 лет (в

соответствии с возрастным диапазоном наибольшей восприимчивости к COVID-19 по заключению ВОЗ [13–15]); данные компьютерной томографии подтверждали наличие пневмонии 3-ей степени на фоне острого COVID-19 или Influenza A; отсутствие хронических заболеваний, которые могли бы осложнить течение вирусных заболеваний; взятие крови происходило при поступлении в больницу до начала какой-либо терапии.

Данные по крови пациентов с подтвержденными диагнозами COVID-19 и Influenza A (экспериментальные группы), сравнивались с данными пациентов той же возрастной группы, также поступивших на лечение, но не имеющих инфекционных или хронических заболеваний (контрольная группа; CGr, n=34). Всего было исследовано 93 сыворотки крови.

Образцы крови пациентов были взяты в стандартной форме клинической практики. Лабораторный анализ проводился на анализаторах Sysmex-1000 (Sysmex Europe GmbH, Япония), Immulite-2000 (Siemens Healthcare Diagnostics Inc., США), Beckman Coulter AU480, и Beckman Coulter AU5800 (Beckman Coulter, Inc., США) с использованием оригинальных реагентов. Значения пяти выбранных показателей сыворотки крови, (ферритин (S-Fer), гемоглобин (Hb), сывороточное железо (SI), С-реактивный белок (CRP) и количество эритроцитов (ER)), были переданы (без расшифровки персональных данных пациента) в Кубанский Государственный Университет для анализа полученных данных.

Протокол исследования № 286 был одобрен Этическим комитетом Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова 25.03.2024.

Анализ данных проводился с использованием валидизированной статистической программы IBM SPSS Statistics v.26, дополненной расчетами Chi-Square теста с помощью программы WinPepi.

Линейные переменные (исходные значения концентраций сыворотки крови) проверялись на нормальность распределения с помощью теста Шапиро-Уилка (подходит для выборок в количестве менее 100 образцов), с целью выбора метода сравнения (параметрического или непараметрического) групповых данных. Согласно критерию Шапиро-Уилка $p < 0.05$, малочисленности выборки и самому показателю концентрации, был сделан вывод о ненормальном распределении данных и применении непараметрических методов сравнения.

Описательная статистика значений показателей сыворотки крови для каждой группы представлена в таблице 1, графическое представление – на рис. 1.

Линейные показатели групп COVID-19, Influenza A и CGr сравнивались с помощью непараметрического теста Краскела-Уоллиса (Kruskal-Wallis; KW), применяющийся для сравнения более, чем двух независимых групп. В случае сравнения только вирусных, COVID-19 и Influenza A, групп использовали Манн-Уитни (Mann-Whitney; MU) тест, применяющийся для сравнения двух независимых групп. Для отклонения нулевой гипотезы (группы не различаются) уровень ее достоверности составлял менее 0.05. Если нулевая гипотеза отклонялась, то к последующим парным сравнениям применялась поправка Бонферрони для множественных сравнений (при сравнении более, чем двух групп).

Количественные значения показателей крови были также преобразованы в качественные (норма или не норма) в соответствии с референсными значениями показателей. Частота нереференсных значений сравнивалась между тремя группами (COVID-19, Influenza A и CGr) при помощи Хи-квадрат теста (Pearson Chi-Square test; χ^2), и

между двумя (COVID-19 и Influenza A) при помощи точного критерия Фишера (Fisher Exact test; F).

Для проверки линейной связи между показателями сыворотки крови и тем или иным вирусным заболеванием были построены бинарные логистические регрессии (LR) с использованием Forward Stepwise (Conditional) метода, основанного на пошаговом отборе значений концентраций сывороточных показателей и их референсных частот для того или иного дихотомического исхода: а) LR 1 для исхода COVID-19 или (Influenza A + CGr); б) LR2 для исхода Influenza A или (COVID-19+CGr); в) LR3 для исхода Influenza A или COVID-19 (в этом случае данные контрольной группы были исключены из анализа).

Для оценки возможности каждого показателя крови независимо определять состояние COVID-19 или Influenza A применялась бинарная классификация в виде ROC-кривой [16]. Площадь под кривой определяла качество классификации кривой. Ключевая точка показателя крови, выше или ниже которой значения показателя соответствуют уже другому состоянию, вычислялась по оптимальному соотношению максимальной чувствительности (правильно классифицированные случаи) и минимального значения (1 – специфичность (неправильно классифицированные случаи)) при хорошем качестве модели (площади под ROC-кривой более 0,7). Ключевая точка переключения считалась успешной, если уровни чувствительности и специфичности превышали 75, то есть изменение состояния при этом значении показателя крови будет справедливо для 75 % выборки.

Дискриминантный анализ (DA), еще один классификационный метод, применялся для понимания насколько совокупность этих показателей крови способствует автоматическому разделению всех наблюдений на три состояния (COVID-19, Influenza A и CGr). Анализ основан только на количественных показателях сыворотки крови. Для выявления значимых прогностических переменных, которые обеспечивают наилучшее разделение групп, был использован Stepwise метод. Графическое представление результатов DA представлено на рисунке 2.

Результаты исследования. Следуя цели исследования были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Описательная статистика значений показателей сыворотки крови

Группа исследования	Описание группы	Код группы	N	Статистический показатель	S-Fer (μмоль/л)	Hb (г/л)	SI (μмоль/л)	CRP (г/л)	ER (N*10 ⁹)
COVID-19	Острая фаза заболевания COVID-19 с пневмонией	1	45	Медиана [Q1;Q3]	814.5 [731.7; 902.4]	128.15 [124.4; 130.9]	27.10 [26.7; 27.3]	105.40 [73.4; 139.3]	4.50 [3.8; 5.0]
				не норма (N; %)	45; 100	3; 12.5	0; 0	45; 100	13; 28.9
				норма (N; %)	0; 0	21; 87.5	25; 100	0; 0	32; 71.1
Influenza A	Острая фаза заболевания грипп А с пневмонией	2	14	Медиана [Q1;Q3]	398.3 [338.3; 450.3]	128.85 [126.4; 131.1]	25.75 [25.2; 26.9]	22.75 [14.5; 28.6]	4.9 [4.6; 5.4]
				не норма (N; %)	12; 85.7	0; 0	0; 0	14; 100	0; 0
				норма (N; %)	2; 14.3	14; 100	14; 100	0; 0	14; 100
CGr	у пациентов не было никаких инфекционных заболеваний	3	34	M [Q1;Q3]	70.12 [60.3; 79.2]	145.6 [140.0; 150.87]	18.9 [17.7; 20.34]	3.6 [2.95; 4.3]	3.55 [3.34; 3.66]
				не норма (N; %)	0; 0	1; 2.9	0; 0	0; 0	34; 97.1
				норма (N; %)	35; 100	34; 97.1	35; 100	35; 100	1; 2.9
Референсные значения (норма)					20–250	120–170	12–31	0–5	4.0–5.6
Тест Шапиро-Уилка на нормальность распределения (p)					0.000	0.006	0.000	0.000	0.000

Примечание: N – количество образцов; статистическое описание данных представлено медианой (M) с квартилями 1 (Q1) и 3 (Q3); S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; норма – значение сывороточного показателя находится в диапазоне референсных значений; не норма – значение сывороточного показателя находится вне диапазона референсных значений.

Нелинейный характер распределения значений показателей крови представлен на рис. 1.

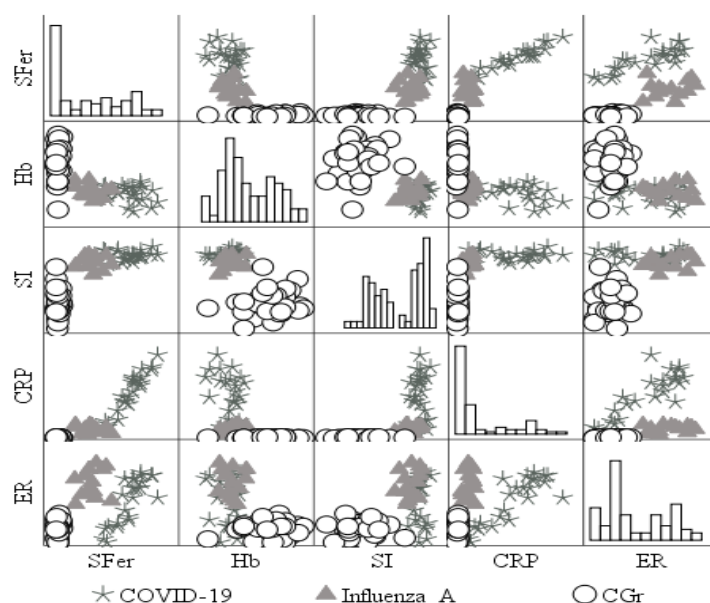


Рис. 1. Графическое представление распределения значений показателей крови для исследуемых состояний, COVID-19, Influenza A и CGr. Составлен авторами.

Примечание: S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты

Сравнение значений сывороточных показателей крови представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов исследования крови между экспериментальными группами с использованием непараметрических тестов KW и MU

Показатель крови	Результаты сравнения CGr, Influenza A и COVID-19 групп				Результаты сравнения Influenza A и COVID-19 групп			
	N	KW	p	Попарные сравнения	N	MU	p	Попарные сравнения
S-Fer (μмоль/л)	94	77.15	<0.001	CGr < Influenza A (p=0.011) CGr < COVID-19 (p<0.001) Influenza A < COVID-19 (p=0.002)	59	7	<0.001	Influenza A < COVID-19
Hb (г/л)	73	45.71	<0.001	COVID-19 < CGr (p<0.001) Influenza A < CGr (p<0.001)	38	185	0.622	ns
SI (μмоль/л)	74	57.09	<0.001	Influenza > CGr A (p<0.000) COVID-19 > CGr (p<0.000)	39	68	<0.001	Influenza A < COVID-19
CRP (г/л)	94	76.62	<0.001	CGr < Influenza A (p=0.009) CGr < COVID-19 (p<0.000) Influenza A < COVID-19 (p=0.002)	59	14	<0.001	Influenza A < COVID-19
ER (N*10 ⁹)	94	47.54	<0.001	CGr < COVID-19 (p<0.000) CGr < Influenza A (p<0.000)	59	460	0.001	Influenza A > COVID-19

Примечание: KW – непараметрический тест Крускала-Уоллиса для сравнения более, чем 2 независимые группы; MU – непараметрический тест Манна-Уитни для сравнения 2-х независимых групп; p – p-значение результатов теста; N – количество; ns – незначимые различия, нулевая гипотеза не отвергается; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; “<” – меньше, чем; “>” – больше, чем. Составлена авторами

Все показатели сыворотки крови пациентов контрольной группы (CGr) отличались от показателей пациентов с COVID-19 или с гриппом A: у CGr концентрация Hb была выше, тогда как другие показатели были, наоборот, ниже.

Показатели крови группы COVID-19 отличались от группы Influenza A: концентрации S-Fer, SI, CRP были выше, а уровень ER – ниже у группы COVID-19. Но обе вирусные группы были схожи по уровню концентрации Hb. Различия между вирусными состояниями по «белкам острой фазы» S-Fer и CRP подтверждают наше представление о различиях в механизмах COVID-19 и Influenza A. Воспалительный процесс при COVID-19 обычно сопровождается повышением концентрации S-Fer, вызывающего «цитокиновый шторм», вследствие чего наблюдалось вторичное повышение S-Fer и изменение количества ER (сниженного по сравнению с состоянием Influenza A, но все же более высокого по сравнению с невирусным состоянием).

Сравнение количества контрольных значений приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение частоты нормы показателей крови между экспериментальными группами при помощи χ^2 или F тестов

Показатель крови	Сравнение частоты нормы между CGr, Influenza A и COVID-19 группами (χ^2 тест)				Сравнение частоты нормы между вирусными группами (Influenza A и COVID-19) (F тест)		
	N	χ^2	p (χ^2)	частота нормы	N	p (F)	частота нормы
S-Fer (μмоль/л)	94	86.818	<0.001	Influenza A < CGr (p<0.001) COVID-19 < CGr (p<0.001)	59	0.053	ns
Hb (г/л)	73	3.56	0.169	ns	38	0.283	ns
SI (μмоль/л)	74	нет			39	нет	
CRP (г/л)	94	94	< 0.001	Influenza A < CGr (p<0.001) COVID-19 < CGr (p<0.001)	59	нет	
ER (N*10 ⁹)	94	53.137	< 0.001	Influenza A < CGr (p<0.001) COVID-19 < CGr (p<0.001) Influenza A < COVID-19 (p=0.026)	59	0.026	Influenza A < COVID-19

Примечание: χ^2 – значение критерия Хи-квадрат; F – точный критерий Фишера; p – p-значение результатов теста; N – количество; ns – незначимые различия, нулевая гипотеза не отвергается; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; Not applicable – неприменимо, значение не имеет вариальности; “<” – меньше, чем; “>” – больше, чем. Составлена авторами

Уровень референсных значений S-Fer, СРБ и ER был выше в сыворотке крови пациентов контрольной группы в сравнении с результатами экспериментальных групп, инфицированных вирусом COVID-19 или гриппа А. Количество контрольных значений количества ER в группе больных COVID-19 было выше в сравнении с результатами группы больных с гриппом А (таблица 3), в то время как других различий между группами с вирусными заболеваниями обнаружено не было. Такой результат обоснован тем, что контрольная группа характеризовалась отсутствием у исследуемых воспалительных процессов, в то время как в экспериментальных группах отмечался ответ на воспаление, который запускался за счет пролиферации иммунных клеток, продуцирующих белки острой фазы – S-Fer и СРБ. Несмотря на то, что уровни концентрации показателей имели отличия, в обоих случаях наблюдалось повышение уровня белков острой фазы на фоне инфекционного заболевания.

Построение уравнения LR1 (COVID-19 vs (Influenza A+CGr)) было успешным на шаге 2 для 76 % когорты. Уравнение правильно классифицировало 82,6 % случаев COVID-19 и 85,7 % других случаев. Уравнение LR1 включило S-Fer_Norm, который снижал вероятность состояния COVID-19 с коэффициентом $B=-17,099$ ($p=0,026$), и ER, количество которых снижало вероятность состояния COVID-19 с коэффициентом $B=-1,665$ ($p=0,035$). Таким образом, если концентрация S-Fer имеет референсные значения и количество ER высоко, то состояние COVID-19 будет мало вероятно.

Построение уравнения LR2 было неудачным из-за того, что ни один сывороточный показатель не был значимым для того, чтобы отличить состояние Influenza A от объединенного состояния (COVID-19 + CGr).

Построение уравнения LR3 было успешным на шаге 1 для 86,3 % когорты. Уравнение правильно классифицировало 91,3 % случаев с состоянием COVID-19, и 85,7 % случаев Influenza A. Уравнение LR3 включало показатель S-Fer который увеличивал вероятность состояния COVID-19 с коэффициентом $B = 0,027$ ($p = 0,029$).

Результаты ROC-кривых для отдельных показателей сыворотки крови представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты построения ROC-кривой для каждого показателя сыворотки крови

Показатель	Исход	Грипп A (N)	COVID-19 (N)	Площадь ROC-кривой	p	Ключевая точка исхода	Чувствительность (%)	Специфичность (%)
S-Fer ($\mu\text{mol/l}$)	COVID-19	14	45	0.989	< 0.001	Influenza A < 552.1 < COVID-19	96	93
Hb (g/l)	Influenza A	14	24	0.551	0.607	ns		
SI ($\mu\text{mol/l}$)	COVID-19	14	25	0.806	0.002	Influenza A < 26.75 < COVID-19	72	71
CRP (g/l)	COVID-19	14	45	0.978	< 0.001	Influenza A < 31.90 < COVID-19	96	100
ER ($N \cdot 10^9$)	Influenza A	14	45	0.730	0.010	COVID-19 < 4.65 < Influenza A	71	58

Примечание: N – количество; ns – незначимые различия, нулевая гипотеза не отвергается; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; “<” – меньше чем. Составлена авторами

ROC-кривые были построены независимо для каждого показателя сыворотки крови. Все кривые, за исключением концентрации Hb, обладали высокой дихотомической классификацией состояний COVID-19 или Influenza A. Самую высокую классификационную силу (с высокой чувствительностью и специфичностью) имели показатели S-Fer и CRP. Концентрация Hb показала незначимую прогностическую способность для классификации состояний COVID-19 и Influenza A. Таким образом, именно маркеры острой фазы воспаления определяют состояния COVID-19 или Influenza A. И хотя изменение концентрации Hb отражает глубину течения заболевания и указывает на патологические изменения, связанные с деструктивным влиянием патогенов на кровяные клетки крови, эти изменения Hb оказываются вторичными и не ассоциированы со спецификой состояний COVID-19 и Influenza A.

Дискриминантный анализ (DA) позволил различить все три группы. Показатели S-Fer, CRP и количество ER были значимыми для разделения трех состояний, в то время как концентрации S-Fer и количество ER были значимыми для различения состояний COVID-19 и Influenza A (таблица 5; рис. 2).

Таблица 5

Результаты дискриминантного анализа для всех групп больных

Группы	Функции	Функция, действующая для части (%)	Значимость дискриминантной функции (p)	Показатели сыворотки и крови, значимые для успешной классификации	Коэффициенты значимых показателей в дискриминантной функции	Правильно классифицированные случаи (%)	Правильная классификация групповых случаев (%)
CGr COVID-19 Influenza A	Дискриминантная функция 1	98	<0.001	S-Fer	1.263	98.6	CGr: 100
				CRB	-0.582		
	Дискриминантная функция 2	89	<0.001	CRB	1.143		COVID-19: 100
				ER	-1.315		Influenza A: 92.9
COVID-19 Influenza A	Дискриминантная функция A	92	<0.001	S-Fer	1.352	98.3	COVID-19: 100
				ER	-1.103		Influenza A: 92.9

Примечание: p – p-уровень значимости модели; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; “<” – меньше, чем. Составлена авторами

Обобщенный результат выявил, что концентрации S-Fer и CRP, а также количество ER в крови были наиболее важными для определения состояния COVID-19 от состояния Influenza A (таблица 6).

Таблица 6

Сводные результаты различий биохимических показателей в группах исследования (по результатам всех статистических тестов)

Группы исследования	Статистические тесты	Биохимические показатели				
		S-Fe	Hb	SI	CRP	ER
CGr – COVID-19 – Influenza A	KW	+	–	–	+	–
COVID-19 – Influenza A	MU	+	–	+	+	+
CGr – COVID-19 – Influenza A	χ^2	–	–	–	–	+
COVID-19 – Influenza A	F	–	–	–	–	+
COVID-19 – (Influenza A + CGr)	LR1	+	–	–	–	+
Influenza A – (COVID-19 + CGr)	LR2	–	–	–	–	–
COVID-19 – Influenza A	LR3	+	–	–	–	–
COVID-19 – Influenza A	ROC-кривая	+	–	–	+	–
CGr – COVID-19 – Influenza A	DA_3группы	+	–	–	+	+
COVID-19 – Influenza A	DA_2группы	+	–	–	–	+

Примечание: “+/-” – показатель сыворотки крови является значимым маркером для различения двух, COVID-19 и Influenza A, или трех, CGr, COVID-19 и Influenza A, состояний; KW – непараметрический тест Крускала-Уоллиса; MU – непараметрический тест Манна-Уитни; χ^2 – критерий Хи-квадрат; F – Точный критерий Фишера; LR – Бинарная логистическая регрессия; DA – дискриминантный анализ. Составлена авторами

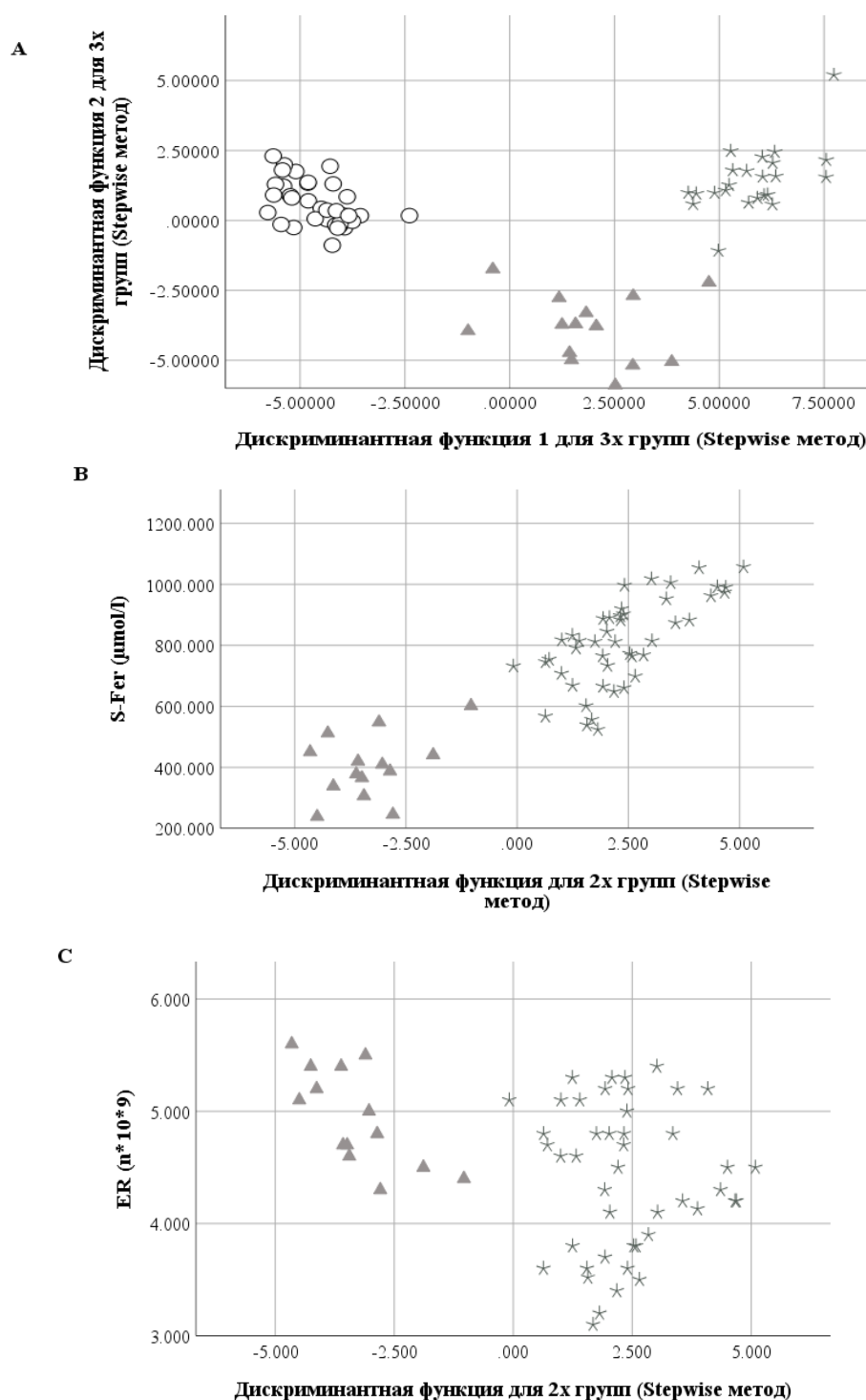


Рис. 2. Графическая иллюстрация ДА: А – распределение групповых случаев (CGr, COVID-19 и Influenza A) в координатах дискриминантных функций 1 и 2; В – распределение групповых случаев (COVID-19 и Influenza A) в координатах дискриминантной функции А и значений показателя S-Fe; С – распределение групповых случаев (COVID-19 и Influenza A) в координатах дискриминантной функции А и значений показателя ER; Составлен авторами.

Выводы. Показатель Hb оказался неспецифичным, чтобы отличать острые вирусные состояния, COVID-19 и грипп А, друг от друга, а также, чтобы отличать вирусные острые состояния от невирусного состояния контрольной группы.

Концентрации S-Fer и CRP, а также количество ER в крови были наиболее важными для определения острого состояния COVID-19 от состояния Influenza A.

Расчет точки переключения для показателей S-Fer и CRP (при построении ROC-кривых) может быть практически полезен для быстрого предположения о состоянии острого COVID-19 или гриппа А.

Ограничения. Это перекрестное исследование является пилотным из-за небольшого размера выборки. Кроме того, выборка ограничена одним регионом, что также снижает прогностическую ценность результатов. Значения найденных точек переключения на ROC-кривых, чтобы отличить состояние острого COVID-19 от гриппа А, должны быть проверены на других независимых выборках. Сравнение состояния острого COVID-19, только с гриппом А не позволяет авторам утверждать, что такие же различия будут обнаружены между COVID-19 и другими вирусными заболеваниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Similarities and Differences of Early Pulmonary CT Features of Pneumonia Caused by SARS-CoV-2, SARS-CoV and MERS-CoV: Comparison Based on a Systemic Review / X. Chen, G. Zhang, S. Hao et al. // Chinese Med. Sci. J. – 2020. – V. 35. – P. 254–261.
2. Постковидный синдром: мультисистемные «дефициты» / Н.Б. Амиров, Е.И. Давлетшина, А.Г. Васильева, Р.Г. Фатыхов // Вестн. Совр. Клин. Мед. – 2021. – № 14. – С. 82–94.
3. Гайдабура Е.А. Манифестный характер биохимических показателей, участвующих в метаболизме патологического процесса при COVID-19, с учетом тяжести поражения легких / Е.А. Гайдабура, М.Л. Золотавина, А.В. Братова // Современные проблемы науки и образования. – 2022. – № 5. – С. 110–115.
4. Clinical Features of Patients Infected with 2019 Novel Coronavirus in Wuhan. / C. Huang, Y. Wang, X. Li et al. // Lancet. – 2020. – V. 395. – P. 497–506.
5. Роль ферритина в оценке тяжести COVID-19 / Ю.С. Полушин, И.В. Шлык, Е.Г. Гаврилова и др. // Вестник анестезиологии и реаниматологии. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 20–28.
6. Brazilian COVID-19 Registry Investigators. Clinical characteristics and outcomes of patients hospitalized with COVID-19 in Brazil: Results from the Brazilian COVID19 registry / M.S. Marcolino, P.K. Ziegelmann, M.V.R. Souza-Silva et al. // International Journal of Infection Diseases. – 2021. – V.107. – P. 300–310.
7. Коронавирусная инфекция (COVID-19) и синдром диссеминированного внутрисосудистого свертывания / А.Д. Макацария, К.Н. Григорьева, М.А. Мингалимов и др. // Акушерство, гинекология и репродукция. – 2020. – Т. 14, № 16. – С. 123–131.
8. Serum or Plasma Ferritin Concentration as an Index of Iron Deficiency and Overload / M.N. Garcia-Casal, S.R. Pasricha, R.X. Martinez et al. // Cochrane Database Syst. Rev. – 2021. – V. 21. – P. 114–123.
9. Киселева В.В. Маркеры острого воспаления у пациентов с COVID-19 в сочетании с гипертонической болезнью / В.В. Киселева, К.С. Ячменев, Л.Ю. Зайцева // Инфекционные болезни. – 2021. – Т. 10, № 4. – С. 22–28.
10. Диагностика COVID-19: неиспользованные технологии – возможности общего анализа крови / М.А. Садретдинов, Ш.В. Тимербулатов, Д.А. Валишин В.М. Тимербулатов // Медицинский вестник Башкортостана. – 2020. – Т. 15. – С. 31–34.
11. Асфандиярова Н.С. Постковидный Синдром / Н.С. Асфандиярова // Клиническая медицина. – 2022. – Т. 99. – С. 429–435.
12. Ozdemir B. Correlation of C-Reactive Protein and Serum Iron Levels with Syntax Score / B. Ozdemir // Arch. Razi Inst. – 2020. – V. 75. – P. 413–418.
13. Вспышка нового инфекционного заболевания COVID-19: β-коронавирусы как угроза глобальному здравоохранению / Д.В. Горенков, Л.М. Хатмирова, В.А. Шевцов, и др. // БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. – 2020. – Т. 20. – С. 6–20.
14. Бразгина Я. Железодефицитная анемия на фоне COVID-19. Клинический Случай / Я. Бразгина, В. Бикбулатова, Н. Попова // Актуальные исследования. – 2022. – Т. 49. – С. 66–68.
15. Physiologically Based Serum Ferritin Thresholds for Iron Deficiency in Children and Non-Pregnant Women: A US National Health and Nutrition Examination Surveys (NHANES) Serial Cross-Sectional Study / Z. Mei, O.Y. Addo, M.E. Jeffers et al. // Lancet Haematol. – 2021. – V. 8. – P. 572–582.
16. Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves: a nonparametric approach / E.R. DeLong, D.M. DeLong, D.L. Clarke-Pearson // Biometric. – 1988. – V. 44, No 3. – P. 837–45.

Поступила в редакцию 25.08.2025 г.

BIOCHEMICAL MARKERS OF BLOOD IN ACUTE PERIODS OF COVID-19 AND INFLUENZA A***M. L. Zolotavina, E. A. Gaydabura, A. V. Bratova, O. Yu. Vekovishcheva, O. V. Chernyavskaya***

Recent studies show that the clinical picture of COVID-19 and influenza A, accompanied by pneumonia, looks similar at the initial stage. Therefore, it is important to determine the type of viral disease before starting treatment. The aim of the pilot clinical observational cross-sectional study was to identify a marker distinguishing acute COVID-19 from acute influenza A among routine blood serum biochemical indicators.

The study material was blood samples from patients who met the inclusion criteria and were treated in two hospitals in the Krasnodar region (Russia) between 2020 and 2022. The selected patients aged 35-65 years had confirmed COVID-19 or influenza A conditions, accompanied by grade 3 pneumonia, and did not have any chronic diseases that could complicate the course of viral diseases. The results of the following biochemical parameters were evaluated: ferritin, hemoglobin, serum iron, C-reactive protein and the number of red blood cells. Blood samples from patients without viral diseases were added as a positive control.

As a result of the study, we obtained constructed ROC curves for each indicator of blood serum and a discriminant analysis for all indicators combined showed that viral diseases successfully differ, mainly in terms of ferritin and C-reactive protein values.

Keywords: biomarker search, ferritin, hemoglobin, serum iron, C-reactive protein, erythrocytes, blood serum, COVID-19, influenza.

Золотавина Мария Леонидовна

кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры генетики, микробиологии и
биохимии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
университет», г. Краснодар, Россия.

E-mail: zolotavina_m@mail.ru,

ORCID: 0000-0001-7835-5408,

RSCI SPIN-code: 6349-3077, AuthorID: 327694

Zolotavina Maria L.

candidate of Biological sciences, docent,
associate Professor of the Department of Genetics,
Microbiology and Biochemistry,
Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation.

Гайдабура Елена Александровна

магистр биологии, биолог, ООО "НПФ "Хеликс",
г. Краснодар, Россия.

E-mail: alena.gajdabura@mail.ru,

ORCID: 000-0002-2331-1595

Gaidabura Elena A.

Master of Biological sciences, NPF Helix LLC,
Krasnodar, Russian Federation

Братова Алла Витальевна,

заведующая клинико-диагностической лабораторией
"Научно-исследовательский институт – краевая
клиническая больница № 1 имени профессора
С.В. Очаповского", г. Краснодар, Россия

E-mail: brat_alla@mail.ru,

ORCID: 0000-0002-0711-7653

Bratova Alla V.

head of the Clinical diagnostic laboratory,
Research Institute – Regional Clinical Hospital No. 1
named after Professor S.V. Ochapovsky,
Krasnodar, Russian Federation

Вековищева Ольга Юрьевна

кандидат биологических наук, старший научный
сотрудник, ФГБОУ ВО «Первый Санкт-
Петербургский государственный медицинский
университет имени академика им. И.П. Павлова»,
г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: olga.vekovischeva@gmail.com,

ORCID: 000-0003-4078-5212, AuthorID: 86226

Vekovischeva Olga Yu.

candidate of Biological sciences, PhD, senior
scientific researcher, The First St. Petersburg State
Medical University named after Academician I. P. Pavlov,
St. Petersburg, Russian Federation

Чернявская Оксана Витальевна

биолог клинико-диагностической лаборатории,
Специализированная клиническая инфекционная
больница, г. Краснодар, Россия.

E-mail: kdlskib@mail.ru,

ORCID: 0009-0007-8032-3537,

SPIN-code: 3294-6189, AuthorID: 1244910

Chernyavskaya Oksana V.

biologist of the clinical diagnostic laboratory,
Specialized Clinical Infections Hospital,
Krasnodar, Russian Federation

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ ИМБИРЯ НА РЕПРОДУКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025. П. В. Логинов, А. К. Памешова, Н. А. Ломтева

Целью настоящей работы стало исследование корректирующих эффектов полифенольных соединений (ПФС) из корневищ имбиря (*Zingiber officinale*), на репродуктивный аппарат самцов белых крыс в норме и в условиях воздействия микроволнового излучения (МВИ) с частотой 42 ГГц. Для исследования взяты самцы крыс линии Wistar массой 210±10 г. В условиях воздействия МВИ уровни МДА в гомогенатах тканей семенников и гипоталамуса возрастают относительно контроля на 38,5 % и 45,7 % соответственно ($p<0,001$). Воздействие МВИ на фоне вводимых ПФС не вызывает достоверного изменения МДА в указанных тканях. В этих же условиях уровни тестостерона и ЛГ превышают таковые в группе животных, подвергнутых воздействию МВИ. Отмечается улучшение сперматогенеза; функциональная активность клеток Лейдига полностью восстанавливается. Таким образом, ПФС способствуют улучшению репродуктивных процессов при воздействии МВИ.

Ключевые слова: оксидативный стресс, полифенольные соединения, семенники, сперматогенез, тестостерон.

Введение. В современном мире человечество сталкивается с действием целого ряда неблагоприятных факторов внешней среды, ухудшающих, в конечном счете, качество жизни каждого человека. Часто эти неблагоприятные факторы оказывают свое действие комплексно, вызывая различные функциональные нарушения и сокращая, таким образом, жизнь [1]. Прежде всего это касается химических источников стресса (загрязнение воздуха промышленными поллютантами, выхлопными газами, дымом курительных смесей), физических источников (солнечная радиация, микроволновое излучение, температурные воздействия) и т.д. Вдобавок к этому все мы ежедневно испытываем действие эмоциональных, а также пищевых источников стресса (недостаток пищевых нутриентов, несбалансированное и нерациональное питание). В современном мире мы живём в окружении многочисленных источников микроволнового излучения (МВИ) крайне высоких частот (КВЧ). Это касается сотовой связи, интернета, источников сетей Wi-Fi, теле- и радиовещательных объектов и т.д. Таким образом, действия химических источников стресса и источников МВИ избежать практически невозможно. В результате организм пребывает в состоянии постоянного напряжения, что сначала вызывает естественную, а затем затяжную стресс-реакцию, которая может либо привести к адаптационным изменениям, либо вызвать далее состояние перенапряжения, или дистресса. В процессе развития состояния дистресса происходит постепенная разбалансировка всего организма, сопровождаемая развитием функциональных и полифункциональных (полиорганных) нарушений, способных в итоге привести к гибели организма [2]. Говоря о функциональных нарушениях, следует учитывать, что действие стресс-факторов не отличается четкой направленностью, и наряду с сердечно-сосудистыми, эндокринными и прочими нарушениями имеют место нарушения репродуктивных процессов, от которых зависит будущее существование человечества [3, 4]. В этой связи остро встаёт вопрос профилактики и лечения функциональных нарушений репродуктивной системы, вызываемых последствиями так называемого оксидативного стресса. Известно значительное количество антистрессовых и противовоспалительных препаратов, т.е. антиоксидантов (АО).

Однако не все из них могут оказаться эффективными в том или ином случае [5]. В последнее время интерес стали вызывать доступные, химически немодифицированные природные АО, относящиеся к разряду водорастворимых веществ, потребление которых может не ограничиваться жёсткими дозозависимыми факторами. Эти АО присутствуют в основном в растительных препаратах и по своей химической структуре и действию не уступают таким эффективным жирорастворимым АО, как α -токоферол (витамин E) [6]. В этой связи наметилась тенденция в исследовании компонентов такого доступного источника полифенольных АО, как корни имбиря. Особенно актуальны стали исследования действия компонентов имбиря в сочетании с противовоспалительными веществами, содержащимися в иных растительных культурах (например, корице, красном перце), на репродуктивную функцию мужского типа [7]. Особенно актуальной становится проблема сохранения и улучшения репродуктивной функции в условиях действия неблагоприятных факторов среды, способных спровоцировать развитие состояния оксидативного стресса.

Целью настоящей работы стало исследование корректирующих эффектов полифенольных соединений (ПФС), входящих в состав экстракта из корневищ имбиря (*Zingiber officinale*), на репродуктивный аппарат самцов белых крыс в норме и в условиях воздействия микроволнового излучения (МВИ) миллиметрового диапазона.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо оценить стресс-реактивность животных в условиях воздействия МВИ и в присутствии ПФС; в тех же условиях определить уровни свободнорадикального окисления в гомогенатах тканей семенников и медиобазального гипоталамуса по содержанию МДА, измерить уровни репродуктивных гормонов (тестостерона и ЛГ) в плазме крови и дать общую оценку морфофункционального состояния тестикулярной ткани.

Материал и методы исследования. Для исследования было задействовано 60 самцов белых крыс линии Wistar массой 210 ± 10 г. Животных разделили на 4 группы: одну контрольную (К) и три опытных (О), по 15 животных в каждой. В первую опытную группу О-1 вошли животные, получавшие *peros* полифенольные соединения (ПФС), содержащиеся в экстракте имбиря, в дозе 2,5 мг в сутки в течение 14 дней. Экстракт имбиря в виде смеси гингеролов и шогоолов был получен по запатентованному методу [8]. Во вторую группу (О-2) вошли животные, подвергавшиеся воздействию МВИ с частотой 42 ГГц ($\lambda = 7,1$ мм) в течение 30 дней по 30 минут ежедневно с помощью генератора монохроматических волн «Явь-1» (Россия). В третью опытную группу (О-3) вошли животные, подвергавшиеся воздействию МВИ в течение 30 дней и получавшие экстракт имбиря в дозе 2,5 мг со 2-й недели воздействия излучения в течение 14 дней. После декапитации животных оценивали их стресс-реактивность по количеству эозинофильных гранулоцитов и относительной массе надпочечников, а также измеряя уровень антиперекисного фермента каталазы [9, 10]. Для оценки уровня свободнорадикального окисления (СРО) в гомогенатах тканей семенников и медиобазальной области гипоталамуса определяли базовые уровни малонового диальдегида (МДА) [11]. В плазме крови определяли уровни тестостерона и лютеинизирующего гормона (ЛГ) методом иммуноферментного анализа (ИФА) с помощью набора реагентов ООО «Хема» (Россия). Для общей оценки морфофункционального состояния семенников изготавливали срезы толщиной 7 мкм на микротоме "Microm HM-400" (Германия) и окрашивали гематоксилин-эозином. Все экспериментальные воздействия над животными проводились с соблюдением этических норм о гуманном отношении к животным в соответствии с Женевской конвенцией (1985). Проводимое исследование одобрено на заседании локального

этического комитета (ЛЭК) от 15.05.2025 г. (протокол № 12). Полученные в ходе исследования данные статистически обработаны с использованием t -критерия Стьюдента и коэффициента линейной корреляции Пирсона r , различия считали достоверными при $p < 0,05$ [12].

Результаты исследования. В условиях воздействия МВИ КВЧ-диапазона (группа О-2) отмечается снижение количества эозинофильных гранулоцитов на 18 %, в сравнении с контролем ($p < 0,01$); относительная масса надпочечников при этом снижается на 10 % ($p < 0,05$). В крови отмечается повышение перекисного гемолиза эритроцитов на 20 % при одновременном снижении уровня каталазы на 10,2 % по сравнению с контролем ($p < 0,05$). Снижение уровня каталазы объясняется усиленной её утилизацией в ходе переработки образующихся активизированных кислородных метаболитов (АКМ). Все вышеуказанные обстоятельства свидетельствуют о развитии стресс-реакции при воздействии МВИ (рис. 1).

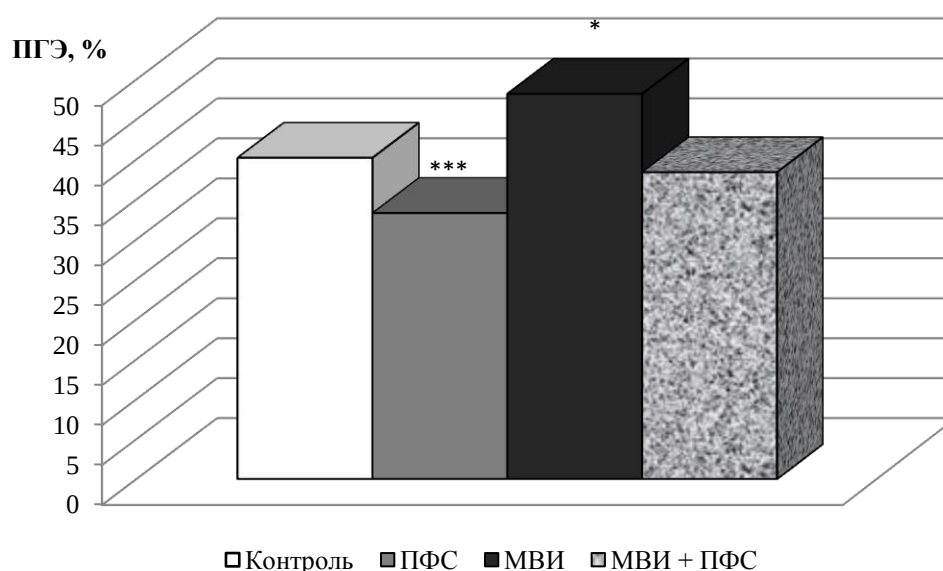


Рис. 1. Изменение уровня перекисного гемолиза эритроцитов в условиях экспериментальных воздействий. *Примечание:* * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$ – в сравнении с контролем.

Введение полифенольных соединений (ПФС) из экстрактов имбиря (группа О-1) вызывает снижение уровня каталазы в плазме крови на 24,3 % ($p < 0,001$), что указывает на снижение уровня промежуточных продуктов липопероксидации – гидроперекисей, а также пероксида водорода. Предварительное введение ПФС способствует снижению стресс-реакции самцов крыс при воздействии МВИ (группа О-3), на что указывают повышение, по сравнению с группой О-2, количества эозинофилов и относительной массы надпочечников, при этом указанные показатели соотносятся с контрольными значениями, достоверно не отличаясь от таковых. Уровень каталазы в подобных условиях также не отличается достоверно от контрольных показателей. Таким образом, ПФС проявляют корректирующий эффект на уровень развития стресс-реакции при воздействии МВИ.

В условиях воздействия МВИ отмечается повышение уровня МДА в гомогенатах тканей семенников и медиобазального гипоталамуса, причём в гипоталамической ткани базовый уровень МДА во всех группах превышает таковой в аналогичных группах для

тестикулярной ткани. Указанный факт представляется вполне логичным, поскольку гипоталамическая ткань как часть мозговой ткани отличается повышенным содержанием липидов – главного субстрата процесса липопероксидации [13]. Предварительное введение животным ПФС (группа О-1) способствует достоверному снижению исходного уровня МДА в гомогенатах тканей семенников и медиобазального гипоталамуса на 24 % в обоих случаях относительно контроля ($p<0,01$). Воздействие же МВИ (группа О-2) вызывает повышение уровня СРО по показателю МДА в тестикулярной ткани на 38,5 % и в гипоталамической ткани на 45,7 % (почти в 1,5 раза), по сравнению с контролем ($p<0,001$). Воздействие МВИ на фоне вводимых ПФС (группа О-3) не вызывает достоверного изменения уровней липопероксидации как в тестикулярной, так и в гипоталамической тканях относительно контроля (табл. 1).

Таблица 1

Изменение уровня малонового диальдегида в тканях семенников и гипоталамуса в условиях экспериментальных воздействий

Группы животных	n	МДА _{исх} в ткани семенников, нмоль/0,05 г		МДА _{исх} в гипоталамической ткани, нмоль/0,05 г	
Контроль	15	4,89±0,151	–	5,45±0,282	–
Группа О-1	15	3,72±0,163	$p<0,01$	4,15±0,224	$p<0,01$
Группа О-2	15	6,77±0,272	$p<0,001$	7,94 ± 0,506	$p<0,001$
Группа О-3	15	5,00±0,263	$p>0,05$	5,51±0,314	$p>0,05$

Таким образом, вводимые животным ПФС нивелируют неблагоприятные эффекты МВИ по уровню СРО в тканях семенников и медиобазального гипоталамуса, что указывает на проявление ПФС антиоксидантных свойств. АО-действие ПФС, выражаемое в подавлении процессов СРО и связанных с ними процессов развития оксидативного стресса, должно способствовать улучшению функционального состояния тканей семенников и медиобазального гипоталамуса.

В условиях воздействия МВИ (группа О-2) уровни тестостерона и ЛГ имеют тенденцию к снижению, по сравнению с контролем, однако достоверные различия не обнаружены (табл. 2).

Таблица 2

Изменение уровней тестостерона и лютеинизирующего гормона в плазме крови самцов крыс в условиях экспериментальных воздействий

Группы животных	n	Тестостерон, нг/мл	Лютеинизирующий гормон, мМЕ/мл	r	$p_t<$
Контроль	15	2,829±0,0731	0,425±0,0538	+0,935	0,01
Группа О-1	15	3,159±0,1504 *	0,785±0,0372 ***	+0,903	0,01
Группа О-2	15	2,617±0,1154	0,416±0,0252	+0,634	0,05
Группа О-3	15	3,201±0,1324** o	0,721±0,0325**	+0,772	0,05

Примечание: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$ – в сравнении с контролем; o $p<0,05$ – в сравнении с группой О-2.

Введение ПФС (группа О-1) способствует достоверному повышению уровня ЛГ на 85 % относительно контроля ($p<0,001$) при одновременном повышении уровня тестостерона в плазме крови на 12 % ($p<0,05$) в соответствии с высоким коэффициентом положительной корреляции $r=+0,903$ ($p<0,01$). Воздействие МВИ на фоне вводимых ПФС в целом способствует повышению тестостерона и ЛГ, и по сравнению с группой О-1, уровень тестостерона несколько превышает

соответствующий показатель. Уровень ЛГ в группе О-3 достоверно не различим с таковым в группе О-1, хотя и несколько снижен. Изменение секреции тестостерона и ЛГ в условиях воздействия МВИ, а также сочетанного воздействия МВИ и ПФС соответствовало средним коэффициентам положительной корреляции (табл. 2), что говорит о средней силе эндокринных взаимодействий гипофиза и семенников в данных обстоятельствах. Следовательно, МВИ КВЧ-диапазона оказывает своё действие на гонады независимо от регуляторного влияния со стороны гипофиза.

Вместе с тем после введения животным ПФС (группа О-1) имеет место повышение относительных масс гипофиза и семенников на 16 и 25 % соответственно, по сравнению с контролем ($p < 0,001$). Воздействие МВИ (группа О-2) способствует достоверному увеличению относительной массы семенников на 22,2 %, по сравнению с контролем ($p < 0,05$), в то время как относительная масса гипофиза достоверно не изменяется. Очевидно, что на начальных этапах (приблизительно в течение первых двух недель) МВИ оказывает пролиферирующее действие на уровне зародышевых стволовых клеток – сперматогоний типа A_0 , однако постепенно ресурсы пролиферации истощаются, и прирост сперматогенных клеток замедляется на конечных этапах воздействия МВИ. В то же самое время сочетанное воздействие МВИ и ПФС приводит синергичному эффекту, вызывая повышение относительной массы семенников на треть (33 %), по сравнению с контролем, что позволяет считать, что АО-действие ПФС приводит к пролонгации пролиферирующего эффекта МВИ, проявляемого на начальных этапах воздействия.

При воздействии МВИ (группа О-2) наблюдаются хаотичное расположение клеток сперматогенного эпителия, либо неравномерная его высота. В отдельных случаях отмечаются разрывы базальной мембраны. Общее количество клеток Лейдига возрастает за счет преимущественно средних клеток, площадь которых, однако, имела тенденцию к снижению. Указанные противоречия объясняют практически неизменную тестостеронпродуцирующую активность семенников в условиях воздействия МВИ КВЧ-диапазона. Диаметр семенных канальцев и высота сперматогенного эпителия в группе О-2 соотносимы с контрольными показателями ($250,1 \pm 3,62$ и $71,2 \pm 1,24$ мкм соответственно); в просвете канальцев наблюдается слущивание зрелых половых клеток. Семенные канальцы неплотно прилегают друг к другу, что может указывать на возможную отёчность межканального пространства. Указанное обстоятельство объясняет также факт прироста относительной массы семенников. Таким образом, вклад в прирост относительной массы семенников объясняется как минимум двумя факторами:

1) первичной пролиферацией сперматогоний с последующим слущиванием созревших клеток (сперматозоидов) на более поздних этапах облучения;

2) возникновением отёчных явлений в структуре тестикулярной ткани.

Полученные морфологические данные говорят в целом об угнетении сперматогенеза в процессе длительного воздействия микроволнового излучения (рис. 2, а).

У животных, получавших в течение двух недель ПФС (группа О-1), отмечается визуальное относительно контроля увеличение диаметров семенных канальцев, наполненных сперматогенными клетками всех стадий сперматогенного цикла. Ближе к просвету канальцев наблюдаются зрелые клетки – сперматоциты и сперматогонии. Высота сперматогенного эпителия в группе О-1 составила $81,0 \pm 2,54$ мкм, что превышает контрольные показатели на 14 % ($p < 0,01$). В структуре интерстициальной ткани доминируют функционально активные средние клетки Лейдига. Всё сказанное согласуется с данными о достоверном увеличении относительной массы семенников и усилении тестостеронпродуцирующей активности в группе О-1. Предварительное

введение животным ПФС в условиях воздействия МВИ (группа О-3) приводит к существенному улучшению сперматогенеза, по сравнению с группой О-2: диаметры семенных канальцев по своим размерам превосходят таковые в группе О-2 на 29 % ($p < 0,001$); высота сперматогенного эпителия превышает аналогичный показатель в группе О-2 на 22,5 % ($p < 0,001$) и составляет величину $87,1 \pm 4,72$ мкм. Интерстициальная ткань представлена в основном средними клетками Лейдига, диаметр ядер которых превышает контрольные показатели (рис. 2, б).

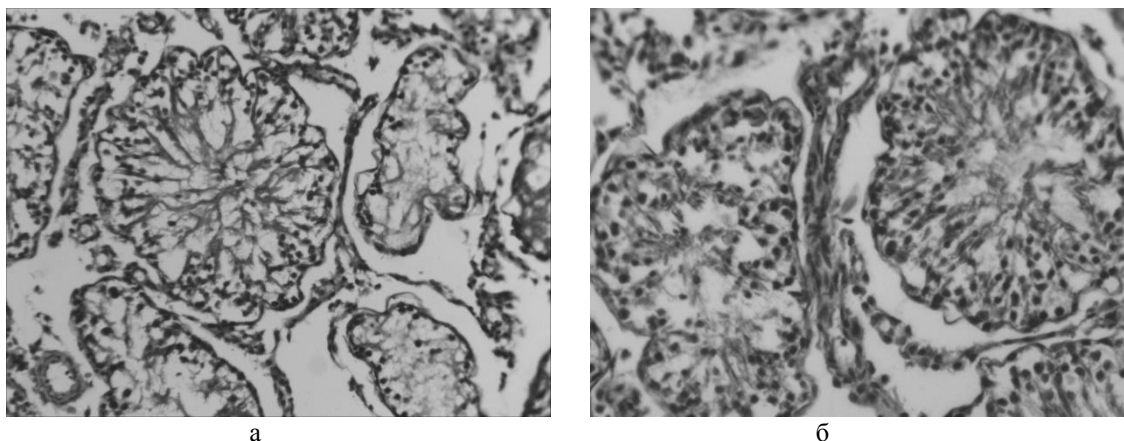


Рис. 2. Морфофункциональное состояние ткани семенников при воздействии МВИ (а) и сочетанном воздействии ПФС и МВИ (б). Окраска гематоксилин-эозином. Увел. 200×.

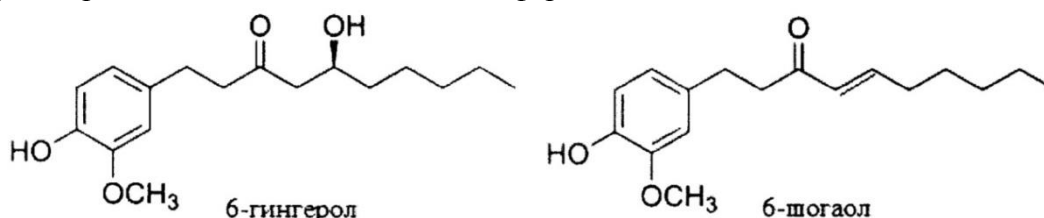
Таким образом, предварительное введение ПФС в условиях воздействия МВИ способствует улучшению общего функционального состояния семенников на уровне инкреторной и экскреторной функции. Учитывая, что действие МВИ сопровождается усилением динамики свободнорадикального окисления, следует говорить о проявлении ПФС АО-активности в условиях развития оксидативного стресса.

Обсуждение результатов. Действие МВИ КВЧ-диапазона (миллиметровый спектр) сопровождается акустоэлектрическими колебаниями клеточных мембран (колебания Фрёлиха), что приводит к структурно-функциональным изменениям клеток [14]. Вместе с тем в некоторых работах указывается, что микроволновое излучение оказывает антиоксидантное действие [15, 16], что является определяющим фактором при назначении физиопроцедур. Вместе с тем, имеются данные об ингибирующем эффекте МВИ на каталазное ферментативное звено антиоксидантной системы (АОС) в частотном диапазоне 49–62 ГГц, что ведёт к накоплению активных форм кислорода (АФК) и усилению перекисного гемолиза эритроцитов [17]. Таким образом, можно заключить, что в результате длительного воздействия МВИ мембранодеструктивные изменения сперматогенных клеток обуславливаются как минимум двумя факторами:

- 1) усилением акустоэлектрических колебаний Фрёлиха в мембранах половых клеток;
- 2) усилением динамики СРО за счёт истощения резервов АОС, в частности на уровне каталазного звена.

Развитие состояния окислительного стресса, в свою очередь, сопровождается деструктивными изменениями на уровне мембранных элементов клеток, что, в конечном счете, вызывает функциональные нарушения соответствующих тканей и органов. Процессы СРО, запускаемые в ходе развития состояния оксидативного стресса, вызывают, в частности, функциональные нарушения репродуктивных процессов в пределах всей гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси. В этой связи,

вводимые ПФС, будучи соединениями антиоксидантного типа, способны купировать развитие состояния оксидативного стресса. Механизм АО-действия ПФС состоит в их способности внедряться в липидный бислой за счёт гидрофобных взаимодействий, а также частично циркулировать в межклеточном пространстве. Способность свободной циркуляции ПФС из корневищ имбиря (гингеролов, шогаолов) в жидких средах организма (межклеточная жидкость, кровь, лимфа, спермоплазма) обусловлена средней длиной боковой фитильной цепи неразветвлённого строения, по сравнению с жирорастворимыми антиоксидантами токоферольного типа:



Поскольку гипофиз так же, как гипоталамус богаче липидами, чем семенники, ПФС способны лучше накапливаться в пределах гипоталамо-гипофизарного комплекса, по сравнению с семенниками, а значит более эффективно проявлять свое АО-действие в условиях развития окислительного стресса, индуцированного длительным воздействием МВИ [13]. Действие МВИ на регуляторное звено (гипоталамо-гипофизарный комплекс) практически отсутствует, о чём свидетельствуют незначительные изменения уровня ЛГ, а также слабая эндокринная взаимосвязь на уровне гипофизарно-семенникового комплекса.

Повышение относительных масс гипофиза и семенников при введении ПФС говорит об улучшении функционального состояния указанных желез. В случае семенников повышение их относительной массы может говорить об улучшении не только эндокринной, но и сперматогенной функции. Синхронное изменение уровней репродуктивных гормонов (тестостерона и ЛГ) под действием ПФС указывает на улучшение регуляторного влияния функциональное состояние семенников со стороны гипофиза в частности и гипоталамо-гипофизарного комплекса в целом.

Учитывая, что в области медиобазального гипоталамуса сосредоточены центры регуляции репродуктивных процессов (в частности, аркуатное ядро), можно говорить о двойном механизме регуляции репродуктивной функции мужского типа при введении ПФС:

- 1) за счёт снижения уровня СРО в самой тестикулярной ткани и связанном с этим общим улучшением сперматогенеза;
- 2) за счёт улучшения функционального состояния гипоталамуса и связанного с этим положительного регуляторного влияния со стороны гипоталамо-гипофизарного комплекса на инкреторную и связанную с ней экскреторную (сперматогенную) функцию гонад.

Влияние тестостерона на сперматогенез на уровне гонад осуществляется паракринно и подтверждает концепцию двойного механизма регуляции сперматогенеза при введении ПФС, учитывая, что ПФС стимулируют стероидогенез.

Заметное улучшение функционального состояния семенников в условиях сочетанного действия МВИ и ПФС очевидно связано с АО-эффектом ПФС в условиях пролонгированного (длительного) воздействия МВИ, способного на ранних этапах проявлять лечебные свойства, а на поздних этапах истощать резервы АОС. Таким образом, ПФС проявили выраженное АО-действие как изолированно, так и в сочетании с воздействием МВИ КВЧ-диапазона.

Выводы.

1. Длительное воздействие микроволнового излучения КВЧ-диапазона вызывает развитие состояния оксидативного стресса, способствуя интенсификации процессов СРО в тканях семенников и медиобазального гипоталамуса; при этом в мембранах сперматогенных клеток возникают структурно-функциональные изменения, вызванные также акустоэлектрическими колебаниями.

2. Полифенольные соединения из корневищ имбиря проявляют свое АО-действие в пределах всей гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси как изолированно, так и в сочетании с воздействием микроволнового излучения.

3. Вводимые ПФС способствуют улучшению эндокринной функции эндокринной взаимосвязи гипофизарно-семенникового комплекса; в условиях сочетанного воздействия МВИ и ПФС сила эндокринных взаимодействий гипофиза и семенников ослабевает.

4. Воздействие МВИ на фоне вводимых ПФС сопровождается общим улучшением сперматогенеза; интерстициальные эндокриноциты по своим морфофункциональным характеристикам превосходят как контрольные показатели, так и таковые при изолированном введении ПФС.

Таким образом, полифенольные соединения из корневищ имбиря способствуют улучшению репродуктивных процессов на разных звеньях гипоталамо-гипофизарно-семенникового комплекса как изолированно, так и в условиях воздействия микроволнового излучения КВЧ-диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hayes J. D. Oxidative Stress in Cancer / J. D. Hayes, A. T. Dinkova-Kostova, K. D. Tew // *Cancer Cell*. – 2020. – Vol. 38, No 2. – P. 167–197.
2. The effects of oxidative stress on the development of atherosclerosis / M. Khosravi, A. Poursaleh, G. Ghasempour [et al.] // *Biological Chemistry*. – 2019. – Vol. 400, No 6. – P. 711–732.
3. Loginov P. V. Morphofunctional state of reproductive system in male rats under conditions of immobilization stress / P. V. Loginov, D. L. Teply // *Естественные науки*. – 2014. – № 4 (49). – С. 47–54.
4. Zargari F. Arsenic, Oxidative Stress and Reproductive System / F. Zargari, M. S. Rahaman // *Journal of Xenobiotics*. – 2022. – Vol. 12, No 3. – P. 214–222.
5. Agarwal A. Oxidative stress in pathologies of male reproductive disorders / A. Agarwal, K. Leisegang, P. Sengupta // *Pathology: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants* / Ed. by V. R. Preedy. – Cambridge, MA (USA) : Academic Press, 2020. – P. 15–27.
6. Логинов П. В. Влияние витамина Е (α -токоферола) на гипоталамо-гипофизарно-гонадную систему самцов белых крыс при окислительном стрессе, индуцированном природными токсикантами: дисс. ... канд. биол. наук / П. В. Логинов. – Астрахань : Астраханский государственный ун-т, 2004. – 171 с.
7. Classifications of polyphenols and their potential application in human health and diseases / S. Prabhu, A. Molath, H. Choksi, S. Kumar // *International Journal of Physiology, Nutrition and Physical Education*. – 2021. – Vol. 6, No 1. – P. 293–301.
8. Пат. 2740997 Рос. Федерация, МПК A61K 35/00, A61K 36/906, C07C 45/90 Способ выделения полифенолов из корневищ имбиря / П. В. Логинов, А. А. Николаев, Е. Б. Мавлютова, С. А. Голубкина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Астраханский ГМУ Минздрава России. – № 2019135539; заявл. 05.11.2019; опубл. 22.01.2021. Бюл. № 3.
9. Ронин В. С. Руководство к практическим занятиям по методам клинических лабораторных исследований / В. С. Ронин, Г. М. Старобинец. – М. : Наука, 1989. – 320 с.
10. Мамонтова Н. С. Активность каталазы при хроническом алкоголизме / Н. С. Мамонтова, Э. И. Белобородова, Л. И. Тюкалова // *Клиническая лабораторная диагностика*. – 1994. – № 1. – С. 27–28.
11. Стальная И. Д. Метод определения малонового диальдегида с помощью тиобарбитуровой кислоты / И. Д. Стальная, Т. Г. Гаришвили // *Современные методы в биохимии* / под ред. акад. В. Н. Ореховича. – М. : Медицина, 1977. – С. 66–68.
12. Гланц С. Медико-биологическая статистика. – М. : Практика, 1999. – 459 с.

13. Туманова С. Ю. Липиды центральной нервной системы и структура клеточных мембран / С. Ю. Туманова // Биохимия мозга / Под ред. И. П. Ашмарина, П. В. Стукалова, Н.Д. Ещенко. – Спб. : Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1999. – С. 81–123.
14. Николаев А. А. Характеристика активности щелочной фосфатазы в семенной плазме и сперматозоидах самцов белых крыс, подвергнутых воздействию микроволнового излучения малой интенсивности / А. А. Николаев, М. В. Ушакова, Н. Н. Николаева // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 6. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29311> (дата обращения: 08.03.2025).
15. Бондарь С.С. Влияние низкоинтенсивного микроволнового излучения частотой 1 ГГц на функциональное состояние мононуклеарных лейкоцитов цельной крови у практически здоровых молодых лиц / С. С. Бондарь, И. В. Терехов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4-6. – С. 1083-1087.
16. Potential Role of Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) in the Prevention of Neurodegenerative Diseases / R. Arcusa, D. Villaño, J. Marhuenda [et al.] // Frontiers in Nutrition. – 2022. – Vol. 9. – Article 809621. – 14 p.
17. Effect of microwave radiation on the activity of catalase. decomposition of hydrogen peroxide under microwave and conventional heating / S. Horikoshi, K. Nakamura, M. Kawaguchi [et al.] // RSC Advances. – 2016. – Vol. 6. – P. 48237-48244.

Поступила в редакцию 08.06.2025 г.

CORRECTING EFFECTS OF GINGER POLYPHENOLIC EXTRACTS ON REPRODUCTIVE PROCESSES UNDER EXPOSURE OF MICROWAVE RADIATION

P. V. Loginov, A. K. Pameshova, N. A. Lomteva

The purpose of the paper was to study the correcting effects of polyphenolic compounds (PPC) included in the extract from ginger rhizomes (*Zingiber officinale*) on the reproductive apparatus of white male rats in norm and under conditions of influence of millimetric microwave radiation (MWR). Wistar male rats weighing 210 ± 10 g were taken for the experiment. Under exposure of MWR, the levels of MDA in homogenates of testicular and hypothalamic tissues increase by 38.5% and 45.7% respectively relative to the control ($p < 0.001$). The MWR exposure on the background of introduced PPC does not cause reliable changes in the MDA level in the mentioned tissues. Under the same conditions, testosterone and LH levels exceed those in the group of animals exposed to MWR. It is observed the improvement of spermatogenesis; the functional activity of Leydig cells is restored completely. Thus, PPC contribute to the improvement of reproductive processes under the influence with MWR.

Keywords: oxidative stress, polyphenolic compounds, testes, spermatogenesis, testosterone.

Логинов Павел Вадимович

доктор биологических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
медицинский университет», Астрахань, Россия.
E-mail: loginovpv77@mail.ru

Loginov Pavel V.

Doctor of Biological Sciences, Ass. Professor;
Astrakhan State Medical University,
Astrakhan, Russia.
E-mail: loginovpv77@mail.ru

Памешова Айман Кувайдуллаевна

исследователь; ФГБОУ ВО «Астраханский
государственный педагогический университет
им. В.Н. Татищева», Астрахань, Россия.
E-mail: ms.aiman2217@mail.ru

Pameshova Aiman K.

researcher,
V.N. Tatishchev Astrakhan State University,
Astrakhan, Russia.
E-mail: ms.aiman2217@mail.ru

Ломтева Наталья Аркадьевна

доктор биологических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
педагогический университет им. В.Н. Татищева»,
Астрахань, Россия.
E-mail: molecula01@yandex.ru

Lomteva Natal'ya A.

Doctor of Biological Sciences, Ass. Professor;
V.N. Tatishchev Astrakhan State University,
Astrakhan, Russia.
E-mail: molecula01@yandex.ru

L-КАРНИТИН: ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, РЕАЛИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

© 2025. *Е. В. Лопатина, В. В. Труш, В. И. Соболев*

В статье представлен обзор литературных данных относительно позитивных эффектов карнитина на животный организм: энерготропного, антиоксидантного, антигипоксического, дезинтоксикационного, гипополипидемического, мембраностабилизирующего, антиапоптотического, анаболического и стабилизирующего митохондрии. Обсуждается эффективность карнитина и ацетилкарнитина в компенсации полинейропатий различного генеза, различных нейродегенеративных расстройств, наследственных миодистрофий, кардиомиопатии, раковой саркопении, с целью гепатопротекции, ослабления метаболического синдрома, периферического атеросклероза, возрастных изменений митохондрий в скелетной и сердечной мышцах, повреждения скелетных мышц при физических нагрузках, проявлений гипераммониемии.

При этом большинство исследований свидетельствуют о том, что для проявления полезных эффектов карнитина требуется большая длительность его приема – не менее 12 недель, а клинически эффективные его дозы соответствуют или в два раза превышают верхний допустимый уровень потребления в составе специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок (составляют более 2 г/сутки). В то же время в некоторых исследованиях установлено, что пищевые добавки с карнитином могут значительно повысить уровень атерогенного триметиламин-N-оксида в сыворотке крови как у людей, так и у грызунов. Кроме того, выявлено, что слишком высокие дозы экзогенного карнитина при физических нагрузках на фоне недостаточности кровообращения и соответственно оксигенации тканей могут оказать негативный эффект. В связи с этим целесообразность длительного применения фармакологических доз карнитина, особенно при пероральном введении, требует тщательного обоснования.

Несмотря на противоречивость результатов исследований относительно эффективности экзогенно вводимого карнитина на животных моделях и условно здоровых людях, он может оказаться весьма полезным при определенных патологиях, прежде всего, вызванных первичной или вторичной недостаточностью карнитина, нарушением его метаболизма и расстройствами энергообмена, в том числе митохондриальными дисфункциями, а также у возрастных пациентов, у которых зачастую развиваются вторичные митохондриальные дисфункции.

Ключевые слова: L-карнитин, ацетил-L-карнитин, энергообмен, энерготропная терапия, антиоксидант, нейропротектор, кардиопротектор.

Введение. В последние десятилетия в медицине интенсивно развивается метаболическое направление, целью которого является улучшение энергообмена и коррекция обменных нарушений различного генеза, в том числе митохондриальных дисфункций, с помощью метаболически активных веществ. Одними из относительно безопасных метаболитов, идентичных собственным молекулам животного организма, служат карнитин и его эфир ацетилкарнитин, которые рассматриваются в качестве энерготропных средств и возможного терапевтического потенциала для нейро-, кардио-, гепатопротекции, повышения функциональных возможностей скелетных мышц, нормализации антиоксидантного статуса. Вместе с тем, литературные данные относительно эффективности карнитина и ацетилкарнитина в улучшении функционального состояния различных систем организма и повышении физической работоспособности весьма неоднозначны, что, очевидно, связано с использованием разных их доз, длительности и способов введения, разным исходным состоянием обследуемых и другими факторами. Кроме того, противоречивы и мнения специалистов относительно безопасности длительного применения карнитина в

высоких дозах. Целью настоящего обзора явился анализ результатов исследования эффектов терапевтических доз карнитина и его метаболита ацетилкарнитина на животных моделях и клинических данных, полученных на различных категориях пациентов.

Содержание и распределение карнитина в организме, суточная потребность в нем. L-карнитин (γ -триметил- β -гидроксибутиробеттаин) – биологически активное вещество метаболитного действия с хорошим профилем безопасности, аналог естественного эндогенного вещества карнитина, холиноподобный четвертичный амин, производное аминокислоты лизина и метионина, родственный витаминам группы В (витамин Вt). Однако позже его перестали считать витамином, поскольку он может синтезироваться в организме.

Впервые карнитин был выделен из экстрактов мышечной ткани (говядины). Содержание его в организме поддерживается в относительно узком гомеостатическом диапазоне [1] и составляет около 300 мг/кг (20–25 г), из которых всего 0,5 % (20–60 мкмоль/л, около 30 мг) находится в плазме крови [2]. 90–95 % карнитина содержится в энергоемких органах, использующих жирные кислоты в качестве основного субстрата для ресинтеза АТФ, – скелетных мышцах (около 20 г) и сердце (220 мг) [3], которые являются основной мишенью для транспортировки карнитина. Кроме того, карнитин в гораздо меньших количествах, чем в мышечной ткани, содержится в почках (60 мг), печени (650 мг) и тканях мозга (80 мг), в которых синтезируется из аминокислот лизина и метионина с участием витаминов группы В (ниацин, пиридоксин), аскорбиновой кислоты и железа [4]. Скорость синтеза карнитина в организме взрослого человека незначительна и составляет 1–2 мкмоль/кг массы тела в сутки [5].

Скелетные и сердечная мышцы не способны самостоятельно синтезировать карнитин, в связи с чем наиболее зависимы от его содержания в крови [6] и первыми страдают при его недостатке, тогда как клетки головного мозга, печени и почек чувствительны к еще более выраженному дефициту карнитина [7]. В животном организме функционирует строго регулируемая система активного транспорта карнитина, благодаря которой концентрация карнитина в мышечной ткани (в том числе, в миокарде сердца) в несколько десятков раз выше, чем в крови [8].

У здоровых людей гомеостаз карнитина поддерживается за счет многостадийного эндогенного его биосинтеза, абсорбции из пищи (путем активного и пассивного транспорта в кишечнике) и дальнейшей элиминации и реабсорбции почками. 75 % карнитина поступает в организм человека с мясными и молочными продуктами, 25 % – синтезируется в организме [9]. Карнитин не подвергается катаболизму в организме и выводится с мочой в неизменном виде или в виде O-ацильных производных [10]. Главным производным L-карнитина в тканях является ацетилкарнитин [10]. Около 60 % карнитина присутствует в организме в свободной форме, а 40 % – в форме эфиров с коротко-, средне- и длинноцепочечными жирными кислотами (ацил-L-карнитина), образующихся в реакциях, катализируемых карнитинацилтрансферазами [11]. Разновидность ацил-L-карнитина – ацетил-L-карнитин – аккумулируется в большом количестве в медленных мышечных волокнах при длительной физической нагрузке, что может быть связано с наличием в них большого количества митохондрий и возможно отражает улучшение окислительного метаболизма в скелетных мышцах [12].

Суточная потребность организма человека в L-карнитине индивидуальна и составляет от 200 до 500 мг [13], и даже при строгом вегетарианском типе питания общее количество потребляемого L-карнитина существенно снижается (до 16 мг/сутки)

[14], но требуемое его количество образуется из белков растительного происхождения [9] и, несмотря на некоторое снижение его концентрации в крови, его содержание в скелетных мышцах соответствует таковому нормально питающихся людей [15].

Вместе с тем, при повышенных энергозатратах потребность организма в карнитине может достигать 2 000 мг и более в сутки, в то время как при обычном питании в организм человека, потребляющего мясо, поступает только 100–300 мг/сутки карнитина [16]. Клинически выраженная недостаточность организма человека в карнитине возникает при снижении его концентрации в крови до 10–20 % от нормальной [17].

Принято считать, что доза карнитина в 20 мг/кг/сутки (1 200 мг при массе тела 60 кг) в виде основания или ацетата, тартрата или цитрата является безопасной для человека [7]. Верхний безопасный уровень суточного потребления L-карнитина для взрослых составляет 2 000 мг (29 мг на 1 кг массы тела), согласно рекомендациям Норвежского научного комитета по безопасности пищевых продуктов – 1 500 мг [18]. Испанское агентство по безопасности пищевых продуктов и питанию ограничивает суточный прием добавок L-карнитина или L-карнитина гидрохлорида до 2 000 мг, L-карнитина тартрата – до 3 000 мг.

В целом, установлен широкий профиль безопасности карнитина: прием его добровольцами в дозе до 15 г/сутки не приводил к расстройствам деятельности желудочно-кишечного тракта или другим отрицательным последствиям [19]. Эффективные дозы карнитина в экспериментах на животных – 20–300 мг/кг, в клинической практике – до 5 г/сутки [20, 21], в спортивной медицине для повышения физической выносливости спортсменов карнитин рекомендуют в дозе 30–75 мг/кг/сутки на протяжении не менее 1,5 месяцев [22].

Для карнитина характерна очень высокая канальцевая реабсорбция, достигающая 98–99 %, но при его концентрации в крови более 40–60 мкмоль/л, соответствующей нормальному его уровню, реабсорбция в почках начинает снижаться [23]. В связи с этим прием слишком высоких доз карнитина может не обеспечить существенное повышение его содержания в крови и скелетных мышцах. Биодоступность L-карнитина у человека при приеме в дозе до 300 мг/сутки составляет 30–87 % [18], но фармакологические его дозы усваиваются менее эффективно: в частности, при однократном приеме 2 г карнитина биодоступность уменьшается до 16 % [18], а после приема 6 г – до 5 % [7, 23]. В то же время установлено, что прием L-карнитина в дозе 2 г/сутки в течение 50 дней сопровождается увеличением плазменного его уровня на 43 % [3]. Вместе с тем, после приема высоких доз карнитина (более 6 г/сутки) возможно выделение его метаболита, образующегося под действием микробиоты кишечника, – триметиламина – через кожу (в составе пота), что сопровождается неприятным характерным рыбным запахом тела [24].

99 % карнитина, имеющегося в организме, находится внутриклеточно [10]. Перенос карнитина через биологические мембраны, в том числе в скелетных мышечных волокнах опосредуется рядом близкородственных транспортных белков-переносчиков органических кислот путем вторичноактивного натрий-зависимого транспорта [25]. Из этих переносчиков наиболее важным является OCTN2 (SLC22A5) [26], который экспрессируется в плазматической мембране энтероцитов слизистой оболочки тонкой кишки, а также клеток печени, скелетных мышц и других органов, в связи с чем отвечает за всасывание карнитина из кишечника и утилизацию его из крови основными органами-мишенями.

Экспрессия гена белка OCTN2 у мышей, свиней, коров и человека непосредственно регулируется системой рецептора, связанного с пероксисомным пролифератором PPAR α , то есть должна быть чувствительна к изменениям в липидном обмене [27]. Имеются данные [28] относительно пониженной экспрессии гена OCTN2 у

крыс Zucker с ожирением, по сравнению с их нормальными генетическими аналогами, что указывает в пользу возможной связи ожирения с недостаточностью карнитина.

Эффекты карнитина в животном организме. На организменном уровне карнитин проявляет множественные эффекты: замедляет основной обмен (антитиреоидное действие) [29], катаболизм белков и углеводов, оказывает анаболическое действие [30–32], усиливает процессы регенерации, включает жирнокислотный метаболический шунт, способствует уменьшению избыточной массы тела и уменьшает содержание жира в скелетной мускулатуре, способствуя при этом экономному расходованию гликогена и увеличению его запасов [33].

Благодаря стимуляции синтеза фосфолипидов в клетках карнитин оказывает мембраностабилизирующее [34], антигипоксическое, антиоксидантное, дезинтоксикационное, вазодилатирующее и антиагрегантное [35, 36] действие.

Карнитин играет важную роль в сохранении стабильного уровня КоА, необходимого для активирования карбоксилсодержащих метаболитов, катаболизма некоторых аминокислот, детоксикации органических кислот и ксенобиотиков, функционирования пируватдегидрогеназы и соответственно нормальной работы цикла трикарбоновых кислот [37]. Кроме того, он стимулирует увеличение синтеза холина и его эфиров, образование АТФ, используется как средство энерготропной терапии [33].

Первичная карнитиновая недостаточность вызвана наследственным дефектом транспортеров карнитина, осуществляющих его перенос из плазмы крови в периферические ткани, в первую очередь, транспортера OCTN2. Она проявляется выраженной общей мышечной слабостью, вялостью, гипотонией, энцефалопатией, гипогликемией, гипокетонемией, увеличением размеров печени, поражением миокарда, комой и даже смертью [38]. Вторичный дефицит карнитина, в том числе вызванный сахарным диабетом (СД), может быть причиной нейродегенеративных заболеваний и периферических нейропатий. Хроническая недостаточность карнитина приводит к накоплению нейтральных жиров, что клинически проявляется кардиомиопатией, сердечной недостаточностью, патологией печени, а со стороны нервной системы – энцефалопатией, нейромышечными нарушениями, отставанием в росте и развитии [39]. На клеточном уровне дефицит карнитина обуславливает нарушение восстановления клеточных мембран и апоптоз [40].

Анаболическое действие карнитина обусловлено как стимуляцией под его влиянием энергообмена в клетках, так и повышением чувствительности тканей к инсулину [41] и облегчением реализации анаболических эффектов инсулина на клетки. Кроме того, показана способность карнитина при физических нагрузках стимулировать секрецию анаболических гормонов (тестостерона, инсулиноподобного фактора роста и др.) [42], что также обуславливает косвенный анаболический его эффект. В исследованиях на перепелах, которым со 2-го по 80-й день жизни вводили экзогенный карнитин с пищей, показано лучшее развитие скелетных мышц, в сравнении с контрольной группой, большая толщина мышечных волокон и меньшая толщина периферической эндомизии [43]. Этими же авторами [44] в другой серии экспериментов на перепелах установлено увеличение толщины перикарда, мышечных волокон и диаметра ядер кардиомиоцитов под действием экзогенной добавки карнитина, наиболее выраженный белково-стимулирующий эффект в клетках сердца отмечен при использовании карнитина в дозе 0,25 мг/мл в течение 5 дней подряд с 5-дневным интервалом (тогда как доза в 0,5 мг/мл оказывала менее выраженный анаболический эффект). Аналогичные результаты были получены другими специалистами [45] в исследованиях на курах: карнитин (100 мг/кг, 21 день) ускорял прибавку в весе за счет лучшего развития скелетной мышечной ткани.

Эффекты карнитина на углеводный и липидный обмен. L-карнитин усиливает утилизацию глюкозы периферическими тканями за счет увеличения активности гликолитических и гликонеоэргетических ферментов [46], уменьшает степень гипертриглицеридемии [47], что может быть полезно при СД I и II типов. В экспериментах на крысах с моделью СД показана способность карнитина уменьшать инсулинорезистентность и толерантность к глюкозе, а также выраженность окислительного стресса [48], ослаблять выраженность диабетической полинейропатии [49]. Модельный метаанализ по влиянию L-карнитина (2 г/сутки) на гликемический статус у пациентов с СД II типа показал, что для проявления гипогликемического эффекта карнитина требуется длительное время – не менее 36 недель, а для снижения уровня гликозилированного гемоглобина (HbA1c) – еще более длительный период применения (более 106 недель) [50]. Снижение инсулинорезистентности под действием карнитина может быть обусловлено улучшением стимулированной инсулином утилизации глюкозы [51].

Карнитин участвует в переносе ацил-КоА из цитоплазмы в митохондрии, где он превращается в ацетил-КоА, который подвергается окислению в цикле трикарбоновых кислот и может использоваться для синтеза жирных кислот, холестерина и кетоновых тел. Как следствие, он имеет отношение к регуляции соотношения ацетил-КоА / КоА в митохондриях и удалению ацетил-КоА из митохондрий, что играет важную роль в детоксикации ацетил-КоА при различных патологических состояниях и наследственных заболеваниях, участвует в цикле трикарбоновых кислот, кетогенезе и глюконеогенезе, способствует накоплению энергии внутри клетки и переносу ее между органеллами [9]. Облегчая транспорт длинноцепочечных свободных жирных кислот (СЖК) в митохондрии клеток, L-карнитин делает их доступными для β -окисления. Кроме того, карнитин способствует окислению среднецепочечных СЖК, происходящему в цитозоле клеток [9].

Карнитин приводит к снижению массы тела у тучных людей благодаря стимуляции окисления СЖК в клетках [52] и усилению липолиза в жировой ткани, опосредованного модуляцией им активности глюкокортикоидных рецепторов [53]. И, действительно, в некоторых исследованиях показана эффективность карнитина в ослаблении тяжести метаболического синдрома у детей (500 мг/сутки, на протяжении 1 месяца) [54], уменьшении количества висцерального жира у взрослых больных с ожирением и метаболическим синдромом [48, 55], снижении уровня общего холестерина в крови и повышении содержания ЛПВП [56], улучшении липидного профиля крови у пациентов, проходящих гемодиализ [57]. В сравнительно недавних исследованиях [58] показано, что прием L-карнитина в дозе 1–2 г/сутки в течение 5–12 недель сопровождался повышением его концентрации в плазме крови и улучшением показателей антиоксидантного статуса; продолжительный прием L-карнитина в дозе 2–3 г/сутки у пациентов с дислипидемиями, СД и сердечно-сосудистыми заболеваниями приводил к улучшению липидного профиля плазмы крови, гликемического контроля, оказывал противовоспалительное действие. Метаанализ 10 результатов клинических исследований эффективности L-карнитина (в дозе 2–3 г/сутки) для снижения индекса массы тела (ИМТ) у пациентов с СД II типа показал, что для достижения эффекта требовался прием препарата в течение не менее 12 недель [50]. Таким образом, большинство исследований свидетельствуют о том, что для проявления гиполипидемического эффекта L-карнитина требуется большая длительность его приема – не менее 12 недель, а клинически эффективные его дозы соответствуют или в два раза превышают верхний допустимый уровень потребления в составе

специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок [58]. Гиполипидемический эффект карнитина (300 мг/кг) установлен и у мышей, генетически склонных к развитию ожирения и потреблявших гиперкалорийный рацион [59], а также кроликов, получавших пищу с высоким содержанием холестерина [60]. В исследованиях других авторов [61] на животных показано, что увеличение концентрации карнитина в мышцах на 20 % предотвращало увеличение массы тела, вызванное углеводной диетой.

Вместе с тем, мнение специалистов относительно эффектов карнитина на жировой обмен неоднозначно. Клинические испытания достоверно не подтвердили эффективность использования карнитина для предотвращения ожирения [62]. В исследованиях некоторых авторов [63] установлено, что 12-недельный прием L-карнитина (в дозе 1 000 мг/сутки) женщинами с избыточной массой тела или ожирением с поликистозом яичников улучшал резистентность к инсулину, но не влиял на липидный профиль. Аналогично, метаанализ результатов клинических исследований по оценке влияния L-карнитина (в дозе от 300 до 2 000 мг/сутки) на функцию печени, липидный профиль, массу тела и индекс НОМА пациентов с неалкогольной жировой болезнью печени показал, что 12–24 недельный прием препарата снижал активность АСТ, АЛТ, уровень триглицеридов и индекс НОМА, но не влиял на активность γ GT, уровень холестерина ЛПНП и холестерина ЛПВП, а также ИМТ [64].

В некоторых работах [65, 66] установлено, что карнитин может способствовать синтезу проатерогенных метаболитов в организме – триметиламина, который в печени метаболизируется в триметиламин-N-оксид, повышающий риск развития атеросклероза и сердечно-сосудистых осложнений [65, 67]. В связи с этим парентеральное введение карнитина предпочтительнее перорального с целью предотвращения накопления потенциально токсичных метаболитов [68]. Кроме того, учитывая способность карнитина снижать инсулинорезистентность и выраженность ожирения, он является скорее антиатерогенным, чем проатерогенным фактором [10].

Детоксикационная функция карнитина заключается в выведении из организма в виде ацилкарнитина соединений, обладающих мембранотоксическим и ингибирующим активностью некоторых ферментов действием. В частности, карнитин, способствуя транспорту длинноцепочечных СЖК в митохондрии и удалению избытка их из цитозоля за пределы клеток, препятствует их накоплению в цитозоле клеток и проявлению токсического действия. Кроме того, карнитин связывает внутри митохондрий токсические продукты метаболизма жирных кислот, оказывающих мембранотоксическое действие и уменьшающих активностью некоторых ферментов [69].

Карнитин оказывает прямое и косвенное *антиоксидантное* и *противовоспалительное действие* [70]. Антиоксидантное его действие обусловлено целым рядом эффектов. Во-первых, карнитин выступает в роли ловушки радикалов, подавляет генерацию радикалов кислорода цитозольными и мембраносвязанными ферментами, образует комплексы с ионами железа и меди [71]. Во-вторых, он влияет на активность факторов транскрипции генов, контролирующих образование антиоксидантных ферментов, повышая активность и экспрессию супероксиддисмутазы и каталазы [72]. В-третьих, карнитин оказывает влияние на активность низкомолекулярных агентов, регулирующих состояние защитных генов, кодирующих образование антиоксидантных белков (белков теплового шока, сиртуинов, тиоредоксинов) [73]. В частности, карнитин способен оказывать влияние на активность следующих транскрипционных факторов: ядерного фактора κ B (NF- κ B), фактора-2, связанного с эритроидным ядерным фактором (Nrf2), рецепторов, активируемых пролифераторами

пероксисом (PPARs), активаторного белка-1 (AP-1) [74, 75]. При этом активация некоторых из этих факторов, а именно, сочетанное влияние внеклеточных киназ (ERK) и Nrf2 приводит к активации ядерного фактора дыхания 1, стимулирующего биогенез митохондрий [76, 77], что предопределяет и энерготропное действие карнитина.

В связи с антиоксидантным действием, карнитин уменьшает повреждение миокарда, вызванное ишемией–реперфузией [78], и рассматривается в качестве перспективного средства в улучшении восстановительного периода после острого инфаркта миокарда. В опытах *in vitro* было установлено, что высокие концентрации (10–80 мМ) карнитина и его производных выступали как прямые антиоксиданты в различных типах клеток: кардиомиоцитах, эндотелиальных клетках коронарных сосудов, макрофагах, мигрирующих в сердце моноцитах и нейтрофилах и других типах клеток миокарда [79]. Более низкие концентрации карнитина (0,1–100 мкМ) при длительной экспозиции *in vitro* также оказывали прямое антиоксидантное действие в отношении многих клеток, в том числе кардиомиоцитов и скелетных мышечных волокон [80].

В исследованиях на крысах с моделью гипергомоцистеинемии показана способность карнитина стабилизировать мембраны лизосом скелетных и гладких мышечных волокон [81], что также обуславливает его антиапоптотический эффект. Наконец, L-карнитин и его производные уменьшают апоптоз через митохондриальный путь [82], что может быть связано с подавлением трансдукции проапоптотического сигнала Fas и подавлением генерации церамида, который является эндогенным медиатором апоптоза [83]. Этот антиапоптотический эффект карнитина наблюдали в различных тканях и клетках: нейронах, кардиомиоцитах, гепатоцитах, клетках костного мозга, спинного мозга и митохондриях, клетках почечных канальцев [75]. В частности, установлена способность карнитина ослаблять синтез церамидов и активность каспаз 3 и 8 в кардиомиоцитах [84].

Противовоспалительное действие карнитина обусловлено не только его антиоксидантным эффектом, но и способностью увеличивать содержание PPAR α в ядре клеток, что защищает их от апоптоза [85, 86]. Кроме того, в опытах *in vitro* показана способность карнитина тормозить активность NF- κ B и снижать экспрессию белка iNOS, что также обуславливает его противовоспалительное действие [87]. Выявлена способность карнитина снижать экспрессию провоспалительных цитокинов TNF- α и IL-6 [88, 89], что отчасти может достигаться благодаря стимулирующему его влиянию на синтез ацетилхолина лимфоцитами [90], ослабляющего экспрессию провоспалительных цитокинов макрофагами селезенки.

Наконец, противовоспалительное действие карнитина может быть обусловлено его глюкокортикоид (ГК)-подобными эффектами. В частности, в высоких дозах карнитин может активировать α -ГК-рецепторы, вызывая торможение высвобождения TNF α и IL-12 из моноцитов и усиление эритропоэза [53]. Карнитин снижает связывающую способность α -ГК-рецепторов, вызывает их перемещение в ядро и стимулирует их транскрипционную активность, запуская некоторые ГК-подобные эффекты [53]. В частности, подобно глюкокортикоидам, карнитин стимулирует эритропоэз, оказывает противовоспалительное действие [91].

Энерготропное действие карнитина обусловлено его участием в углеводном и липидном обмене и соответственно поддержании энергетического гомеостаза клеток. Во-первых, карнитин стимулирует транспорт длинноцепочечных СЖК в митохондрии и последующее их использование в β -окислении, увеличивая их доступность для энергообмена в энергоемких органах [3, 92]. Это основной механизм действия

L-карнитин в условиях достаточного притока кислорода к тканям. Во-вторых, карнитин, замещая КоА, снижает отношение ацетил-КоА / свободный КоА и тем самым предотвращает инактивацию пируватдегидрогеназного комплекса [93], имеющую место, например, при интенсивной физической нагрузке, что способствует нормальному протеканию реакций этого комплекса и цикла трикарбоновых кислот [94] и в результате полному использованию глюкозы и снижению накопления лактата. В частности, при нагрузках высокой интенсивности карнитин обеспечивает нейтрализацию ацетил-КоА (превращается в ацетил-карнитин), что способствует сохранению активности пируватдегидрогеназы (ингибируется ацетил-КоА) и использованию лактата в качестве источника энергии (лактат превращается в пируват и подвергается дальнейшему окислению, что препятствует наступлению лактацидоза и утомлению). Как следствие, добавки с карнитином во время высокоинтенсивных тренировок увеличивают окисление глюкозы за счёт окисления жирных кислот [95]. Следовательно, применение L-карнитина позволяет уменьшить долю анаэробного лактатного энергообразования в скелетных мышцах и увеличить вклад более эффективной аэробной энергопродукции, что должно обусловить повышение работоспособности скелетных мышц в условиях интенсивных физических нагрузок.

В то же время уменьшение содержания свободного карнитина в скелетных мышцах (по причине его превращения в ацетил-карнитин) приводит к ослаблению транспорта длинноцепочечных СЖК в митохондрии и соответственно ослаблению окисления жирных кислот при интенсивных физических нагрузках (в качестве субстрата окисления используются преимущественно углеводы). В результате повышенного образования ацилкарнитина при интенсивных физических нагрузках уровень свободного карнитина в крови может снизиться. Физические нагрузки в таком случае приводят к дальнейшему снижению концентрации свободного карнитина в скелетных мышцах и появлению клинических симптомов [96]. В связи с этим широко обсуждается вопрос, целесообразен ли прием экзогенного карнитина для восстановления внутриклеточной его концентрации при интенсивных физических нагрузках. Между тем, установлено, что избыточное поступление карнитина в организм может привести к дальнейшему увеличению количества длинноцепочечных соединений ацилкарнитина, связанных с потенциально смертельными нарушениями сердечного ритма [97]. Кроме того, повышенная концентрация в клетках молекул длинноцепочечных СЖК, активированных под действием карнитина, в случае недостаточной оксигенации тканей тормозит транспорт АТФ из митохондрий в цитозоль и разобщает процессы окисления и фосфорилирования в дыхательной цепи митохондрий [98]. В связи с этим слишком высокие дозы экзогенного карнитина при физических нагрузках на фоне недостаточности кровообращения и соответственно оксигенации тканей могут оказать негативный эффект.

Карнитин и его эфир ацетилкарнитин как нейропротекторы. Карнитин и его метаболит ацетилкарнитин обладают *нейротрофическим* и *нейропротекторным* эффектами, которые достигаются благодаря различным механизмам их действия на нервную ткань. Во-первых, карнитин предотвращает апоптоз нейронов за счет нормализации энергообмена в митохондриях, ослабления свободнорадикальных процессов [99] и мембраностабилизирующего действия [9]. В частности, установлено, что карнитин защищает нейроны при ишемической гипоксии, связанной с запуском каскада эксайтотоксических реакций и накоплением в синаптической щели глутамата, активирующего NMDA-рецепторы, что вызывает вход кальция в нейроны и последующее их повреждение [100]. Во-вторых, в исследованиях *in vivo* установлено,

что эффект ацетилкарнитина на нервные клетки опосредован активацией пути NF- κ B и в частности, ацетилированием p65 и последующей активацией экспрессии рецептора 2 глутамата (mGlu2), при этом наблюдается увеличение количества нейронов в гиппокампе мышей [101]. В-третьих, установлена способность карнитина усиливать эффекты фактора роста нервов (NGF) [102] и стимулировать регенерацию периферических нервов [103], нейрогенез [104], синаптогенез, дифференцировку стволовых клеток в гиппокампе [104], формирование межнейронных связей, защищать мозг плода от токсических продуктов [105], ограничивать зону поражения и способствовать восстановлению структуры нервной ткани. Показана эффективность карнитина (500 мг/кг/сутки, перорально) в восстановлении ультраструктуры синаптических контактов и функциональной активности синаптической передачи в неокортексе мышей с моделью белковой недостаточности [106].

Карнитин способствует восстановлению мембран нейронов, предотвращая их апоптоз, улучшает метаболизм нервных клеток после периодов ишемии–реперфузии, положительно влияет на восстановление нарушенных рецепторных систем головного мозга [9]. Показана способность карнитина улучшать нейропатические проявления СД I типа у детей (в дозе 2 г/м² в сутки в течение 2 месяцев) [107]. Выявлена способность ацетилкарнитина улучшать проводимость в двигательных и чувствительных нервных волокнах, эндоневральное кровоснабжение, повышать активность Na⁺/K⁺-насоса, восстанавливать ретроградный аксоплазматический ток при диабетической нейропатии (отчасти это достигается за счет увеличения содержания жирных кислот в большеберцовых нервах) [108, 109]. В исследовании на культуре первичных нейронов коры мозга крыс показано снижение токсичности β -амилоидного белка под действием ацетилкарнитина в результате увеличения оксидативной стрессовой устойчивости клеток путем активации экспрессии белков теплового шока HO-1 и Hsp70 [110]. В экспериментах на крысах с моделью болезни Альцгеймера установлена способность ацетилкарнитина существенно уменьшать гиперфосфорилирование тау-белка и накопление β -амилоида, что обуславливает ослабление поведенческих расстройств [111]. Выявлена эффективность карнитина и у людей с нейродегенеративными расстройствами различного генеза: на ранних стадиях болезни Альцгеймера и сосудистой деменции [112], а также при умеренных когнитивных нарушениях сосудистого генеза [113].

Нейропротекторное действие карнитина проявляется и при гипераммониемии, обуславливающей снижение активности ацетилхолинтрансферазы, нарушение захвата холина в нейронах мозга, снижение количества M₁-холинорецепторов, дегенерацию холинергических нейронов [114]. Введение карнитина, начиная с первых дней беременности, мышам с гипераммониемией приводит к повышению активности ацетилхолинэстеразы в головном мозге у потомства [115].

В исследованиях на кроликах показана эффективность карнитина (30 мг/кг, в течение 10 дней) в ослаблении степени дегенерации мышечных волокон и разрастания соединительной ткани в денервированной скелетной мышце [116].

Для коррекции нервных патологий, как правило, применяют ацетилкарнитин, который лучше, чем карнитин, проникает через гематоэнцефалический барьер и может поставлять активированный ацетат непосредственно в матрикс митохондрий для последующего синтеза ацетил-КоА, не затрачивая при этом энергию, в отличие от карнитина. Из-за структурного сходства с ацетилхолином ацетилкарнитин обладает холиномиметическими и нейропротекторными свойствами [117], оказывает протективный эффект на функционирование нервно-мышечных синапсов, препятствует

ухудшению функционирования концевых пластинок при нарушении целостности седалищного нерва [118].

Ацетилкарнитин усиливает действие серотонина, а также защищает клетки мозга от нейротоксического эффекта глутамата [119], способен модулировать функцию не только холинергической, но и дофаминергической систем [120, 121]. Имеются данные о способности ацетилкарнитина повышать клеточную концентрацию аспартата, глутамата и таурина [122]. При длительном применении ацетилкарнитин увеличивает плотность NMDA-рецепторов в гиппокампе, коре и стриатуме и препятствует уменьшению их плотности в условиях старения [123].

Эффективность карнитина при физических нагрузках. В связи с энерготропным действием карнитина и тем, что он не является запрещенным допинговым средством [124], достаточно давно широко изучается его эффективность для повышения физической работоспособности, которая до сих пор носит дискуссионный характер. С одной стороны, применение карнитина в спортивной медицине обосновано фактом снижения его содержания в мышцах при интенсивных физических нагрузках и способностью экзогенно вводимого L-карнитина (4 мг/сутки, в течение 7 дней) в сочетании с физической нагрузкой повышать его запасы в мышцах и производительность при максимальных нагрузках [125]. Кроме того, карнитин, взаимодействуя с ацетил-КоА, способствует образованию ацетил-карнитина и КоА, необходимого для нормального течения метаболических процессов и предупреждения лактатацидоза [126]. Предупреждая накопление избытка ацетил-КоА в митохондриях скелетных мышц при физических нагрузках, карнитин предотвращает нарушение митохондриального окисления и снижение производительности скелетных мышц [127].

С другой стороны, данные относительно влияния экзогенно вводимого карнитина на физическую работоспособность и выносливость весьма противоречивы: от существенного ее [128, 129] или незначительного [130] улучшения до отсутствия существенных изменений [15, 131]. Отчасти это может быть связано с разными режимами приема карнитина: кратковременным и длительным, в разных дозах и разными способами введения в организм, разным временем введения по отношению к тренировкам, а также разной степенью физической подготовки или состояния испытуемых, разными типами тренировок. Так, в исследованиях на людях установлено, что краткосрочный приём добавок с карнитином в дозе от 3 до 4 г/сутки за 60–90 минут до тестирования или долгосрочный прием добавок с карнитином в дозе от 2 до 2,72 г в сутки в течение 9–24 недель улучшил результаты высокоинтенсивных тренировок, но не повлиял на результаты тренировок средней интенсивности [132]. Выявлено также, при пероральном приеме биодоступность карнитина составляет всего 5–15 %, а при повышении его концентрации в крови параллельно возрастает его экскреция с мочой [23, 133]. На самом деле, после однократного приема большого количества карнитина большая его часть выводится с мочой [134]. Учитывая общее содержание карнитина в организме (около 20 г) [135], низкую его биодоступность и большое количество карнитина, выводимого с мочой после приема, для реального увеличения количества мышечного карнитина у здоровых людей следует принимать очень высокие его дозы в течение длительного времени. Кроме того, чистый оборот карнитина в мышцах намного ниже, чем в других тканях [136]; эта особенность делает мышцы, в отличие от других органов, особенно невосприимчивыми к добавкам карнитина. Кроме того, необходимо учитывать, что в физиологических условиях карнитин транспортируется в мышцах против градиента концентрации и что переносчик OCTN2, имеющий значение

Km (3–5 мкМ) ниже концентрации карнитина в плазме (30–50 мкМ), насыщается при физиологических концентрациях карнитина [137, 138].

Таким образом, маловероятно, что повышенная концентрация карнитина в плазме крови может привести к более активному транспорту карнитина в мышцах. Исходя из этих соображений, можно предположить, что пероральный прием карнитина практически не повлияет на содержание карнитина в мышцах человека и, следовательно, на мышечный метаболизм. Действительно, исследования показали, что даже если длительный прием карнитина человеком повышает концентрацию карнитина в плазме крови, это не увеличивает его содержание в мышцах [23].

Вместе с тем, установлено, что отчасти эффект экзогенно вводимого карнитина на скелетные мышцы может достигаться за счет его влияния на тонус сосудов (посредством модуляции функции эндотелия) и уровень их кровоснабжения. Выявлено, в частности, что сократительная сила мышц у собак значительно увеличивалась и сопровождалась повышением кровотока после введения карнитина и при отсутствии увеличения содержания карнитина в мышцах. Этот результат был обусловлен воздействием на кровеносные сосуды, окружающие мышцы [139]. Таким образом, эти исследования показали, что эффект карнитина не зависит от его накопления в мышцах и выработки энергии. Перекрестное исследование подтвердило, что 3-недельное применение добавок с карнитином увеличило, по сравнению с плацебо, постпрандиальную дилатацию плечевой артерии, опосредованную кровотоком [140].

Исследования некоторых специалистов указывают в пользу позитивных эффектов карнитина на нервно-мышечный аппарат: более экономное под его влиянием расходование гликогена и увеличение его запасов в печени и мышцах, повышение порога резистентности к физической нагрузке, уменьшение степени лактатацидоза и более быстрое восстановление работоспособности после длительных физических нагрузок. В экспериментах на животных установлена способность L-карнитина оказывать анаболическое действие, способствовать гипертрофии мышц в условиях физической активности, снижать утомление [141], повышать аэробную производительность [142]. В исследованиях на людях показано, что прием карнитина (2 г/сутки, на протяжении 21 дня) спортсменами приводил к уменьшению содержания креатинфосфокиназы и триглицеридов в плазме крови, повышению физической работоспособности и более быстрому восстановлению гемодинамических параметров после физической нагрузки [143]. Карнитин (в дозе 30–50 мг/кг/сутки для здоровых детей и 75–100 мг/кг/сутки для детей с признаками ремоделирования сердца) улучшал физическую работоспособность и переносимость нагрузок, уменьшал степень лактатацидоза после физической нагрузки, обуславливал меньшую степень увеличения частоты сердечных сокращений и артериального давления у спортсменов на пике физической нагрузки, по сравнению с исходной степенью этого повышения [144]. Кроме того, карнитин улучшает восстановление скелетных мышц после физических нагрузок за счет вазодилатации, антиоксидантного эффекта и усиления продукции тромбоцитами тромбоцитарного фактора роста [62, 126], повышает физическую работоспособность отчасти за счет стимуляции эритропоэза [127].

При этом выявлено, что эргогенный эффект карнитина проявляется только при достаточно длительном (от 2-х недель [126] до 1 месяца [141]) применении в дозе 2–5 г/сутки [126, 141], а в некоторых работах показано, что положительное влияние экзогенно вводимого карнитина на скелетные мышцы реализуется в присутствии высокого содержания инсулина [145], которое может достигаться введением сывороточных белков, стимулирующих секрецию инсулина [146].

В то же время в некоторых исследованиях не было установлено положительного влияния L-карнитина на увеличение работоспособности скелетных мышц, образование лактата и повышение парциального напряжения кислорода. Так, в экспериментах *in vivo* на лабораторных животных карнитин, несмотря на свою высокую биодоступность, не повышал физическую работоспособность [147]. Но в этих работах L-карнитин применялся либо очень короткими курсами (однократно или в течение 5–7 суток), либо в невысоких дозах – 1–2 г/сутки.

Поскольку карнитин уменьшает использование аминокислот в качестве источника энергии во время физических нагрузок, он повышает их доступность для синтеза нового белка [138] и соответственно уменьшает степень повреждения скелетных мышц после нагрузок. Кроме того, добавки с карнитином, уменьшая окислительный стресс [138, 148] и повышая уровень рецепторов андрогенов в мышцах [138], могут улучшать их восстановление после тренировок. Так, в экспериментах на собаках показано, что тренировки с добавлением карнитина сопровождались меньшей степенью протеолиза в организме, чем обычные физические нагрузки [148]. В исследованиях на людях также установлено, что в течение 24 часов после применения L-карнитина уменьшается содержание в плазме крови маркеров мышечного повреждения – креатинфосфокиназы, миоглобина и лактатдегидрогеназы [138, 149]. В исследованиях на крысах, подвергавшихся динамической физической нагрузке (принудительное плавание с грузом 10% от массы тела до полного утомления) и получавших карнитин (100 мг/кг, внутривенно, в течение 21 дня), установлено, что карнитин существенно ослабил выраженность деструктивных изменений в быстрой (подошвенная) и медленной (камбаловидная) мышцах, в том числе, уменьшил долю поврежденных митохондрий в мышечных волокнах быстрой (подошвенной) мышцы, что отчасти может быть связано с меньшей степенью лактатацидоза, отека и окислительного стресса в них и соответственно меньшей степенью повреждения мембран [150]. Известно, что L-карнитин ограничивает накопление ацетил-КоА и лактата в крови и мышечной ткани и способствует сохранению целостности мембран [138, 141, 151, 152], уменьшает окислительный стресс, увеличивая активность антиоксидантных ферментов, а также может предотвратить индукцию апоптоза [153, 154], оказывает протекторный эффект в отношении структуры и функции митохондрий [124, 151, 152]. Все эти эффекты карнитина могут быть полезными для уменьшения степени повреждения скелетных мышц при физических нагрузках.

Показана способность карнитина уменьшать выраженность гипертрофии мышечных волокон как медленного, так и быстрого типа при динамической физической нагрузке в течение 20 суток [155].

Применение карнитина в кардиологии. Согласно некоторым данным [156], применение L-карнитина приводит к достоверному снижению кардиальной смертности и с высокой степенью достоверности – к уменьшению частоты возникновения желудочковых аритмий и стенокардии. В то же время, в исследовании на людях, перенесших инфаркт миокарда, показано снижение частоты ранней летальности после инфаркта миокарда, но при этом отсутствие уменьшения частоты поздней летальности при применении карнитина (9 г/сутки, внутривенно, в первые 5 дней и 4 г/сутки, перорально, в течение 6 месяцев) [157]. Отчасти авторы связывают отсутствие уменьшения частоты поздней летальности после инфаркта миокарда у пациентов, принимавших карнитин, с относительно низкой его дозой – 4 г/сутки, перорально.

Показана эффективность карнитина при лечении кардиомиопатий у детей (идиопатических и диабетических, в дозах 50–200 мг/кг/сутки в течение 3–6 месяцев и

более) [158], в уменьшении степени постинфарктного некроза (2 г/сутки, перорально, на протяжении 28 дней) [159] и постинфарктного ремоделирования, особенно у пациентов с исходно сниженной фракцией выброса [160], степени ухудшения сократительной функции сердца после перенесенного инфаркта миокарда [160] и улучшении переносимости физических нагрузок у пациентов со стенокардией (2 г/сутки, на протяжении 6 месяцев) [161]. При этом положительный эффект карнитина на сердце, кроме его эрготропного эффекта, обусловлен тем, что он не угнетает параметры гемодинамики, способствует повышению антиокислительной активности плазмы крови и нормализует содержание катехоламинов в миокарде, что косвенно подтверждает нетрадиционный механизм его антиаритмического действия [39]. Кроме того, в условиях ишемии миокарда L-карнитин предотвращает накопление эфиров жирных кислот, которое может приводить к возникновению фатальных желудочковых аритмий [162]. Благодаря антиоксидантному действию карнитин тормозит образование пероксинитрита, тем самым увеличивая биодоступность NO – ключевого вазодилататора, тем самым снижая нагрузку сопротивлением на сердце при инфаркте миокарда [71].

Перспективы применения карнитина и его эфира у людей с различными патологиями. Несмотря на противоречивость результатов исследований относительно эффективности экзогенно вводимого карнитина на животных моделях и условно здоровых людях, он может оказаться весьма полезным при определенных патологиях, прежде всего, вызванных первичной или вторичной недостаточностью карнитина, нарушением его метаболизма и расстройствами энергообмена, в том числе митохондриальными дисфункциями. Так, в исследованиях на людях показано, что прием карнитина в дозе 100 мг/кг в сутки в течение 4 недель приводит к значительному улучшению переносимости физических нагрузок у пациентов с субклиническим дефицитом ацетил-КоА-дегидрогеназы среднепочечных жирных кислот [163]. Выявлена эффективность экзогенно вводимого карнитина при миодистрофиях Беккера и Дюшена, сопровождающихся вторичной его недостаточностью, что, вероятнее всего, достигается за счет улучшения митохондриального окисления [164–166]. Аналогично, положительный эффект карнитина на сердечно-сосудистую систему особенно выражен в случае его исходной недостаточности в организме [167]. Установлена эффективность карнитина (3 г/сутки, парентерально) в улучшении функции скелетных мышц и предотвращении потери их массы у больных, находящихся на гемодиализе, у которых возникает вторичная недостаточность карнитина [168]. В исследованиях на мышцах с моделью раковой кахексии показано, что добавление L-карнитина (5 мг/кг, внутривенно) уменьшило вызванное раком снижение силы хвата и площади коллагеновых волокон в икроножной мышце и подавило экспрессию белка COL1A1 и альфа-гладкомышечного актина (α -SMA), которые являются маркерами раковой кахексии и миофибробластов; при этом карнитин способствовал убиквитинированию фактора Runx2 (который является стимулятором экспрессии COL1A1 и COL1A2) и повышению экспрессии DTX3L (подавляющего экспрессию Runx2); все это способствовало уменьшению экспрессии факторов, способствующих раковой саркопении [169].

Показана эффективность карнитина (в дозе 2 579 мг/кг, внутривенно) в уменьшении степени гипераммониемии, вызванной введением циклофосфана, и выраженности неврологических расстройств [170]. Установлен гепатопротекторный эффект карнитина [59, 171], весьма полезный при жировой неалкогольной инфильтрации печени, в том числе вызванной метаболическим синдромом [172] и генетически обусловленным ожирением на фоне гиперкалорийной диеты.

В исследованиях на мышах с 70 % резекцией печени показана эффективность карнитина в уменьшении содержания жировых клеток в гепатоцитах и улучшении регенерации печени, что может быть связано с улучшением под влиянием карнитина липидного обмена и уменьшением асептического воспаления, вызванного чрезмерным накоплением липидов [173]. Обнаружена способность карнитина препятствовать развитию жирового перерождения печени и при алкогольной интоксикации [174]. Карнитин восстанавливает активность цитохром-С-оксидазы в дыхательной цепи митохондрий гепатоцитов, экспрессию мРНК этого фермента и соотношение холестерина – фосфолипид в мембране митохондрий, а также продукцию АТФ [175].

В экспериментах на крысах установлено, что длительное введение карнитина (50 мг/кг на протяжении 7 месяцев, внутривенно) сопровождалось повышением его содержания в тканях крыс, снижением концентрации каспазы-3, повышением содержания антиапоптотического белка Bcl-2 и уменьшением проапоптотического белка Bax, снижением содержания активных форм кислорода в различных органах крыс (почках, печени, желудке и яичках) [176], что указывает в пользу потенциальной эффективности карнитина для уменьшения как окислительного, так и апоптотического процесса в периферических органах. Установлено позитивное влияние карнитина на процессы почечной репарации у недоношенных детей с повреждением почек, вызванным гипоксией [177].

Установлено, что предварительное назначение хлорида карнитина в дозе 300 мг/кг перед введением L-NAME в дозе 25 мг/кг нормализует гомеостаз карнитина, предотвращает снижение концентрации метаболитов NO и снижает концентрацию неэтерифицированных жирных кислот, а также достоверно повышает активность супероксиддисмутазы и сукцинатдегидрогеназы в митохондриях кардиомиоцитов крыс, что указывает в пользу предотвращения под действием карнитина митохондриальной дисфункции [178]. В то же время, в исследованиях на крысах обнаружена способность карнитина (300 мг/кг) повышать активность лизосомальных протеиназ в скелетной мускулатуре (большеберцовая мышца крыс) – катепсинов В и L [179], что может быть связано с возможной активацией под действием карнитина iNO-синтазы [180], обладающей цитотоксическим эффектом. Данный факт указывает в пользу потенциальной безопасности высоких доз карнитина (более 100 мг/кг для мелких грызунов) для мышечной ткани.

Показана эффективность карнитина (0,3–2 г/сутки) при периферическом атеросклерозе, сопровождающемся перемежающейся хромотой [181, 182]. Установлена связь мужского бесплодия с дефицитом карнитина в эпидидимисе и улучшение под влиянием карнитина качества спермы [183].

Перспективы использования карнитина в геронтологии. Несмотря на неоднозначные данные относительно эффективности карнитина у молодых условно здоровых людей, он может оказаться полезным для возрастных индивидов, что обусловлено снижением его содержания в тканях с возрастом [184]. Установлено, что добавка в пищевой рацион старых крыс карнитина повышает его уровень в тканях и нивелирует ряд возрастных изменений в функционировании митохондрий печени, сердечной и скелетных мышц [185, 186], уменьшает окислительный стресс [187]. В сердце L-ацетил-карнитин путем восстановления содержания кардиолипина может ослаблять возрастное снижение активности ацетил-карнитинтрансферазы и некоторых других митохондриальных ферментов, что предотвращает возрастное нарушение метаболизма жиров в кардиомиоцитах [188]. Установлена способность ацетилкарнитина восстанавливать плотность рецепторов к нейротрофическому фактору NGF в

холинергических нейронах головного мозга [189], что обуславливает полноценную реализацию эффектов NGF на них и ослабляет нейродегенеративные процессы, вызванные старением. Показано, что ацетилкарнитин путем повышения активности холинтрансферазы обуславливает улучшение когнитивных функций и обучаемости у крыс как с моделью нейродегенеративной патологии, так и в связи со старением [190]. В исследованиях на крысах установлено, что карнитин препятствует возрастной дегенерации мышечных волокон II типа (быстрых) [191].

В то же время следует учитывать, что при метаболизме карнитина кишечной микробиотой образуется триметиламин, который затем преобразуется в печени в атерогенный триметиламин-N-оксид [65, 192–194]. В некоторых исследованиях установлено, что пищевые добавки с карнитином могут значительно повысить уровень триметиламин-N-оксида в сыворотке крови как у людей, так и у грызунов [195], в связи с чем благотворное их влияние является спорным и заслуживает большего внимания.

Метаанализ результатов 11 исследований показал, что прием здоровыми людьми L-карнитина в дозе 1–4 г/сут в течение 12–24 недель повышал общее содержание L-карнитина в скелетных мышцах, не влиял на мышечную силу у здоровых пожилых женщин, но значительно увеличил мышечную массу, улучшил переносимость физических нагрузок и когнитивные функции, но при этом и повысил уровень проатерогенного метаболита триметиламин-N-оксида в плазме крови натошак [196].

Кроме того, пероральный прием карнитина у животных с дефектами фермента длинноцепочечной ацил-КоА-дегидрогеназы может привести к значительному накоплению в скелетных мышцах соединений ацилкарнитина, что может вызвать нарушение сердечного ритма, приводящее к летальному исходу [97].

Заключение. Карнитин – биологически активное вещество метаболитного действия с хорошим профилем безопасности, аналог естественного эндогенного вещества карнитина, играющего ключевую роль в клеточном метаболизме [23]. Участвуя в транспорте длинноцепочечных СЖК в митохондриях клеток и тем самым стимулируя β -окисление в них, он используется как средство энерготропной терапии [9, 197]. Кроме того, карнитин оказывает антиоксидантное [70, 72], антигипоксическое, дезинтоксикационное [33, 69], гиполипидемическое [174], мембраностабилизирующее [138, 151, 152], антиапоптотическое [153, 154, 176], анаболическое [30–32, 138] и стабилизирующее митохондрии [151, 152] действие, регулирует активность пируватдегидрогеназного комплекса в клетках, способствуя эффективному использованию углеводов в процессе энергообмена и предотвращая лактацидоз при высокой его интенсивности [94].

Установлена эффективность карнитина и ацетилкарнитина в компенсации полинейропатии при СД [49], различных нейродегенеративных расстройств [101, 111–113], наследственных миодистрофий [164–166], кардиомиопатии [178, 179], раковой саркопии [169], с целью гепатопротекции [59, 171, 173], ослабления метаболического синдрома [48, 55, 59, 172], периферического атеросклероза [181, 182], возрастных изменений митохондрий в скелетной и сердечной мышцах [185, 186], повреждения скелетных мышц при физических нагрузках [150], проявлений гипераммониемии [170].

При этом большинство исследований свидетельствуют о том, что для проявления полезных эффектов карнитина (гиполипидемического, антиоксидантного, эргогенного, кардиопротекторного и др.) требуется большая длительность его приема – не менее 12 недель, а клинически эффективные его дозы соответствуют или в два раза превышают верхний допустимый уровень потребления в составе специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок [58]. В то же время известно,

что при приеме карнитина в фармакологических дозах – 2–6 г/сутки – его биодоступность существенно снижается (до 15–6 % соответственно), в сравнении с приемом в обычной суточной дозе (около 200–500 мг/сутки). В некоторых исследованиях [195] установлено, что пищевые добавки с карнитином могут значительно повысить уровень триметиламин-N-оксида в сыворотке крови как у людей, так и у грызунов, в связи с чем целесообразность длительного применения фармакологических доз карнитина, особенно при пероральном введении, требует тщательного обоснования.

Установлено также, что слишком высокие дозы экзогенного карнитина при физических нагрузках на фоне недостаточности кровообращения и соответственно оксигенации тканей могут оказать негативный эффект. Данные относительно влияния экзогенно вводимого карнитина на физическую работоспособность и выносливость весьма противоречивы: от существенного их [128, 129] или незначительного улучшения [130] до отсутствия существенных изменений [15, 131].

Несмотря на противоречивость результатов исследований относительно эффективности экзогенно вводимого карнитина на животных моделях и условно здоровых людях, он может оказаться весьма полезным при определенных патологиях, прежде всего, вызванных первичной или вторичной недостаточностью карнитина, нарушением его метаболизма и расстройствами энергообмена, в том числе митохондриальными дисфункциями, а также у возрастных пациентов, у которых зачастую развиваются вторичные митохондриальные дисфункции. При этом для уменьшения возможного проатерогенного эффекта карнитина предпочтительным является парентеральный способ его введения в организм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bene J., Szabo A., Komlósi K., Melegh B. Mass spectrometric analysis of L-carnitine and its esters: potential biomarkers of disturbances in carnitine homeostasis // *Curr. Mol. Med.* – 2020. – V. 20, No 5. – P. 336–354.
2. Ilceto M., Stensen M.H., Andersen J.M., Haugen T.B., Witczak O. Levels of L-carnitine in human seminal plasma are associated with sperm fatty acid composition // *Asian J. Androl.* – 2022. – V. 24, No 5. – P. 451–457.
3. Rebouche C.J. Carnitine // Shils M.E., Shike M., Ross A.C., Caballero B., Cousins R.J., eds. *Modern Nutrition in Health and Disease*. – 10th ed. – Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, 2006. – P. 537–544.
4. Хорошилов И. Карнитин: роль в организме и возможности терапевтического применения при разных заболеваниях // *Врач.* – 2017. – № 3. – С. 2–6.
5. Rasanu T., Mehedinti-Hvncu M., Alexianu M., Mehedinti T., Gheorghe E., Damian I. Carnitine deficiency. *Rom. J. Morphol. Embryol.* – 2012. – V. 53, No 2. – P. 203–206.
6. Дамброва М., Макрецкая М., Вилшкерстс Р., Кука Я., Лиепиньш Э. Карнитин как маркер атеросклероза и других рисков развития сердечно-сосудистых заболеваний // *Кардиология.* – 2014. – № 7. – С. 91–96.
7. Яковлева Л.В., Безчаснюк Е.М., Улесов А.В., Шаповал О.Н., Хомякова Л.Г., Зборовская Т.В. L-карнитин: свойства, препараты, медицинское применение // *Український журнал клінічної та лабораторної медицини.* – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 17–24.
8. Ramsay R.R., Gandour R.D., van der Leij F.R. Molecular enzymology of carnitine transfer and transport. *Biochim. // Biophys. Acta.* – 2001. – V. 1546. – P. 21–43.
9. Захарова И.Н., Творогова Т.М. Возможности применения препаратов карнитина в педиатрической практике // *Российский вестник перинатологии и педиатрии.* – 2008. – № 4. – С. 88–93.
10. Johri A.M. Carnitine therapy for the treatment of metabolic syndrome and cardiovascular disease: Evidence and controversies // *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Dis.* – 2014. – V. 24, No 8. – P. 808–814.
11. Sharma S., Sun X., Agarwal S., Rafikov R., Dasarathy S., Kumar S., Black S.M. Role of carnitine acetyl transferase in regulation of nitric oxide signaling in pulmonary arterial endothelial // *Cells. Int. J. Mol. Sci.* – 2013. – V. 14, No 1. – P. 255–272.

12. Gatti R., De Palo C.B., Spinella P., De Palo E.F. Free carnitine and acetyl carnitine plasma levels and their relationship with body muscular mass in athletes // *Amino Acids*. – 1998. – V. 14, No 4. – P. 361-369.
13. Подобед В.М. Карнитин в лечении острых и хронических форм ишемической болезни // *Кардиология в Беларуси*. – 2015. – Т. 40, № 3. – С. 154-164.
14. Demarquoy J., Georges B., Rigault C., Royer M.C., Clairet A., Soty M., Le Borgne F. Radioisotopic determination of L-carnitine content in foods commonly eaten in Western countries // *Food Chem.* – 2004. – V. 86, No 1. – P. 137-142.
15. Novakova K., Kummer O., Bouitbir J., Stoffel S.D., Hoerler-Koerner U., Bodmer M., Roberts P., Urwyler A., Ehrensam R., Krähenbühl St. Effect of L-carnitine supplementation on the body carnitine pool, skeletal muscle energy metabolism and physical performance in male vegetarians // *Eur. J. Nutr.* – 2016. – V. 55, No 1. – P. 207-217.
16. Баймеева Н.В., Птицина С.Н., Мирошниченко И.И. L-карнитин в свете психоневрологических заболеваний // *Психиатрия*. – 2016. – № 3. – С. 92-97.
17. Wang S. Primary carnitine deficiency cardiomyopathy // *Intern. J. of Cardiol.* – 2014. – V. 174, No 1. – P. 171-173.
18. Bruzell E., Steffensen I.-L., Granum B., Hetland R., Husøy T., Rohloff J., Wicklund T. Risk Assessment of “Other Substances”-L-Carnitine and L-Carnitine-L-Tartrate. Opinion of the Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids. In Materials in Contact with Food and Cosmetics of the Norwegian Scientific Committee for Food Safety. – Oslo: VKM, 2015. – 47 p.
19. Ronald R., Preedy W., Preedy V.R. Chapter 6. Adverse Effects and Toxicity of Nutraceuticals. In book «Reviews in Food and Nutrition Toxicity, Volume 3». – CRC Press, 2005. – 342 p.
20. Roe C.R., Millington D.S., Kahler H., eds. Fatty acid oxidation: Clinical Biochemical and Molecular Aspects. – A.R. Liss. Inc., 1990. – P. 383-402.
21. Wachter S., Vogt M., Kreis R., Boesch Ch., Bigler P., Hoppeler H., Krähenbühl St. Long-term administration of L-carnitine to humans: effect on skeletal muscle carnitine content and physical performance // *Clin. Chim. Act.* – 2002. – V. 318, No 1-2. – P. 51-61.
22. Балыкова Л.А., Солдатов О.М., Ивянский Л.А., Ферапонтова О.В. Обоснование использования L-карнитина в спортивной медицине // *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. – 2010. – № 5. – С. 90-97.
23. Evans A.M., Fornasini G. Pharmacokinetics of L-carnitine // *Clin. Pharmacokinet.* – 2003. – V. 42. – P. 941-967.
24. Hathcock J.N., Shao A. Risk assessment for carnitine // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* – 2006. – V. 46. – P. 23-28.
25. Todesco L., Bur D., Brooks H., Török M., Landmann L., Stieger B., Krähenbühl S. Pharmacological manipulation of L-carnitine transport into L6 cells with stable overexpression of human OCTN2 // *Cell. Mol. Life Sci.* – 2008. – V. 65, No 10. – P. 1596-1608.
26. Ingoglia F., Visigalli R., Rotoli B.M., Barilli A., Riccardi B., Puccini P., Dall'Asta V. Functional activity of L-carnitine transporters in human airway epithelial cells // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2016. – V. 1858. – P. 210-219.
27. Kou L., Sun R., Ganapathy V., Yao Q., Chen R. Recent advances in drug delivery via the organic cation/carnitine transporter 2 (OCTN2/SLC22A5) // *Expert Opin. Ther. Targets.* – 2018. – V. 22, No 8. – P. 715-726.
28. Couturier A., Ringseis R., Most E., Eder K. Pharmacological doses of niacin stimulate the expression of genes involved in carnitine uptake and biosynthesis and improve the carnitine status of obese Zucker rats // *BMC Pharmacol. Toxicol.* – 2014. – V. 15. – P. 37.
29. Benvenga S. Effects of L-carnitine on thyroid hormone metabolism and on physical exercise tolerance // *Horm. Metab. Res.* – 2005. – V. 37, No 9. – P. 566-571.
30. Балыкова Л.А., Ивянский С.А., Солдатов Ю.О., Широкова А.А., Щекина Н.В., Урзьева А.Н. L-карнитин как средство повышения адаптации и коррекции дисфункций организма подростков в ходе интенсивных физических нагрузок // *Практическая медицина*. – 2014. – Т. 9, № 85. – С. 19-25.
31. Frenkel R. Carnitine Biosynthesis Metabolism and Functions. – 1-st ed. – Elsevier, 2012.
32. Rebouche C.J. L-Carnitine. Present Knowledge in Nutrition. – 5-th ed. – 2012. – P. 391-404.
33. Chiechio S., Canonico P., Grilli M. L-Acetylcarnitine: A Mechanistically Distinctive and Potentially Rapid-Acting Antidepressant Drug // *Int. J. Mol. Sci.* – 2018. – V. 19, No 11. – P. 11-13.
34. Seim H., Eichler K., Kleber H. L-carnitine and its precursor, gammabutyrobetaine. Nutraceuticals in Health and Disease Prevention. – New York: Marcel Dekker inc., 2001. – P. 217-256.
35. Coelho C.F., Mota I.F., Braganca E., Burini R.C. Aplicacoes clinicas da suplementation de L-carnitina // *Rev. Nutr.* – 2005. – V. 18. – P. 651-659.
36. Gruber I., Schaffer S., Halliwell B. The mitochondrial free radical theory of ageing. Where do we stand? // *Frontiers in Bioscience.* – 2008. – V. 13. – P. 6554-6579.
37. Bagetta V., Barone I., Ghiglieri V. Acetyl-L-Carnitine selectively prevents post-ischemic LTP via a possible action on mitochondrial energy metabolism // *Neuropharmacology*. – 2008. – V. 55, No 2. – P. 223-229.

38. Crill C.M., Wanug B., Storm M.C., Helms R.A. Carnitine: a conditionally essential nutrient in the neonatal population? // *J. Pediatr. Pharmacol. Ther.* – 2001. – V. 6. – P. 225-236.
39. Балыкова Л.А. Результаты и перспективы использования средств энерготропной терапии в педиатрии на примере L-карнитина // *Вопросы практической педиатрии.* – 2009. – Т. 4, № 2. – С. 49-55.
40. Кузин В.М. Карнитина хлорид (25 лет в клинической практике) // *РМЖ.* – 2003. – № 10. – С. 609-610.
41. Savica V., Calvani M., Benatti P., Santoro D., Monardo P., Peluso G., Bellinghieri G. Carnitine system in uremic patients. Molecular and clinical aspects // *Semin. Nephrol.* – 2004. – V. 24, No 5. – P. 464-468.
42. Kraemer W.J., Volek J.S., French D.N., Rubin M.R., Sharman M.J., Gómez A.L., Ratamess N.A., Newton R.U., Jemiole B., Craig B.W., Häkkinen K. The effects of L-carnitine L-tartrate supplementation on hormonal responses to resistance exercise and recovery // *J. Strength. Cond. Res.* – 2003. – V. 17, No 3. – P. 455-462.
43. Клетикова Л.В., Пронин В.В., Каминская А.А. Влияние карнитин-содержащего комплекса на морфоструктуру мышечной ткани японских перепелов // *Ветеринария и кормление.* – 2021. – № 6. – С. 24-27.
44. Клетикова Л.В., Пронин В.В., Каминская А.А. Влияние карнитин-содержащей добавки на морфоструктуру сердца перепелов японской породы // *Ветеринарный журнал Беларуси.* – 2022. – Т. 1, № 16. – С. 45-49.
45. Щитковская Т.Р. Влияние хелатных комплексов и L-карнитина на качество мяса // *Уч. записки КГАВМ.* – 2011. – Т. 206. – С. 286-292.
46. Sima A.A., Calvari M., Mehra M., Amato A. Acetyl-L-Carnitine Study Group. Acetyl-L-carnitine improves pain, nerve regeneration, and vibratory perception in patients with chronic diabetic neuropathy: an analysis of two randomized placebocontrolled trials // *Diabetes Care.* – 2005. – V. 28. – P. 89-94.
47. Титов В.Н. Функция митохондрий, карнитин, коэнзим А, жирные кислоты, глюкоза, цикл Рендела и инсулин (Лекция) // *Клиническая лабораторная диагностика.* – 2012. – № 2. – С. 32-42.
48. Zhang J., Wu Z., Cai Y., Ke B., Huang Y.-J., Qiu Ch.-p., Yang Yu-b., Shi L.-y., Qin J. L-carnitine ameliorated fasting-induced fatigue, hunger, and metabolic abnormalities in patients with metabolic syndrome: a randomized controlled study // *Nutrition.* – 2014. – V. 26, No 13. – P. 110.
49. Marycz K. Influence of functional nutrients on insulin resistance in horses with equine metabolic syndrome // *Pak. Vet. J.* – 2014. – V. 34. – P. 189-192.
50. Wang D.D., Wang T.Y., Yang Y., He S.M., Wang Y.M. The Effects of L-Carnitine, Acetyl-L-Carnitine, and Propionyl-L-Carnitine on Body Mass in Type 2 Diabetes Mellitus Patients // *Front. Nutr.* – 2021. – V. 8. – P. 748075.
51. Mynatt R.L. Carnitine and type 2 diabetes // *Diabetes Metab. Res. Rev.* – 2009. – V. 25 (Suppl. 1). – P. 45-49.
52. Walter P., Schaffhauser A.O. L-carnitine, a vitamin-like substance for functional food // *Ann. Nutr. Metab.* – 2000. – V. 44. – P. 75-87.
53. Alesci S., De Martino M.U., Kino T., Ilias I. L-Carnitine is a modulator of the glucocorticoid receptor alpha // *Ann. NY Acad. Sci.* – 2004. – V. 1024. – P. 147-152.
54. Бокова Т.А. L-карнитин в комплексной терапии метаболического синдрома у детей // *Вопросы практической педиатрии.* – 2010. – Т. 5, № 4. – С. 100-102.
55. Rauschert S., Uhl O., Koletzko B., Hellmuth Ch. Metabolomic biomarkers for obesity in humans: a short review // *Ann. Nutr. Metab.* – 2014. – V. 64, No 3-4. – P. 314-324.
56. Pola P., Tondi P., dal Lago A. Statistical evaluation of long-term L-carnitine therapy in hyperlipoproteinemias // *Drugs Exp. Clin. Res.* – 1983. – V. 9. – P. 925-934.
57. Fukami K., Yamagishi S., Sakai K., M. Nasu, Okuda S. Effects of switching from oral administration to intravenous injection of l-carnitine on lipid metabolism in hemodialysis patients // *Clin. Kidney J.* – 2014. – V. 7, No 5. – P. 470-474.
58. Коденцова В.М., Рисник Д.В., Крюкова Е.В., Дарий С.Г. L-карнитин: пищевые источники, адекватные и клинически эффективные дозы // *Медицинский совет.* – 2024. – Т. 18, № 5. – С. 320-328.
59. Трусов Н.В., Мжельская К.В., Шипелин В.А., Шумакова А.А., Тимонин А.Н., Ригер Н.А., Апрятин С.А., Гмошинский И.В., Никитюк Д.Б. Влияние L-карнитина на иммунологические, интегральные и биохимические показатели мышей, получающих рацион с избытком жира и фруктозы // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* – 2019. – Т. 105, № 5. – С. 619-633.
60. Sayed-Ahmed M.M., Khatlab M.M., Gad M.Z., Mostafa N. L-carnitine prevents the progression of atherosclerotic lesions in hypercholesterolaemic rabbits // *Pharmacol. Res.* – 2001. – V. 44. – P. 235-242.
61. Stephens F.B., Marimuthu K., Cheng Y., N. Patel, Constantin D., Simpson E.J., Greenhaff P.L. Vegetarians have a reduced skeletal muscle carnitine transport capacity // *Am. J. Clin. Nutr.* – 2011. – V. 94. – P. 938-944.
62. Pekala J., Patkowska-Sokola B., Bodkowski R., Jamroz D., Nowakowski P., Lochyński St., Librowski T. L-carnitine — metabolic functions and meaning in humans' life // *Curr. Drug Metab.* – 2011. – V. 12. – P. 667-678.

63. Sangouni A.A., Pakravanfar F., Ghadiri-Anar A., Nadjarzade A., Fallahzade H., Hosseinzadeh M. The effect of L-carnitine supplementation on insulin resistance, sex hormone-binding globulin and lipid profile in overweight/ obese women with polycystic ovary syndrome: A randomized clinical trial // *Eur. J. Nutr.* – 2022. – V. 61, No 3. – P. 1199-1207.
64. Abolfathi M., Mohd-Yusof B.N., Hanipah Z.N., Redzwan S.M., Yusof L.M., Khosroshahi M.Z. The effects of carnitine supplementation on clinical characteristics of patients with non-alcoholic fatty liver disease: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // *Complement. Ther. Med.* – 2020. – V. 48. – P. 102273.
65. Koeth R.A., Wang Z., Levison B. S., Buffa J. A., Org E., Sheehy B.T., Britt E.B., Fu X., Wu Yu., Li L., Smith J.D., DiDonato J.A., Chen J., Li H., Wu G.D., Lewis J.D., Warrier M., Brown J.M., Krauss R.M., Tang W.H.W., Bushman Fr.D., Lusis A.J., Hazen St.L. Intestinal microbiota metabolism of L-carnitine, a nutrient in red meat, promotes atherosclerosis // *Nat. Med.* – 2013. – V. 19. – P. 576-585.
66. Ussher J.R., Lopaschuk G.D., Arduini A. Gut microbiota metabolism of L-carnitine and cardiovascular risk // *Atherosclerosis.* – 2013. – V. 231. – P. 456-466.
67. Wang Z., Tang W.H., Buffa J.A., Fu Xi., Britt E.B., Koeth R.A., Levison Br.S., Fan Y., Wu Y., Hazen St.L. Prognostic value of choline and betaine depends on intestinal microbiota-generated metabolite trimethylamine-N-oxide // *Eur. Heart J.* – 2014. – V. 35. – P. 904-910.
68. Schreiber B. Safety of oral carnitine in dialysis patients // *Semin. Dial.* – 2002. – V. 15, No 1. – P. 7.
69. Наостенко Т.Н., Ключников С.О., Сухоруков В.С. Коррекция нарушений вегетативного гомеостаза и внутриклеточного энергообмена у часто болеющих детей // *Вестник педиатрической фармакологии и нутрициологии.* – 2007. – № 1. – С. 8-12.
70. Nachvak S.M., Shabanpur M., Mostafai R., Heidari M.R. L-Carnitine supplementation reduces biomarkers of inflammatory and oxidative stress in patients with coronary artery disease: a randomised controlled trial // *J.Arch. Physiol. Biochem.* – 2023. – V. 129, No 1. – P. 61-68.
71. Асташкин Е.И., Глезер М.Г. Влияние L-карнитина на оксидативный стресс при сердечно-сосудистых заболеваниях // *Медицинский Совет.* – 2016. – V. 10. – P. 94-100.
72. Samir A.S., Hany N.A., Hany A.O., Hesham S.G., Gamil M. A.-A., Ibrahim A.M., Majed M.A.R. L-carnitine mitigates UVA-induced skin tissue injury in rats through downregulation of oxidative stress, p38/c-Fos signaling, and the proinflammatory cytokines // *Chem. Biol. Interact.* – 2018. – V. 285. – P. 40-47.
73. Lohninger A., Pittner G, Pittner F. L-Carnitine: New Aspects of a Known Compound – A Brief Survey // *Monatsh. Chem.* – 2005. – V. 136, No 8. – P. 1255-1268.
74. Buelna-Chontal M., Zazueta C. Redox activation of Nrf2 & NF-κB: a double end sword? // *Cell Signal.* – 2013. – V. 25. – P. 2548-2557.
75. Surai P.F. Carnitine Enigma: From Antioxidant Action to Vitagene Regulation. Part 2. Transcription Factors and Practical Applications // *Veterinary Science.* – 2015. – V. 3, No 2. – P. 1-14.
76. Шафоростова Е.А., Гуреев А.П., Виткалова И.Ю., Попов В.Н. Влияние истощения L-карнитина при длительной терапии мельдонием на митохондриальный баланс в мозге мышей // *Биомедицинская химия.* – 2021. – Т. 67, вып. 1. – С. 74-80.
77. Kui L., Jian-gang G., Yan-bo S., Si-chuan H. The antioxidation of L-carnitine on renal ischemiareperfusion injury and its underlying mechanism // *J. Modern Urology.* – 2012. – V. 3. – P. R965.
78. Ye J., Li J., Yu Y., Wei Q., Deng W., Yu L. L-carnitine attenuates oxidant injury in HK-2 cells via ROS-mitochondria pathway // *Regulatory Peptides.* – 2010. – V. 161, No 1-3. – P. 58-66.
79. Anderson E.J., Kypson A.P., Rodriguez E., Anderson C.A., Lehr E.J., Neuffer P.D. Substrate-specific derangements in mitochondrial metabolism and redox balance in the atrium of the type 2 diabetic human heart // *Journal of the American College of Cardiology.* – 2009. – V. 54, No 20. – P. 1891-1898.
80. Kolodziejczyk J., Saluk-Juszczak J., Wachowicz B. L-carnitine protects plasma components against oxidative alterations // *Nutrition.* – 2011. – V. 27, No 6. – P. 693-699.
81. Ильичева А.С., Фомина М.А., Исаков С.А. Оценка корректирующего воздействия аргинина и карнитина на активность и распределение катепсинов L, H скелетной и гладкой мышц при выраженной гипергомоцистеинемии // *Пермский медицинский журнал.* – 2016. – Т. 33, № 2. – С. 82-89.
82. Briehl M.M. Oxygen in human health from life to death – An approach to teaching redox biology and signaling to graduate and medical students // *Redox Biol.* – 2015. – V. 5. – P. 124-139.
83. Scapagnini G., Ravagna A., Bella R., Colombrita C., Pennisi G. Long-term ethanol administration enhances age-dependent modulation of redox state in brain and peripheral organs of rat: protection by acetyl carnitine // *Int. J. Tissue React.* – 2002. – V. 2. – P. 89-96.
84. Mancuso C. Natural substances and Alzheimer's disease: from preclinical studies to evidence based medicine // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Dis.* – 2012. – V. 1822, No 5. – P. 616-624.

85. Kienesberger K., Pordes A.G., Volk T.G., Hofbauer R. PPAR- α agonist fenofibrate are involved in the regulation of carnitine Acetyltransferase (CrAT) mRNA levels in murine liver cells // *BMC Genomics*. – 2014. – V. 15. – P. 514.
86. Sue Y.M., Chou H.C., Chang C.C., Yang N.J., Chou Y., Juan Sh.-H. L-carnitine protects against carboplatin-mediated renal injury: AMPK and PPAR- α dependent inactivation of NF- κ B // *PLoS One*. – 2014. – V. 9. – P. e104079.
87. Koc A., Ozkan T., Karabay A.Z., Sunguroglu A., Aktan F. Effect of L-carnitine on the synthesis of nitric oxide in RAW 264.7 murine macrophage cell line // *Cell Biochem. Funct.* – 2011. – V. 29, No 8. – P. 679-685.
88. Jing L., Zhou L.J., Li W.M., Zhang F.M., Yuan L., Li Sh., Song J., Sang Y. Carnitine regulates myocardial metabolism by Peroxisome Proliferator-Activated Receptor α (PPAR α) in alcoholic cardiomyopathy // *Med. Sci. Monit.* – 2011. – V. 17. – P. BR1-BR9.
89. Lee B., Lin J., Lin Y., Lin P.-T. Antiinflammatory effects of L-carnitine supplementation (1000 mg/d) in coronary artery disease patients // *Nutrition*. – 2015. – V. 31, No 3. – P. 475-479.
90. Vida G., Pefia G., Kanashiro A., Thompson-Bonilla M.R., Palange D., Deitch Ed.A., Ulloa L. Beta-Adrenoreceptors of regulatory lymphocytes are essential for vagal neuromodulation of the innate immune system // *FASEB J.* – 2011. – V. 25. – P. 4476-4485.
91. Pertosa G., Grandaliano G., Simone S., Soccio M., Schena F.P. Inflammation and carnitine in hemodialysis patients // *J. Ren. Nutr.* – 2005. – V. 15, No 1. – P. 8-12.
92. Indiveri C., Iacobazzi V., Tonazzi A. The mitochondrial carnitine/acylcarnitine carrier: function, structure and physiopathology // *Mol. Aspects Med.* – 2011. – V. 32. – P. 223-233.
93. Lopaschuk G.D. Optimizing cardiac energy metabolism: how can fatty acid and carbohydrate metabolism be manipulated? // *Coron. Artery Dis.* – 2001. – V. 12, Suppl. 1. – P. S8-S11.
94. Stephens F.B., Constantin-Teodosiu D., Greenhaff P.L. New insights concerning the role of carnitine in the regulation of fuel metabolism in skeletal muscle // *J. Physiol.* – 2007. – V. 581. – P. 431-444.
95. Broderick T.L., Quinney H.A., Lopaschuk G.D. Carnitine stimulation of glucose oxidation in the fatty acid perfused isolated working rat heart // *J. Biol. Chem.* – 1992. – V. 267. – P. 3758-3763.
96. Primassin S., Ter Veld F., Mayatepek E., Spiekerkoetter U. Carnitine supplementation induces acylcarnitine production in tissues of very long-chain acyl-CoA dehydrogenase-deficient mice, without replenishing low free carnitine // *Pediatr. Res.* – 2008. – V. 63. – P. 632-637.
97. Bonnet D., Martin D., Pascale D.L., Villain E., Jouvet P., Rabier D., Brivet M., Saudubray J.M. Arrhythmias and conduction defects as presenting symptoms of fatty acidoxidation disorders in children // *Circulation*. – 1999. – V. 100. – P. 2248-2253.
98. Tominaga H., Katoh H., Odagiri K., Takeuchi Y., Kawashima H., Saotome M., Urushida T., Satoh H., Hayashi H. Different effects of palmitoyl-L-carnitine and palmitoyl-CoA on mitochondrial function in rat ventricular myocytes // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* – 2008. – V. 295. – P. H105-H 112.
99. Копелевич В.М. Витаминоподобные соединения L-карнитин и ацетил-L-карнитин: от биохимических исследований к медицинскому применению // *Укр. биохим. журн.* – 2005. – Т. 77, № 4. – С. 25-45.
100. Calvani M., Arrigoni-Martelli E. Attenuation by acetyl-L-carnitine of neurological damage and biochemical derangement following brain ischemia and reperfusion // *Int. J. Tissue React.* – 1999. – V. 21. – P. 1-6.
101. Cuccurazzu B., Bortolotto V., Valente M.M., Ubezio F., Koverech A., Canonico P.L., Grilli M. Upregulation of mGlu2 receptors via NF- κ B p65 acetylation is involved in the proneurogenic and antidepressant effects of acetyl-L-carnitine // *Neuropsychopharmacology*. – 2013. – V. 38, No 11. – P. 2220– 2230.
102. Manfredi A., Forloni G.L., Arrigoni-Martelli E., Mancina M. Culture of dorsal root ganglion neurons from aged rats: effects of acetyl-L carnitine and NGF // *Int. J. Dev. Neurosci.* – 1992. – V. 10, No 4. – P. 321-329.
103. Hart A.M., Wiberg M., Terenghi G. Pharmacological enhancement of peripheral nerve regeneration in the rat by systemic acetyl-L-carnitine treatment // *Neurosci. Lett.* – 2002. – V. 334, No 3. – P. 181-185.
104. Nalecz K., Miecz D., Berezowski V., Cecchelli R. Carnitine: transport and physiological functions in the brain // *Mol. Aspects Med.* – 2004. – V. 25, No 5-6. – P. 551-567.
105. Неудахин Е.В., Талицкая О.Е. Энерготропная терапия психоэмоциональных расстройств у детей и подростков с вегетативной дистонией // *РМЖ. Мать и дитя*. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 77-84.
106. Медведев Д.И., Саврова О.Б., Еремина И.З. Препарат карнитин и его эффективность при белковоэнергетической недостаточности // *Морфологические ведомости*. – 2005. – № 3-4. – С. 69-71.
107. Uzun N., Sarikaya S., Uluduz D., Aydin A. Peripheral and autonomic neuropathy in children with type 1 diabetes mellitus: the effect of L-carnitine treatment on the peripheral and autonomic nervous system // *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.* – 2005. – V. 45. – P. 343-351.
108. Soneru L., Khan T., Orfalian Z., Abaira C. Acetyl-L-carnitine effects on nerve conduction and glycemic regulation in experimental diabetes // *Endocr. Res.* – 1997. – V. 23, No 1-2. – P. 27-36.

109. Nakamura J., Koh N., Sakakibara F., Hamada Y., Hara T., Sasaki H., Chaya S., Komori T., Nakashima E., Naruse K., Kato K., Takeuchi N., Kasuya Y., Hotta N. Polyol pathway hyperactivity is closely related to carnitine deficiency in the pathogenesis of diabetic neuropathy of streptozotocin-diabetic rats // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* – 1998. – V. 287, No 3. – P. 897-902.
110. Abdul H.M., Calabrese V., Calvani M., Butterfield D.A. Acetyl-L-carnitine-induced up-regulation of heat shock proteins protects cortical neurons against amyloidbeta peptide 1–42-mediated oxidative stress and neurotoxicity: implications for Alzheimer's disease // *J. Neurosci. Res.* – 2006. – V. 84. – P. 398-408.
111. Zhou P., Chen Z., Zhao N., Liu D., Guo Z.Y., Tan L., Hu J., Wang Q., Wang J.Z., Zhu L.Q. Acetyl-L-carnitine attenuates homocysteine-induced Alzheimer-like histopathological and behavioral abnormalities // *Rejuvenation. Res.* – 2011. – V. 14, No 6. – P. 669-679.
112. Гаврилова С.И., Калын Я.Б., Колыхалов И.В., Рощина И.Ф., Селезнева Н.Д. Ацетил-Л-карнитин (карнитетин) в лечении начальных стадий болезни Альцгеймера и сосудистой деменции // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* – 2011. – Т. 111, № 9. – С. 16-22.
113. Федорова Я.Б., Колыхалов И.В., Гаврилова С.И. Опыт клинического применения ацетил-Л-карнитина (Карнитетин) у пациентов с амнестическим типом синдрома мягкого когнитивного снижения // *Consilium Medicum. Неврология.* – 2014. – № 1. – С. 60-65.
114. Butterworth R.F. Evidence for a central cholinergic deficit in congenital ornithine transcarbamylase deficiency // *Dev. Neurosci.* – 1998. – V. 20, No 4-5. – P. 478-484.
115. Ratnakumari L., Gureshi I.A., Maysinger D., Butterworth R.F. Developmental deficiency of the cholinergic system in congenitally hyperammonemic spf mice: effect of acetyl-L-carnitine // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* – 1995. – V. 274, No 1. – P. 437-443.
116. Байтингер В.Ф., Логвинов С.В., Серяков В.И., Мустафина Л.Р. Реиннервация скелетной мышечной ткани после микрохирургического шва под влиянием карнитина (экспериментальное исследование) // *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии.* – 2010. – № 3(34). – С. 25-26.
117. Parnetti L., Gaiti A., Mecocci P., Cadini D., Senin U. Pharmacokinetics of IV and oral acetyl-L-carnitine in a multiple dose regimen in patients with senile dementia of Alzheimer type // *Eur. J. Clin. Pharmacol.* – 1992. – V. 42. – P. 89-93.
118. Bertoni-Freddari C., Fatoresetti P., Caselli U., Paoloni R., Ducati A. Effect of age on synaptic size in human brain tissue proximal to tumor masses // *Anal. Quant. Cytol. Histol.* – 1996. – V. 18, No 4. – P. 275-278.
119. Tempesta E., Janiri L., Pirrongelli C. Stereospecific effects of acetylcarnitine on the spontaneous activity of brainstem neurones and their responses to acetylcholine and serotonin // *Neuropharmacology.* – 1985. – V. 24. – P. 43-50.
120. Harsing L.G.Jr., Sershen H., Toth E., Hashim A., Ramacci M.T., Lajtha A. Acetyl-L-carnitine releases dopamine in rat corpus striatum: an in vivo microdialysis study // *Eur. J. Pharmacol.* – 1992. – V. 218. – P. 117-121.
121. Imperato A., Ramacci M.T., Angelucci L. Acetyl-L-carnitine enhances acetylcholine release in the striatum and hippocampus of awake freely moving rats // *Neurosci. Lett.* – 1989. – V. 107. – P. 251-255.
122. Toth E., Harsing L.G., Sershen H., Ramacci M.T., Lajtha A. Effect of acetyl-L-carnitine on extracellular amino acid levels in vivo in rat brain regions // *Neurochem. Res.* – 1993. – V. 18. – P. 573-578.
123. Castorina M., Ambrosini A.M., Pacific L., Ramacci M.T., Angelucci L. Age-dependent loss of NMDA receptors in hippocampus, striatum, and frontal cortex of the rat: prevention by acetyl-L-carnitine // *Neurochem. Res.* – 1994. – V. 19. – P. 795-798.
124. Раджаббадиев Р.М., Коростелева М.М., Евстратова В.С., Никитюк Д.Б., Ханферьян Р.А. L-карнитин: свойства и перспективы применения в спортивной практике // *Вопросы питания.* – 2015. – Т. 84, № 3. – С. 4-12.
125. Ozer G.E., Guzel N.A. The effects of acute L-carnitine supplementation on endurance performance of athletes // *J. Strength Cond. Res.* – 2014. – V. 28, No 2. – P. 514-519.
126. Wall B.T., Stephens F.B., Constantin-Teodosiu D., Marimuthu K., Macdonald I.A., Greenhaff P.L. Chronic oral ingestion of L-carnitine and carbohydrate increases muscle carnitine content and alters muscle fuel metabolism during exercise in humans // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* – 2011. – V. 21, No 5. – P. 385-397.
127. Huang A., Owen K. Role of supplementary L-carnitine in exercise and exercise recovery // *Med. Sport. Sci.* – 2012. – V. 59. – P. 135-142.
128. Marconi C., Sassi G., Carpinelli A., Cerretelli P. Effects of L-carnitine loading on the aerobic and anaerobic performance of endurance athletes // *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* – 1985. – V. 54. – P. 131-135.
129. Drăgan G.I., Wagner W., Ploșteanu E. Studies concerning the ergogenic value of protein supply and L-carnitine in elite junior cyclists // *Physiologie.* – 1988. – V. 25. – P. 129-132.
130. Greig C., Finch K.M., Jones D.A., Cooper M., Sargeant A.J., Forte C.A. The effect of oral supplementation with L-carnitine on maximum and submaximum exercise capacity // *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* – 1987. – V. 56. – P. 457-460.
131. Colombani P., Wenk C., Kunz I., Krähenbühl S., Kuhnt M., Arnold M., Frey-Rindova P., Frey W., Langhans W. Effects of L-carnitine supplementation on physical performance and energy metabolism of

- endurance-trained athletes: A double-blind crossover field study // *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* – 1996. – V. 73. – P. 434-439.
132. Mielgo-Ayuso J., Pietrantonio L., Viribay A., Calleja-González J., González-Bernal J., Fernández-Lázaro D. Effect of Acute and Chronic Oral L-Carnitine Supplementation on Exercise Performance Based on the Exercise Intensity: A Systematic Review // *Nutrients.* – 2021. – V. 13, No 12. – P. 4359.
 133. Harper P., Elwin C.E., Cederblad G. Pharmacokinetics of intravenous and oral bolus doses of L-carnitine in healthy subjects // *Eur. J. Clin. Pharmacol.* – 1988. – V. 35. – P. 555-562.
 134. Brass E.P., Hoppel C.L., Hiatt W.R. Effect of intravenous L-carnitine on carnitine homeostasis and fuel metabolism during exercise in humans // *Clin. Pharmacol. Ther.* – 1994. – V. 55. – P. 681-692.
 135. Brass E.P. Carnitine and sports medicine: Use or abuse? // *Ann. N.-Y. Acad. Sci.* – 2004. – V. 1033. – P. 67-78.
 136. Stephens F.B., Constantin-Teodosiu D., Laithwaite D., Simpson E.J., Greenhaff P.L. Insulin stimulates L-carnitine accumulation in human skeletal muscle // *FASEB J.* – 2006. – V. 20. – P. 377-379.
 137. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2016. – V. 1863. – P. 2422-2435.
 138. Fielding R., Riede L., Lugo J.P., Bellamine A. L-carnitine supplementation in recovery after exercise // *Nutrients.* – 2018. – V. 10, No 3. – P. 349.
 139. Hulsmann W.C.; Dubelaar M.L. Carnitine requirement of vascular endothelial and smooth muscle cells in imminent ischemia // *Mol. Cell. Biochem.* – 1992. – V. 116. – P. 125-129.
 140. Volek J.S., Judelson D.A., Silvestre R., Yamamoto L.M., Spiering B.A., Hatfield D.L., Vingren J.L., Quann E.E., Anderson J.M., Maresh C.M., Kraemer W.J. Effects of carnitine supplementation on flow-mediated dilation and vascular inflammatory responses to a high-fat meal in healthy young adults // *Am. J. Cardiol.* – 2008. – V. 102. – P. 1413-1417.
 141. Karlic H., Lohninger A. Supplementation of L-carnitine in athletes: does it make sense? // *Nutrition.* – 2004. – V. 20, No 7-8. – P. 709-715.
 142. Kaczor J.J., Ziolkowski W., Antosiewicz J., Hac S. The effect of aging on anaerobic and aerobic enzyme activities in human skeletal muscle // *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* – 2006. – V. 61, No 4. – P. 339-344.
 143. Гаврилова Е.А., Чурганов О.А. Изучение влияния L-карнитина на функциональные показатели спортсменов // *Лечебная физкультура и спортивная медицина.* – 2012. – Т. 105, № 9. – С. 23-28.
 144. Балыкова Л.А., Широкова А.А., Солдатов А.М., Щекина Н.В., Урзьева А.Н. Опыт использования L-карнитина для повышения адаптации организма юных спортсменов к физическим нагрузкам и коррекции стрессорной кардиомиопатии // *Экспериментальная и клиническая фармакология.* – 2014. – Т. 77, № 10. – С. 19-25.
 145. Stephens F.B., Constantin-Teodosiu D., Laithwaite D., Simpson E.J., Greenhaff P.L. An acute increase in skeletal muscle carnitine content alters fuel metabolism in resting human skeletal muscle // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* – 2006. – V. 91. – P. 5013-5018.
 146. Koeth R.A., Lam-Galvez B.R., Kirsop J., Wang Z., Levison B.S., Gu X., Copeland M.F., Bartlett D., Cody D.B., Dai H.J., Culley M.K., Li Xi.S., Fu Xi., Wu Yu., Li L., DiDonato J.A., Tang W.H.W., Garcia-Garcia J.C., Hazen St.L. L-Carnitine in omnivorous diets induces an atherogenic gut microbial pathway in humans // *J. Clin. Investig.* – 2019. – V. 129. – P. 373-387.
 147. Morand R., Bouitbir J., Felser A., Hench J., Handschin C., Frank S., Krähenbühl S. Effect of carnitine, acetyl-, and propionylcarnitine supplementation on the body carnitine pool, skeletal muscle composition, and physical performance in mice // *Eur. J. Nutr.* – 2014. – V. 53, No 6. – P. 1313-1325.
 148. Varney J.L., Fowler J.W., Gilbert W.C., Coon C.N. Utilisation of supplemented L-carnitine for fuel efficiency, as an antioxidant, and for muscle recovery in Labrador retrievers // *J. Nutr. Sci.* – 2017. – V. 6. – P. e8.
 149. Yarizadh H., Shab-Bidar S., Zamani B., Nazary Vanani A., Baharlooi H., Djafarian K. The Effect of L-Carnitine Supplementation on Exercise-Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials // *Journal of the American College of Nutrition.* – 2020. – V. 39, No 5. – P. 457-468.
 150. Хуторская И.А., Шаймарданова Г.Ф., Балашов В.П., Абрамов В.Н., Балашов А.В., Быстрова Е.В., Евстифеева И.А. Морфология скелетных мышц при динамической физической нагрузке и коррекции L-карнитином // *Клин. эксп. морфология.* – 2024. – Т. 13, № 4. – С. 67-75.
 151. Gnoni A., Longo S., Gnoni G.V., Giudetti A.M. Carnitine in human muscle bioenergetics: can carnitine supplementation improve physical exercise? // *Molecules.* – 2020. – V. 25, No 1. – P. 182.
 152. Jang J., Park J., Chang H., Lim K. L-carnitine supplement reduces skeletal muscle atrophy induced by prolonged hindlimb suspension in rats // *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* – 2016. – V. 41, No 12. – P. 1240-1247.
 153. Ravikumar S., Prabhu S., Vani R. Effects of L-carnitine on the erythrocytes of stored human blood // *Transfus Med.* – 2020. – V. 30, No 3. – P. 215-225.
 154. Naderi Noreini S., Malmir M., Ghafarizadeh A., Faraji T., Bayat R. Protective effect of L-carnitine on apoptosis, DNA fragmentation, membrane integrity and Lipid peroxidation of spermatozoa in the asthenoteratospermic men // *Andrologia.* – 2021. – V. 53, No 2. – P. e13932.

155. Хуторская И.А., Балашов В.П., Балыкова Л.А., Шаймарданова Г.Ф., Васильева А.Р., Гущина С.В., Ломонова Т.В. *Musculus soleus* крыс при физической нагрузке и действии L-карнитина и креатинфосфата. Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 440-451.
156. Диниколантонио Дж.Дж., Лави К.Дж., Фарес Х., Менезес А.Р., Окиф Дж.Х. L-карнитин для вторичной профилактики сердечнососудистых заболеваний: систематический обзор литературы и метаанализ // РМЖ. – 2013. – № 12. – С. 651-656.
157. Tarantini G., Scrutinio D., Bruzzic P., Boni L., Rizzon P., Iliceto S. Metabolic Treatment with L-carnitine in Acute Anterior ST Segment Elevation Myocardial Infarction // *Cardiology*. – 2006. – V. 106. – P. 215-223.
158. Леонтьева И.В., Сухоруков В.С. Значение метаболических нарушений в генезе кардиомиопатий и возможности применения L-карнитина для терапевтической коррекции // Вестник педиатрической фармакологии и нутрициологии. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 52-61.
159. Singh R.B., Niaz M.A., Agarwal P. A randomised, double-blind, placebo-controlled trial of L-carnitine in suspected acute myocardial infarction // *Postgrad. Med. J.* – 1996. – V. 72. – P. 45-50.
160. Глезер М.Г., Киселева А.Е., Прокофьева Е.Б., Асташкин Е.И. Влияние L-карнитина на эхокардиографические показатели у пациентов с острым коронарным синдромом // Журнал Сердечная Недостаточность. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 234-240.
161. Cacciata L., Cerio R., Ciarimboli M., Cocozza M., Coto V., D'Alessandro A., D'Alessandro L., Grattarola G., Imparato L., Lingetti M. The therapeutic effect of L-carnitine in patients with exercise-induced stable angina: a controlled study // *Drugs Exp. Clin. Res.* – 1991. – V. 17, № 4. – P. 225-235.
162. Shug A.L., Thomsen J.H., Folts J.D., Bittar N., Klein M.I., Koke J.R., Huth P.J. Changes in tissue levels of carnitine and other metabolites during myocardial ischemia and anoxia // *Arch. Biochem. Biophys.* – 1978. – V. 187, No 1. – P. 25-33.
163. Lee P.J., Harrison E.L., Jones M.G., Leonard J.V., Chalmers R.A. L-carnitine and exercise tolerance in medium-chain acyl-coenzyme A dehydrogenase (MCAD) deficiency: A pilot study // *J. Inherit. Metab. Dis.* – 2005. – V. 28. – P. 141-152.
164. Котов С.В., Бунак М.С., Бородатая Е.В., Сидорова О.П. Положительный эффект энерготропной терапии (L-карнитина и коэнзима Q10) у больного миопатией Беккера по данным МРТ мышц конечностей // Практическая медицина. – 2018. – Т. 16, № 10. – С. 117-120.
165. Flanagan J.L., Simmons P.A., Vehige J., Willcox M.D., Garrett Q. Role of carnitine in disease // *Nutrition & Metabolism*. – 2010. – V. 7, No 1. – P. 1-14.
166. Violante S. Carnitine palmitoyltransferase 2 and carnitine / acylcarnitine translocase are involved in the mitochondrial synthesis and export of acylcarnitines // *The FASEB J.* – 2013. – V. 27, No 5. – P. 2039-2044.
167. Zhi-Cheng J., Bing-Xiang W., Jian-Qiang P., Xin-Li L., Pan L. Effect of intravenous L-carnitine in Chinese patients with chronic heart failure // *European Heart Journal Supplements*. – 2016. – V. 18. – P. A27-A36.
168. Maruyama T., Maruyama N., Higuchi T., Nagura Ch., Takashima H., Kitai M., Utsunomiya K., Tei R., Furukawa T., Yamazaki T., Okawa E., Ando H., Kikuchi F., Abe M. Efficacy of L-carnitine supplementation for improving lean body mass and physical function in patients on hemodialysis: a randomized controlled trial // *Eur. J. Clin. Nutr.* – 2019. – V. 73, No 2. – P. 293-301.
169. Lu Z., Wang L., Huo Zh., Li Na, Tong N., Chong F., Liu J., Zhang Y., Xu H. L-Carnitine relieves cachexia-related skeletal muscle fibrosis by inducing deltex E3 ubiquitin ligase 3L to negatively regulate the Runx2/COL1A1 axis // *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*. – 2024. – V. 15, No 5. – P. 1953-1964.
170. Рейнюк В.Л., Ивницкий Ю.Ю., Шефер Т.В. Влияние противовоспалительных лекарственных средств или l-карнитина на азотистый обмен у крыс при острой интоксикации циклофосфаном // Фармакология. – 2012. – Т. 13. – С. 1024-1031.
171. Fujisawa K., Takami T., Matsuzaki A., T. Matsumoto, Yamamoto N., Terai Sh., Sakaida I. Evaluation of the effects of L-carnitine on medaka (*Oryzias latipes*) fatty liver // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7, No 1. – P. 2749.
172. Казюлин А.Н., Шестаков В.А., Бабина С.М. Использование комбинированных препаратов в лечении неалкогольной жировой болезни печени // *Consilium Medicum*. – 2016. – № 8. – С. 13.
173. Zhou X., Huang G., Wang L., Zhao Yu., Li J., Chen D., Wei L., Chen Zh., Yang B. L-carnitine promotes liver regeneration after hepatectomy by enhancing lipid metabolism // *J. Transl. Med.* – 2023. – V. 21, No 1. – P. 487.
174. El-Hattab A.W., Scaglia F. Disorders of carnitine biosynthesis and transport // *Molecular Genetics and Metabolism*. – 2015. – V. 116, No 3. – P. 107-112.
175. Mawal Y.R., Rama Rao K.V., Qureshi I.A. Restoration of hepatic cytochrome c oxidase activity and expression with acetyl-L-carnitine treatment in spf mice with an ornithine transcarbamylase deficiency // *Biochem. Pharmacol.* – 1998. – V. 55, No 11. – P. 1853-1860.

176. Kelek S.E., Afşar E., Akçay G., Danişman B., Aslan M. Effect of chronic L-carnitine supplementation on carnitine levels, oxidative stress and apoptotic markers in peripheral organs of adult Wistar rats // *Food Chem. Toxicol.* – 2019. – V. 134. – P. 110851.
177. Думова С., Чугунова О., Фоктова А., Милева О., Бабак О., Миронюк О., Потапова О., Шумилов П. Ранняя диагностика острого почечного повреждения у недоношенных детей и возможности его коррекции с использованием энерготропных препаратов // *Врач.* – 2015. – № 1. – С. 79-83.
178. Звягина В.И., Урясьев О.М., Бельских Э.С., Медведев Д.В. Влияние карнитина хлорида на функциональное состояние митохондрий в условиях дефицита синтеза оксида азота (II) // *Пермский медицинский журнал.* – 2015. – Т. 32, № 3. – С. 108-111.
179. Арапова А.И., Фомина М.А. Изучение влияния L-карнитина на изменение активности катепсинов В, L, Н и окислительной модификации белков в мышечных органах крыс // *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова.* – 2016. – № 2. – С. 13-20.
180. Ковалева О.В., Шитова М.С., Зборовская И.Б. Аутофагия: клеточная гибель или способ выживания? // *Клиническая онкогематология.* – 2014. – № 2. – С. 103-113.
181. Delaney C.L., Spark J.L., Thomas J., Wong Y.T., Chan L.T., Miller M.D. A systematic review to evaluate the effectiveness of carnitine supplementation in improving walking performance among individuals with intermittent claudication // *Atherosclerosis.* – 2013. – V. 15. – P. S0021.
182. Brass E.P., Koster D., Hiatt W.R., Amato A. A systematic review and meta-analysis of propionyl L-carnitine effects on exercise performance in patients with claudication // *Vase Med.* – 2013. – V. 18, No 1. – P. 3-12.
183. Visioli F., Hagen T.M. Antioxidants to enhance fertility: role of eNOS and potential benefits // *Pharmacol. Res.* – 2011. – V. 64, No 5. – P. 431-437.
184. Costell M., O'Connor J.E., Grisolia S. Age-dependent decrease of carnitine content in muscle of mice and humans. *Biochem Biophys // Res. Commun.* – 1989. – V. 161, No 3. – P. 1135-1143.
185. Pesce V., Fracasso F., Cassano P., Lezza A.M., Cantatore P., Gadaleta M.N. Acetyl-L-carnitine supplementation to old rats partially reverts the age-related mitochondrial decay of soleus muscle by activating peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator-1alpha-dependent mitochondrial biogenesis // *Rejuvenation Res.* – 2010. – V. 13, No 2-3. – P. 148-145.
186. Gomez L.A., Heath S.H., Hagen T.M. Acetyl-L-carnitine supplementation reverses the age-related decline in carnitine palmitoyltransferase 1 (CPT1) activity in interfibrillar mitochondria without changing the L-carnitine content in the rat heart // *Mech. Ageing Dev.* – 2012. – V. 133, No 2-3. – P. 99-106.
187. Liu J., Head E., Gharib A.M., Yuan W., Ingersoll R.T., Hagen T.M., Cotman C.W., Ames B.N. Memory loss in old rats is associated with brain mitochondrial decay and RNA/DNA oxidation: partial reversal by feeding acetyl-L-carnitine and/or R-alpha-lipoic acid // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2002. – V. 99, No 4. – P. 2356-2361.
188. Paradies G., Ruggiero F.M., Petrosillo G., Paradies V. Mitochondrial dysfunction in brain aging: role of oxidative stress and cardiolipin // *Mech. Ageing Dev.* – 1995. – V. 84, No 2. – P. 103-112.
189. Foreman P.J., Perez-Polo J.R., Angelucci L., Ramacci M.T., Taglialatela G. Effects of acetyl-L-carnitine treatment and stress exposure on the nerve growth factor receptor (p75NGFR) mRNA level in the central nervous system of aged rats // *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry.* – 1995. – V. 19, No 1. – P. 117-133.
190. Taglialatela G., Caprioli A., Giuliani A., Ghirardi O. Spatial memory and NGF levels in aged rats: natural variability and effects of acetyl-L-carnitine treatment // *Exp. Gerontol.* – 1996. – V. 31. – P. 577-587.
191. De Angelis C.C., Scarfo C., Falcinelli M., Perna E., Ramacci M.T., Angelucci L. Age- and trauma-dependent modifications of neuromuscular junction and skeletal muscle structure in the rat. Effects of long-term treatment with Acetyl-L-Carnitine // *Mech. Ageing Dev.* – 1995. – V. 85, No 1. – P. 37-53.
192. Tang W.H., Hazen S.L. Microbiome, Trimethylamine N-Oxide (TMAO), and cardiometabolic disease // *Transl. Res.* – 2017. – V. 179. – P. 108-115.
193. Ding L., Chang M., Guo Y., Zhang L., Xue C., Yanagita T., Zhang T., Wang Y. Trimethylamine-N-oxide (TMAO)-induced atherosclerosis is associated with bile acid metabolism // *Lipids Health Dis.* – 2018. – V. 17. – P. 286.
194. Gao X., Tian Y., Randell E., Zhou H., Sun G. Unfavorable associations between serum trimethylamine N-oxide and L-carnitine levels with components of metabolic syndrome in the Newfoundland population // *Front. Endocrinol.* – 2019. – V. 10. – P. 168.
195. Wu W.K., Chen C.C., Liu P.Y., Panyod S., Liao B.Y., Chen P.C. Kao H.L., Kuo H.C., Kuo C.H., Chiu T.H.T., Chen R.-A., Chuang H.-L., Huang Y.-T., Zou H.-B., Hsu Ch.-Ch., Chang T.-Y., Lin Ch.-L., Ho Ch.-T., Yu H.-T., Sheen L.-Y., Wu M.-Sh. Identification of TMAO-producer phenotype and host-diet-gut dysbiosis by carnitine challenge test in human and germ-free mice // *Gut.* – 2019. – V. 68. – P. 1439-1449.
196. Sawicka A.K., Renzi G., Olek R.A. The bright and the dark sides of L-carnitine supplementation: a systematic review // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* – 2020. – V. 17. – P. 49.

197. Виноградов И.В., Блохин А.В., Афанасьева Л.М., Габля М.Ю., Дендеберов Е.С., Капто А.А., Алексеев Р.А. Опыт применения L-карнитина в лечении секреторного бесплодия у мужчин (обзор литературы) // Андрология и генитальная хирургия. – 2009. – № 2. – С. 19-22.

Поступила в редакцию 28.08.2025 г.

L-CARNITINE: PHYSIOLOGICAL EFFECTS, REALITIES AND PROSPECTS FOR USE IN MEDICINE

E. V. Lopatina, V. V. Trush, V. I. Sobolev

The article presents a literature review of the positive effects of carnitine on the animal organism: energy-tropic, antioxidant, antihypoxic, detoxifying, hypolipidemic, membrane-stabilizing, antiapoptotic, anabolic and stabilizing mitochondria. The article discusses the effectiveness of carnitine and acetylcarnitine in compensating for polyneuropathies of various origins, various neurodegenerative disorders, hereditary muscular dystrophies, cardiomyopathy, cancer sarcopenia, for the purpose of hepatoprotection, alleviation of metabolic syndrome, peripheral atherosclerosis, age-related changes in mitochondria in skeletal and cardiac muscles, damage of skeletal muscles during physical exertion, manifestations of hyperammonemia.

At the same time, most studies indicate that the beneficial effects of carnitine require a long period of administration – at least 12 weeks, and its clinically effective doses correspond to or are twice as high as the upper permissible level of consumption in specialized food products and dietary supplements (more than 2 g/a day). At the same time, some studies have found that food supplements with carnitine can significantly increase the level of atherogenic trimethylamine-N-oxide in the blood serum of both humans and rodents. In addition, it has been established that too high doses of exogenous carnitine during physical exertion against the background of circulatory insufficiency and, accordingly, tissue oxygenation, can cause a negative effect. In this regard, the advisability of long-term use of pharmacological doses of carnitine, especially when administered orally, requires careful justification.

Despite the contradictory results of studies regarding the effectiveness of exogenously administered carnitine in animal models and conditionally healthy people, it may be very useful in certain pathologies, primarily those caused by primary or secondary carnitine deficiency, impaired metabolism and energy metabolism disorders, including mitochondrial dysfunctions, as well as in older patients who often develop secondary mitochondrial dysfunctions.

Keywords: L-carnitine, acetyl-L-carnitine, energy exchange, energytropic therapy, antioxidant, neuroprotector, cardioprotector.

Лопатина Екатерина Валентиновна

д-р биол. наук, профессор, заведующая кафедрой нормальной физиологии ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова», ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт физиологии им. И.П. Павлова» РАН, Санкт-Петербург, РФ.

E-mail: evlopatina@yandex.ru

Lopatina Ekaterina Valentinovna

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Normal Physiology, First Saint Petersburg State Medical University named after Academician I.P. Pavlov, Leading Researcher at the I.P. Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences

E-mail: evlopatina@yandex.ru

Труш Вера Владимировна

д-р биол. наук., доцент, заведующая кафедрой физиологии и биофизики ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

E-mail: ver.trush@yandex.ru

Trush Vera Vladimirovna

Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Physiology and Biophysics, Donetsk State University, Donetsk, Russia.

E-mail: ver.trush@yandex.ru

Соболев Валерий Иванович

д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры здоровья и реабилитации ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Ялта, Крым, РФ.

E-mail: v.sobolev@mail.ru

Sobolev Valery Ivanovich

Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Health and Rehabilitation, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Yalta, Crimea, RF.

E-mail: v.sobolev@mail.ru

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННО-ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ

© 2025. М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбунник

В статье рассматривается проблема ремедиации почв, загрязненных минерализованными водами в условиях средней тайги Западной Сибири. Исследование направлено на оценку экономической эффективности технологий восстановления нарушенных земель. Объектом исследования послужил участок разлива минерализованных жидкостей площадью 0,6 га в Ханты-Мансийском автономном округе. Почвы участка классифицированы как хемоземы техногенно-засоленные (*Solonchaks Gleyic Toxic*). Разработанная методика рекультивации включает трехэтапный комплекс мероприятий: подготовительный, технический и биологический. Экономическая эффективность оценивалась методом дисконтирования денежных потоков (*DCF*) с сопоставлением затрат на рекультивацию и потенциального экологического ущерба, рассчитанного по методике Минприроды России. Результаты показали, что общая стоимость 15-летнего цикла ремедиации значительно ниже возможных выплат за экологический ущерб.

Ключевые слова: рекультивация техногенно-засоленных почв; экономическая эффективность; ущерб почвам; инвестиционный меморандум.

Введение. В соответствии с положениями «Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 19 апреля 2017 года № 176 [1], одной из ключевых задач экологической политики является обеспечение экологической безопасности производств, включая управление аварийными ситуациями на экологически опасных объектах. Приоритетным направлением становится борьба с последствиями негативных изменений окружающей среды, а также принятие мер по очистке и оздоровлению нарушенных земель. Это особенно актуально в условиях роста антропогенной нагрузки на природные экосистемы и истощения ресурсов.

Решение данной проблемы требует системного подхода, включающего сокращение площадей загрязненных земель за счет внедрения современных технологий их восстановления. Данная задача нашла отражение в стратегиях развития крупнейших недропользователей, на которых возложена обязанность не только проводить комплексную очистку земель, но и компенсировать причиненный ущерб экосистемам. Органы государственного надзора вправе требовать проведения экологических мероприятий в соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002, № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [2]. Под экологическим вредом понимается негативное изменение окружающей среды в результате загрязнения, что приводит к деградации природных экосистем и истощению ресурсов.

Особое внимание уделяется вопросам загрязнения, под которым подразумевается поступление в окружающую среду веществ или энергии, свойства и количество которых оказывают негативное воздействие. Это требует не только оперативного реагирования, но и внедрения природоохранных мероприятий, которые, хоть и связаны с затратами для недропользователей, в долгосрочной перспективе могут быть более экономически эффективными. Полное и комплексное восстановление почв позволяет минимизировать экологические и экономические риски.

Цель исследования – провести оценку экономической эффективности внедрения технологий ремедиации почв, загрязненных минерализованными жидкостями (сеноманскими водами).

Материал и методы исследований. Объектом исследования послужила почва участка разлива минерализованных жидкостей на территории средней тайги Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского автономного округа. Очаг загрязнения возник после аварийного отказа водовода высокого давления на водораздельной равнине левобережья р. Оби. Площадь загрязнения составляет 0,6 га. Систематическое положение почв определено по «Классификации и диагностике почв России» (2004) [3] и *World Reference Base for Soil Resources (2022)* [4], – хемозем техногенно–засоленный по подзолистой иллювиально–железистой мелкоосветленной легкосуглинистой почве (*Solonchaks Gleyic Toxic*). Оценка экономической эффективности внедрения предлагаемых решений по ремедиации почв, загрязненных минерализованными жидкостями (сеноманскими водами), проведена методом дисконтирования денежных потоков (*discounted cash flow, DCF*) [5–9]. В расчете сопоставлен возможный ущерб, причинённый почвам вследствие химического загрязнения, со стоимостью трехэтапного комплекса по ремедиации почв. Расчет ущерба проведен в соответствии с методикой, изложенной в приказе Минприроды России от 08.07.2010 г. № 238 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды» [10]. Расчет стоимости всего цикла рекультивационных работ проведен в специализированном программном обеспечении «ГРАНД-Смета» и фактическим рыночным ценам [11, 12].

Результаты и обсуждение. При ремедиации техногенно-засоленных почв необходимо использовать комбинацию различных методов, адаптированную к условиям гумидного почвообразования. Разработанные методические регламенты, а также проведенные опытно-промышленные испытания рекультивации почв, загрязненных техногенными солями, – устройство замкнутого дренажа с помощью системы траншей и последующее осушение участка (подготовительный этап); механическая обработка почв с гипсованием, фрезерованием (технический этап) и; внесение удобрений, фиторемедиация аборигенными галофитами (биологический этап). Рекультивация участка уже проведена ранее, а ее эффективность подтверждена отбором проб на содержание хлорид-ионов [12]. В данной статье не будут подробно рассмотрены результаты рекультивации, а информация по изменению содержания хлорид-ионов проведена справочно (рис. 1). Основной задачей на данном этапе исследования была апробация и валидация метода именно в аспекте борьбы с техногенным засолением (десолонации). Поэтому фокус мониторинга был сознательно сужен до ключевого маркера. В условиях техногенного засоления хлорид-ион является наиболее лабильным и показательным анионом. Его динамика наиболее ярко демонстрирует эффективность выщелачивания и миграции солей из корнеобитаемого слоя почвы, нижележащих горизонтов. Мониторинг именно этого параметра позволяет наиболее точно и экономически эффективно оценить успешность процесса на начальном этапе. При финансировании природоохранных мероприятий одним из наиболее важных аспектов является обоснование экономической эффективности предполагаемых затрат на охрану и последующую подготовку инвестиционного меморандума – расчета, содержащего информацию о том, за какой период операционные вложения окупят свою стоимость и принесут прибыль потенциальному инвестору (недропользователю, внедряющему на предприятии технологию ремедиации). Предложенный метод рекультивации подразумевает выполнение

нескольких основных технологических операций и формирует перечень исходных данных для проведения расчета. Технологические операции, не представленные в таблице (анализ почв на содержание хлорид-ионов) выполнены собственными силами недропользователя и в расчете не учитываются.

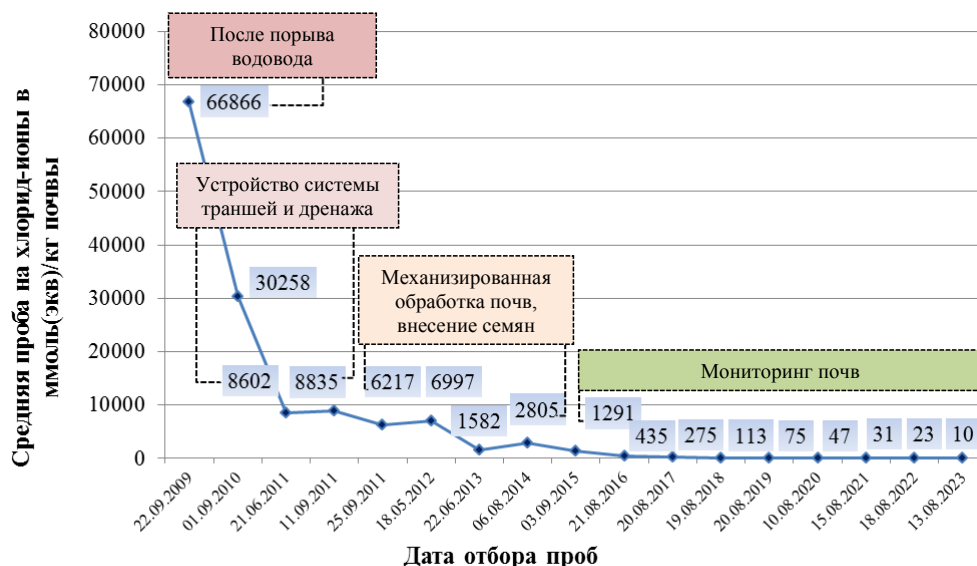


Рис. 1. Динамика изменения содержания хлорид-ионов на засоленном участке нефтяного месторождения

Стоимость работ состоит из эксплуатационных затрат (*Орех*) и представлена в таблице (табл. 1). Затраты не учитывают стоимость перебазировки техники, накладные расходы и закупку необходимых материалов.

Таблица 1

Эксплуатационные затраты (*Орех*)

Объем работ	Стоимость [11]
1	2
<i>Подготовительные работы (1 год)</i>	
1. Рытье трех траншей глубиной 40 см по всей площади участка (0,6 га)	
Длина траншей: 300 м. Ширина: 0,5 м. Глубина: 0,4 м. Объем выемки: $300 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 0,4 \text{ м} = 60 \text{ м}^3$ $3 \cdot 300 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 0,4 \text{ м} = 60 \text{ м}^3$	Стоимость рытья траншеи экскаватором составляет около 800 руб./м ³ . Общая стоимость: $60 \text{ м}^3 \cdot 800 \text{ руб./м}^3 = 48000 \text{ руб.}$
2. Устройство дренажной канавы (периметр 0,6 га $\approx$ 310 м)	
Глубина: 0,5 м. Ширина: 0,5 м. Объем выемки: $310 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} = 77,5 \text{ м}^3$ $3 \cdot 310 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} = 77,5 \text{ м}^3$	Рытье канавы: $77,5 \text{ м}^3 \cdot 900 \text{ руб./м}^3 = 69\,750 \text{ руб.}$
3. Откачка промывных вод ассенизационной машиной	
Объем: 50 м ³ промывных вод.	Стоимость откачки составляет 600 руб./м ³ . $50 \text{ м}^3 \cdot 600 \text{ руб./м}^3 = 30\,000 \text{ руб.}$
ИТОГО (подготовительные работы): $48\,000 + 69\,750 + 30\,000 = 147\,750 \text{ руб.}$	

Продолжение табл. 1

1	2
<i>Технический и биологические этапы (2 и 3 год)</i>	
4. Засыпка траншей и планировка участка:	
Объем работ: Засыпка траншей: 60 м ³ Планировка участка: 0,6 га.	Засыпка траншей: 60 м ³ *500 руб./м ³ = 30 000 руб. Планировка: 0,6 га*50 000 руб./га = 30 000 руб. Общая стоимость: 30 000+30 000=60 000 руб.
5. Фрезерование, рыхление и гипсование (0,6 га) (по преysкуранным расценками в аналогичных проектах):	
	Внесение гипса: 0,6 га*221 975 руб./га = 133 185 руб. Фрезерование, рыхление: 0,6 га*76 372 руб./га = 45 823,2 руб.
6. Внесение минеральных удобрений (0,6 га) (по преysкуранным расценками в аналогичных проектах):	
	0,6 га*402 954 руб./га = 241 772,4 руб.
7. Посев трав (полынь, овсяница, клевер) (0,6 га) (по преysкуранным расценками в аналогичных проектах):	
	0,6 га*214 548 руб./га = 128 728,8 руб.
ИТОГО (технические и биологические работы): 133 185+45 823,2 +241 772,4+128 728,8=549 509,4 руб.	
<i>Ежегодные затраты (Годы 3–15)</i>	
8. Поддерживающие мероприятия (удобрение и уход за травами на 10% территории):	
	Внесение минеральных удобрений: (0,6 га*402 954 руб./га)*10 % = 24 177,24 руб. Досев трав: (0,6 га*214 548 руб./га)*10 % = 12 872,88 руб. Общая стоимость: (24 177,24 руб. + 12 872,88 руб.)*13= 481 651,56 руб.
Общая стоимость за 15 лет Год 1: 147 750 руб. Год 2: 549 509,4 руб. Годы 3–15: 481 651,56 руб. Общая стоимость: 147 750+549 509,4+481 651,56 = 1 178 910,96 руб.	

Расчет предполагает сравнение стоимости работ по рекультивации с платой за ущерб, нанесенный почвам вследствие химического загрязнения. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды, предназначенная для исчисления в стоимостной форме размера вреда, нанесенного почвам при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, уже разработана и изложена в Приказе Минприроды № 238 [10]. Исходные данные для расчета приведены в таблице (табл. 2).

В Западной Сибири, особенно в подзолистых почвах, содержание хлоридов минимально или вовсе отсутствует. Это обусловлено климатическими условиями и почвообразовательными процессами региона. В случае загрязнения почв хлоридами, особенно при отсутствии установленных нормативов, рекомендуется проводить детальный анализ для оценки степени загрязнения и потенциального ущерба. Если норматив содержания хлоридов в почве не установлен, а в фоновой почве хлориды отсутствуют, степень загрязнения определяется исходя из соотношения между фактической концентрацией загрязнителя и условным фоновым содержанием.

Таблица 2

Исходные данные для расчета ущерба, принесенного почвам

Наименование	Фактические данные	Применяемое значение [10]
Площадь загрязнения	0,6 га (6 000 м ²)	S
Тип почв	Подзолистые почвы	$Такса (Tx) = 500$ (таежная зона)
Зона	Таежная	
Категория земель	Лесной фонд	$Kисп = 1,5$
Глубина загрязнения	0,3 м	$Kr = 1,3$
Плотность почвы	1,3 г/см ³	
Загрязняющее вещество	Хлорид-ионы	$C3 = 15$ (максимальный)
Степень загрязнения	Высокая степень загрязнения	
Содержание хлорид-ионов (после аварии)	66 866 ммоль экв / 100 г почв	
Мощность плодородного слоя	Отсутствуют в связи с загрязнением	$Kмпс = 1$

Согласно методике, в таких случаях фоновые значения берутся минимально возможными. В ходе проведения мероприятий по восстановлению почв по авторской методике установлено, что в фоновых почвах отсутствует положительная реакция на содержание хлорид-ионов. В случае, где фоновые хлориды отсутствуют, значение 66 866 ммоль экв / 100 г можно отнести к высокому или критическому загрязнению, исходя из уровня превышения даже гипотетического минимума. Согласно методике, исчисление в стоимостной форме размера вреда в результате загрязнения почв, возникшего при поступлении в почву поллютантов, осуществляется по формуле (1):

$$УЩ_{загр} = C3 * S * Kr * Kисп * Tx * Kмпс \quad (1)$$

где $C3$ – степень загрязнения (15), S – площадь загрязнения (6000 м²), Kr – коэффициент, учитывающий глубину загрязнения (1,3), $Kисп$ – коэффициент, учитывающий категорию земель (1,5), Tx – такса за загрязнение (500 руб./м²), $Kмпс$ – показатель, учитывающий мощность плодородного слоя почвы (1).

Итоговый размер ущерба составил: 87 750 000 руб. Общие затраты на рекультивацию почв за 15 лет составляют 1 178 910,96 руб. (за 0,6 га). Проведение работ по восстановлению почв поможет недропользователю избежать платы за ущерб, а чистая экономия составляет 86 571 089,04 руб.

Анализ затрат и выгод (или оценка затрат и выгод) представляет собой метод экономической оценки, который позволяет сравнивать дисконтированные потоки выгод и затрат за определенный период времени с учетом экологических факторов [5–9]. Для проведения эколого-экономического анализа эффективности проектов по методу «затраты-выгоды» требуются следующие данные: срок действия проекта или временной интервал; денежное выражение выгод и затрат по проекту для каждого года; учетная ставка (ставка дисконтирования). При этом все выгоды и расходы дисконтируются до базового года. Потоки выгод и затрат для данного исследования сравниваются с использованием двух показателей оценки (критерии оценки). Формула для расчета чистой приведенной стоимости (NPV) (2–6):

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = \sum_{t=15}^{15} \frac{CF_t}{(1+0,1)^t} \quad (2)$$

где CF_t – экономический эффект в году t , r – ставка дисконтирования, t – номер периода, $(1+0,1)^t$ – коэффициент дисконтирования.

Год 1: Инвестиции за год 1: 147 750 руб. (см. табл. 1),

$$NPV1=147\,750/1,1^1=134\,318,18 \text{ руб.} \quad (3)$$

Год 2: Инвестиции за год 2: 549 509,4 руб. (см. табл. 1),

$$NPV2=549\,509,4/1,1^2=454\,140 \text{ руб.} \quad (4)$$

Годы 3–15: Инвестиции за 3–15 год: 37 050,12 руб. ежегодно (481 651,56 руб.) (см. табл. 1). Это аннуитет на 13 лет (с 3-го по 15-й год). Сначала находим его стоимость на Год 2, затем дисконтируем на Год 0.

$$PVA=37\,050,12*(1-(1+0,1)^{-13}/0,1)=37\,050,12*7,1034=263\,181,82 \text{ руб.} \quad (5)$$

Дисконтирование к началу:

$$263\,181,82/1,1^2=217\,505,64 \text{ руб.} \quad (6)$$

Общий дисконтированный поток рассчитываем суммой
 $NPV=134\,318,18+454\,140+217\,505,64=805\,963,8 \text{ руб.}$

Проведенный экономический анализ демонстрирует, что при чистой приведенной стоимости в 805 963,8 руб. реализация ремедиационных работ является предпочтительным вариантом как с экономической, так и с экологической точек зрения, поскольку позволяет не только минимизировать финансовые затраты, но и восстановить качество почвенных ресурсов.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило высокую экономическую эффективность внедрения технологий ремедиации почв, загрязненных минерализованными жидкостями (сеноманскими водами), на примере участка в Ханты-Мансийском автономном округе. Реализация трехэтапного комплекса восстановительных мероприятий (подготовительного, технического и биологического) позволила не только минимизировать экологический ущерб, но и достичь значительной экономии по сравнению с потенциальными затратами на компенсацию вреда окружающей среде. Общие затраты на восстановление почв за 15 лет составили 1 178 910,96 руб., тогда как расчетный ущерб от загрязнения достиг 87 750 000 руб. Чистая экономия от предотвращения ущерба – 86 571 089,04 руб., что доказывает финансовую выгоду для недропользователей. Комбинированный подход, включающий дренаж, гипсование, фрезерование, внесение удобрений и фиторемедиацию аборигенными галофитами, показал высокую результативность в условиях гумидного климата Западной Сибири. Метод адаптирован к техногенному засолению почв и может быть тиражирован на аналогичных объектах. Анализ дисконтированных денежных потоков подтвердил положительную чистую приведенную стоимость проекта, что делает его привлекательным для инвесторов. Срок окупаемости мероприятий не превышает нескольких лет, учитывая избежание многомиллионных штрафов.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены расширению данных об экологическом состоянии почв Западной Сибири с помощью исследования новых загрязненных участков и фоновых почв, наблюдением за миграцией поллютантов (техногенные соли) в сопряженных ландшафтах, а также проведению более масштабных опытно-промышленных испытаний технологии восстановления на почвах подверженных загрязнению минерализованными жидкостями. Таким образом, предложенный подход демонстрирует, что экологическая ответственность бизнеса может сочетаться с экономической выгодой, обеспечивая устойчивое развитие территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» // Собрание законодательства РФ. – 2017.
2. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 2.
3. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: ООО Ойкумена, 2004. – 342 с.
4. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). – Vienna, Austria, 2022. – 236 p.
5. Экономика природопользования: учебник / К. В. Папенков, М. В. Палт, С. Н. Бобылев [и др.]; под ред. С. Н. Бобылева. – Москва: Проспект, 2015. – 896 с.
6. Щербаков В. А. Оценка стоимости предприятия (бизнеса): подходы, методы и практические примеры оценки стоимости предприятия: монография. – Москва: Омега-Л, 2012. – 315 с.
7. Чеботарев Н. Ф. Оценка стоимости предприятия (бизнеса). – Москва: Дашков и К°, 2022. – 252 с.
8. Валдайцев С. В. Экономика природопользования: учебник. – Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 384 с.
9. Методология оценки экологического ущерба и экономической эффективности природоохранных мероприятий / под ред. А. П. Демина. – Москва: НИИ-Природа, 2019. – 210 с.
10. Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды» // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2010.
11. Справочник рыночных расценок на строительные и инженерные работы / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – Москва: Минстрой России, 2023. – 540 с.
12. Носова М.В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук. – Томск, 2024. – 213 с.

Поступила в редакцию 11.08.2025 г.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF MEASURES FOR RECULTIVATION OF TECHNOGENICALLY SALINE SOILS

M. V. Nosova, V. P. Seredina, S. A. Stovbunik

The article considers the problem of remediation of soils contaminated with mineralized waters in the middle taiga of Western Siberia. The study is aimed at assessing the economic efficiency of technologies for restoring disturbed lands. The object of the study was a 0.6 ha mineralized liquid spill site in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. The soils of the site are classified as technogenically saline chemozems (*Solonchaks Gleyic Toxic*). The developed remediation method includes a three-stage set of measures: preparatory, technical and biological. Economic efficiency was assessed using the discounted cash flow (DCF) method with a comparison of remediation costs and potential environmental damage calculated using the methodology of the Ministry of Natural Resources of Russia. The results showed that the total cost of a 15-year remediation cycle is significantly lower than possible payments for environmental damage.

Keywords: reclamation of technogenically saline soils; economic efficiency; damage to soils; investment memorandum.

Носова Мария Владимировна

кандидат биологических наук,
специалист по экологической безопасности
ООО «Сахалинская Энергия»,
г. Южно-Сахалинск, РФ.
E-mail: nsmvsh@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7985-6474
AuthorID: 1043987

Nosova Maria Vladimirovna

Candidate of Biological Sciences;
environmental protection specialist,
Sakhalin Energy LLC,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation.

Середина Валентина Петровна

доктор биологических наук,
профессор кафедры почвоведения и экологии почв,
Национальный исследовательский Томский
государственный университет, г. Томск, РФ.
E-mail: seredina_v@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7432-1726
AuthorID: 434107

Seredina Valentina Petrovna

Doctor of Biological Sciences;
Professor of the Department of Soil Science and Soil
Ecology,
National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russian Federation.

Стовбуник Сергей Анатольевич

главный специалист Управления экологии
АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, РФ.
E-mail: StovbunikSA@tomsknipi.ru

Stovbunik Sergey Anatolievich

Chief Specialist of the Ecology Department,
JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russian Federation.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПАРАЗИТАРНЫХ И ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В АКВАКУЛЬТУРЕ

© 2025. *Д. С. Саркисян, Э. Э. Чолутаева, В. Н. Шевченко, Д. В. Старостин, И. О. Мартынюк*

Аквакультура, будучи критически важным источником продовольствия, сталкивается со значительными ограничениями в развитии из-за заболеваний различной этиологии, наносящих существенный экономический ущерб. В данной статье представлен всесторонний обзор основных групп болезней, угрожающих современной аквакультуре: вирусных и паразитарных. Вирусные и паразитарные заболевания являются одной из ключевых угроз развития современной аквакультуры. Особое внимание уделено вирусным инфекциям, таким как оспа карпа, герпесвирусная инфекция осетровых, папилломатоз атлантического лосося и вирусная геморрагическая септицемия, данные заболевания вызывают массовую гибель и приводят к высоким экономическим потерям. Также рассмотрены паразитарные заболевания, включая ботриоцефалез, филометраидоз, лигулез, кавиоз и дактилогироз. Данные заболевания обусловлены высокой плотностью посадки, интенсификацией производственных процессов и ухудшением условий среды, что способствует активному распространению патогенов и осложнению процессов диагностики заболеваний. Описаны методы диагностики, профилактики и контроля этих заболеваний. Применение электронной микроскопии, гистологических исследований и молекулярно-биотехнологических методов, дает возможность на раннем этапе диагностировать заболевание. Аквакультура сталкивается с распространением инфекций, требующих альтернатив антибиотикам. Бактериоцины – природные пептиды, подавляющие патогены, включая устойчивые штаммы. Их применение снижает заболеваемость гидробионтов и повышает безопасность продукции.

Ключевые слова: аквакультура; болезни рыб; вирусные заболевания; паразитарные инвазии; возбудители; клинические признаки; профилактика; лечение; устойчивость.

Введение. Аквакультура, являясь одним из наиболее динамично развивающихся секторов производства пищевой продукции в мире, играет критически важную роль в обеспечении растущего населения планеты ценными источниками животного белка и жирных кислот. Однако интенсификация производства, высокая плотность посадки гидробионтов, расширение географии перемещения объектов культивирования и климатические изменения создают предпосылки для возникновения и распространения инфекционных и инвазионных заболеваний [1]. Эти болезни представляют собой основное препятствие для устойчивого развития отрасли, нанося значительный экономический ущерб из-за гибели объектов аквакультуры, снижения темпов роста, ухудшения качества продукции, затрат на лечение и карантинные мероприятия, а также ограничений торговли.

Современная патология аквакультуры характеризуется широким спектром возбудителей, среди которых существенное влияние на продуктивность производства оказывают вирусные и паразитарные заболевания.

Вирусные болезни отличаются высокой контагиозностью, способностью вызывать массовую гибель и сложностью лечения, требуя преимущественно профилактических мер в виде вакцинации и строгой биобезопасности [2].

Паразитарные инвазии, вызываемые простейшими (ихтиофтириоз, кистиоз), гельминтами (цестоды, нематоды) и ракообразными (лернеоз, аргулез), широко распространены и наносят урон через механические повреждения тканей, нарушение физиологических функций, истощение и создание «ворот» для вторичных инфекций [3].

В настоящее время аквакультура сталкивается с серьезными вызовами, связанными с распространением инфекций, которые наносят значительный экономический ущерб и требуют поиска альтернатив традиционным антимикробным препаратам. Одним из

наиболее перспективных направлений является применение бактериоцинов – природных антимикробных пептидов, продуцируемых бактериями для подавления роста родственных штаммов. Бактериоцины обладают высокой специфичностью, низкой токсичностью для эукариотических клеток и способностью подавлять патогены, включая устойчивые к антибиотикам штаммы. Их использование в аквакультуре может способствовать снижению заболеваемости гидробионтов, уменьшению зависимости от химиотерапевтических средств и повышению безопасности продукции [4].

Понимание этиологии, эпидемиологии и патогенеза этих ключевых заболеваний является фундаментальной основой для разработки эффективных стратегий диагностики, профилактики и контроля, направленных на обеспечение здоровья гидробионтов и долгосрочную устойчивость глобальной аквакультуры.

Цель работы – обобщить современные знания об основных вирусных и паразитарных болезнях, представляющих наибольшую угрозу для отрасли.

Материалы и методы. В ходе исследования был применен аналитический метод. Информационная база сформирована на основе анализа данных, представленных в открытых научных публикациях. Поиск литературных источников проводился в реферативных и информационных базах данных, включая eLibrary, Российскую государственную библиотеку, Google Scholar. В качестве поисковых запросов использовались следующие ключевые термины: «вирус», «viral», «вирусные заболевания», «viral diseases», «паразит», «parasite», «паразитарные заболевания», «parasitic diseases», «аквакультура», «aquaculture» – как в отдельности, так и в различных комбинациях. Всего в ходе исследования проанализировано свыше 100 литературных источников.

Паразитарные заболевания. Современная аквакультура играет важную роль в обеспечении мирового спроса на рыбную продукцию, однако её развитие сопровождается рядом ограничений и трудностей, среди которых особое место занимают паразитарные заболевания. Паразиты, включая простейших, гельминтов и ракообразных, могут вызывать массовые эпизоотии, приводящие к значительным экономическим потерям из-за снижения продуктивности, гибели рыбы и затрат на лечение. На рисунке 1 представлена схема распространения паразитов в аквакультуре.



Рис. 1. Факторы распространения паразитов в аквакультуре

Ботриоцефалия. Ботриоцефалез – паразитарное заболевание рыб, которое характеризуется паразитизмом в передней части кишечника рыбы. Ботриоцефалез рыб распространен в прудовых и садковых хозяйствах прудов-охладителей, а также в естественных водоемах. Ботриоцефалус был обнаружен у 26 видов рыб семейства карповых, лососевых (угольцов) и у некоторых хищных рыб (сома, судака).

Возбудителем заболевания является *Bothryocephalus acheilognathi* (*B. gowkongensis*) [5]. Развитие гельминтов происходит при участии промежуточных хозяев, которыми являются различные виды циклопов. Заражение происходит при поедании циклопами корацидий, которые после формируются в процеркоиды. Непосредственно заражение рыб уже происходит при поедании веслоногих рачков. Продолжительность жизни паразита в кишечнике рыбы составляет один год [6].

Заболевание поражает в первую очередь карпа, толстолобика, серебристого и золотистого карася, белого амура, а в особенности молодь данных видов наиболее подвержены инвазии. При высоком уровне инвазии возможна гибель молоди рыб. Передача инвазии происходит с фекалиями, содержащими яйца гельминтов, и переносится потоком воды, также возможна передача заболевания путем транспортировки. Двухлетние рыбы заражаются в весенне-летний период, степень их зараженности обычно низкая. Возрастающая зараженность рыб ботриоцефалией зависит от температурных условий, так как снижение температуры задерживает развитие инвазии.

Больные сеголетки карпа и белого амура плохо переносят зимовку, нередко погибая в зимовальных прудах. У зараженных рыб наблюдается угнетенное поведение, истощение, западание глаз, увеличение брюшной полости, а иногда из анального отверстия свисает туловище паразита, которое называют стробилой, происходит выделение продуктов обмена и как следствие понижение уровня гемоглобина на 30 %, увеличение количества лейкоцитов [7].

У маточного поголовья исследуют фекалии по методу Фюллеборна с целью выявления гельминтоносительства. Диагностически значимым методом считается вскрытие кишечника и обнаружение зрелых особей паразита. Метод Фюллеборна – это флотационный способ обнаружения гельминтов с помощью добавления раствора хлорида натрия. Метод позволяет выявить яйца даже при малом их количестве, поэтому он эффективнее, чем нативный мазок, однако выполнять его сложнее. Достоинство метода и в том, что он доступен и стоит дешево.

Проводят рыбоводно-мелиоративные мероприятия, дезинвазию ложа хлорной известью и дегельминтизацию с помощью антигельминтного препарата на основе никлозамида – фенасал. На хозяйства с подтвердившимся диагнозом накладывают ограничения, в виде запрета на вывоз больных и ввоз здоровых рыб.

Филометроидоз (*Philometroidosis*) – это гельминтозное заболевание, вызываемое *Philometroides lusiana* из семейства *Philometridae*. В период взрослой стадии паразиты локализуются в мышцах, в личиночной стадии – во внутренних органах.

Заболевание характеризуется истощением, анемией жабр, образуются бугорки и матовость [8]. Возбудитель заболевания наносит вред печени, почкам, плавательному пузырю и кровеносным сосудам. Разрушение стенки пузыря ведет к нарушению координации движений и гибели мальков. У рыб старшего возраста, при перемещении зрелых самок сопровождается разрушением кожных покровов, образованием язв [9], это дает возможность для вторичной инфекции, возбудителем которых могут стать бактерии и грибы, обитающие в воде.

В процессе жизнедеятельности гельминты выделяют токсины, оказывающие влияние на центральную нервную систему, и приводят к снижению уровня гемоглобина

и лейкоцитозу. Согласно наблюдениям Г. В. Василькова [10], указывается на изменение количественных и качественных показателей химического состава мышечной ткани: ее обводнение, снижение почти вдвое содержания жира и до 25 % – белка. Заболевание приводит к уменьшению концентрации гемоглобина, снижению количества эритроцитов и повышению содержания лейкоцитов.

После подтверждения диагноза хозяйство объявляют неблагополучным. Неблагополучные пруды на зиму спускают. Для производителей проводят обработку антигельминтным препаратом локсураном внутрь брюшной полости.

Кавиоз – инвазионное заболевание рыб, характеризующееся поражением пищеварительного тракта. На рыбах пресноводных водоемов паразитирует несколько видов цестод из отряда гвоздичников Caryophyllidea, однако, наиболее распространенным и патогенным из них является *Khawia sinensis* из семейства Lytocestidae, обитающий в кишечнике карпа, сазана и их гибридов, черного и белого амуров. Заболевание распространено во многих странах Юго-Восточной Азии, а в последние десятилетия захватывает Европейский континент. Этот вид паразита был завезен в европейскую часть России вместе с амурским сазаном из бассейна Амура. В новых экологических условиях он хорошо адаптировался и массово поражает рыб в прудовых хозяйствах.

K. sinensis – крупный ленточный гельминт белого цвета. Тело паразита нерасчлененное, лентовидное, длиной до 17,5 см и шириной до 5,5 мм. Головной конец веерообразно расширен, с фестонами по краю. Четко выраженной шейки нет. Тело слегка сужено в задней части. Половой комплекс один. Внутри на некотором расстоянии от головки находятся многочисленные семенники и желточники. В задней части тела имеется характерный Н-образный яичник, передние его лопасти шире и длиннее задних [11]. Развитие гвоздичника происходит с участием промежуточного хозяина – малощетинкового червя трубочника *Tubifex tubifex*. Инвазированные рыбы с экскрементами выделяют яйца гельминта, в иле и при достаточной влажности яйца могут сохраняться до 3–4 месяцев. Затем в яйце зарождается корацидий, который поедает промежуточного хозяина – малощетинковый червь. Окончательный хозяин – рыба поедает червя с уже сформировавшимся внутри него процеркоидом [12].

Гельминт встречается повсеместно в зонах, специализирующихся на выращивании карповых рыб, и является возбудителем заболевания прудовой рыбы, преимущественно сеголетков, годовиков карпа и сазано-карповых гибридов. Старшие возрастные группы этих рыб являются паразитоносителями. В отдельных случаях паразита выявляют в кишечнике сеголетков и годовиков белого и черного амуров. В первой половине лета мальки карпа начинают переходить на питание бентосными организмами, что приводит к заражению кавиозом при потреблении инфицированных олигохет, сохранившихся в водоемах с предыдущего года. Эпизоотические вспышки регистрируются в августе, а к осени наблюдается снижение заболеваемости. Однако, рыбы, заразившиеся осенью, остаются переносчиками заболевания в течение всего зимнего и весеннего периодов, а также возможными источниками будущих вспышек [13].

Клинические признаки заболевания включают вялость, снижение подвижности, преимущественное пребывание рыбы на мелководье, а также умеренное вздутие брюшка. Рыбы имеют пониженную упитанность или истощение, задержка роста и нарушение развития. При интенсивном поражении наступает гибель рыб, в наибольшей степени, сеголеток карпа. Среди двухлеток и рыб старших возрастных групп гибель от кавиоза наблюдается редко.

Распространению заболевания способствует заилению прудов, при котором увеличивается число олигохет – промежуточных хозяев гвоздичника. Для предупреждения

кавиоза необходимо проводить мелиоративные мероприятия по ограничению численности трубочников. Эффективным средством является тщательное осушение и промораживание ложа прудов. Для уничтожения яиц гельминта следует систематически дезинфицировать пруды. В летний период рекомендуется как можно более раннее подкармливание сеголетков карпа искусственными кормами. При этом усиливается перистальтика кишечника, и рыбы быстрее освобождаются от гельминтов. Для лечения больных рыб применяют фенасал в составе гранулированного лечебного корма циприноцестина [13].

Лигулез. *Ligula intestinalis* (Linnaeus, 1758) Gmelin, 1790 – цестода из семейства Diphyllbothriidae Lühe, 1910, встречающаяся в пресноводных экосистемах по всему миру. Жизненный цикл состоит из трех хозяев, в котором планктонный веслоногий рачок является первым промежуточным хозяином, на этой стадии паразит находится на стадии процеркоида, рыба — вторым промежуточным хозяином, в котором цестода развивается до стадии плероцеркоида, а рыбаодная птица — окончательным хозяином. Плероцеркоиды – крупные ремневидные гельминты белого или слегка желтоватого цвета, достигающие 5–120 см длины и 0,5–1,7 см ширины. Наиболее чаще заражаются рыбы из семейства карповых [14].

В полости тела рыбы, плероцеркоиды растут и достигают крупных размеров, это приводит к сдавливанию внутренних органов, нарушая их функции. А уже вследствие постоянного давления печень, селезенка, половые железы и другие органы атрофируются [15]. Зараженная рыба перестает питаться, отстаёт в развитии, сильно истощается. Происходит атрофия половых желез, и рыба становится бесплодной. Инфицированная рыба плавает у поверхности воды, что делает ее лёгкой добычей для ихтиофагов. Нередко у поражённых рыб происходит разрыв брюшной стенки и плероцеркоиды выходят в воду, где остаются жизнеспособными до 10 дней и могут быть съедены птицами [16].

Для борьбы с лигулезом проводят комплекс мероприятий, основанный на особенностях биологии паразита и эпизоотологических закономерностях заболевания. Методы направлены на исключение промежуточного и окончательного хозяев паразитов. В таких хозяйствах отпугивают рыбаодных птиц, не допускается их гнездование, а для уничтожения промежуточных хозяев, содержат в зимнее время без воды. Все увлажненные места дезинфицируют хлорной или негашеной известью.

Дактилогироз – острое паразитарное заболевание рыб, вызываемое моногенетическими сосальщиками из рода *Dactylogyrus*, поражающие жаберные лепестки рыб.

У карпа возбудителем является *Dactylogyrus vastator*, *Dactylogyrus extensus* и др., у белых амуров – *Dactylogyrus lamellatus*, *Dactylogyrus ctenopharyngodonis*, у толстолобиков – *Dactylogyrus nobilis*, *Dactylogyrus Aristichthus*, *Dactylogyrus hypophthalmichthys* [17].

Dactylogyrus vastator имеет плоское удлинённое тело, длина 0,5–1,2 мм, ширина 0,15–0,35 мм. На переднем конце тела выступают 4 головные лопасти с отверстиями, из которых выделяется липкий секрет. На нижней стороне головного конца расположены 4 светопреломляющих тельца, состоящих из скопления чёрного пигмента. На заднем конце тела находится фиксаторный диск с большими крючьями и 14 маленькими краевыми крючками. Ротовое отверстие открывается позади светопреломляющих чёрных телец, ведёт в большую глотку, переходящую в короткий пищевод. От пищевода берут начало 2 ствола кишечника, соединяющиеся в задней части тела. Половая система состоит из одного семенника, одного яичника и желточников. Оплодотворённое яйцо овальной формы, покрыто тонкой скорлупой и снабжено коротким стебельком [18].

В яйце развивается личинка, свободно плавающая в воде. Она напоминает материнский организм, на поверхности есть венчик ресничек и прикрепительный аппарат. Прикрепившись к жабрам хозяина, личинка постепенно теряет реснички и приобретает форму молодой трематоды. Продолжительность формирования личинки внутри яйца зависит от температуры окружающей среды, 22–25 °С – оптимальная.

Дактилогирозы распространены во всех зонах разведения карповых, особенно в южных регионах [16]. К дактилогирозу восприимчивы прудовые карпы всех возрастов, но чаще болеет молодь. Среди диких рыб дактилогироз часто встречается у карасей.

Источник инвазии – больные карпы и караси. Личинки дактилогирозов могут быть перенесены из одного водоёма в другой. Сеголетки и годовики сильно поражаются дактилогирозами в зимовалах при густой посадке и оставлении в них весной до апреля – мая. Эпизоотии дактилогироза наблюдаются в хозяйствах с недостаточно проточной водой, сильно загрязнённых прудах, при прогревании в них воды до 22–25 °С.

Причинами заболевания является высокая температура воды, недостаток пищи, увеличенная плотность посадки, а также выращивание молоди рыб с более старшими особями [19]. Паразиты прикрепляются к жаберным лепесткам и питаются их соками и клетками. На жаберных лепестках появляются кровоподтёки, серые пятна, некротические участки. При сильном поражении рыб жаберный аппарат утрачивает функции газообмена, и рыба погибает от удушья.

В таблице 1 представлены основные заболевания паразитарной природы в современной аквакультуре.

Таблица 1

Основные паразитарные заболевания в современной аквакультуре

Наименование заболевания	Возбудитель	Клинические признаки	Профилактика и лечение	Источник информации
Ботриоцефалез	цестоды из семейства <i>Bothryocephalidae</i> , <i>Bothryocephalus acheilognathi</i> (<i>B. gowkongensis</i>)	выраженное снижение массы тела рыб; заостренная спинка; запавшие глаза; сравнительно большое брюшко; угнетенность; вялость; стремление держаться ближе к поверхности воды; членики паразита, свисающие из анального отверстия; истонченные стенки кишечника; вздутые или деформированные петли кишечника	контроль ввоза и вывоза рыбы; запрет на вывоз больных особей из зараженных хозяйств; запрет на ввоз здоровой рыбы в неблагополучные водоемы; осушение и обработка прудов (хлорная известь – 5 ц/га, негашеная известь – 25 ц/га)	[5]
Филометроидоз (Philometroidosis)	живородящие нематоды из семейства <i>Philometridae</i> , <i>Philometroides lusiana</i>	гиперемия (покраснение) в местах локализации паразитов; очаги воспаления; отёк тканей; деформация	антигельминтики или готовый корм с одним из препаратов данной группы. В литературных источниках есть	[8]

		чешуек; мозаичный рисунок на чешуе; в чешуйчатых кармашках – самки нематод (красно-бурого цвета, свёрнутые в спираль, длиной до 16 см)	информация об эффективности множества препаратов, из которых только два («Филомед» и «Филаэром») входят в Государственный реестр лекарственных средств для ветеринарного применения	
Кавиоз	цестоды из семейства <i>Lytocestidae</i> , <i>Khawia sinensis</i>	вялость; сниженная активность; отказ от корма или слабый аппетит; плавание у поверхности воды; возможны признаки гипоксии (заглатывание воздуха)	применение гранулированных лечебных кормов; организация летования водоемов, биологическая мелиорация; регулярный паразитологический контроль; соблюдение рыбоводно-мелиоративных мероприятий	[11]
Лигулез	ремнецы из семейства <i>Ligulidae</i> , <i>Ligula intestinalis</i>	выраженное вздутие брюшной полости; нарушение плавучести; в критическом состоянии: разрыв брюшной стенки, выход паразитов в воду, быстрая гибель пораженных особей; патологические изменения: механическое давление гельминтов на внутренние органы, смещение внутренних органов, нарушение работы плавательного пузыря, острое воспаление брюшины	полный спуск воды из водоема; тщательный вылов всей рыбы; осушение дна пруда; дезинфекция увлажненных участков (норма расхода: 30 ц негашёной извести на 1 га); особое внимание прибрежной зоне; регулярный сбор и утилизация выброшенной на берег больной рыбы, заражённой растительности; запрет на скормливание поражённой рыбы птицам	[14]
Дактилогироз	моногенеи из рода <i>Dactylogyrus</i>	истощение; глотание воздуха на поверхности воды; жабры бледные, мозаичные; рыбы отстают в росте	лечебные ванны; раздельное содержание прудовых и диких рыб, в частности карасей; летование прудов и обработка ложа известью	[17]

Вирусные заболевания – представляют собой одну из ключевых биологических и экономических проблем в современной аквакультуре. Интенсивное развитие отрасли, сопровождающееся увеличением плотности посадки гидробионтов, расширением международной торговли и ростом стрессовых факторов среды, способствует как возникновению, так и быстрому распространению вирусных заболеваний. Наиболее значимыми с точки зрения эпизоотологии и последствий для производства являются возбудители вирусов, способные вызывать острые эпидемии с высокой летальностью, длительным носительством и широким спектром восприимчивых видов [20].

Необходимость изучения вирусных болезней в аквакультуре обусловлена не только их влиянием на продуктивность и выживаемость культивируемых организмов, но и необходимостью совершенствования методов диагностики, профилактики и управления биологическими рисками.

Оспа карпов. Оспа карпов (Carп рох) – вирусное заболевание карповых рыб, вызываемое ДНК-содержащим герпесвирусом *Cyprinid herpesvirus 1* (CyHV-1). Патология проявляется образованием плотных папиллом на коже, чаще всего у карпа, сазана и их гибридов, преимущественно у особей старше двух лет.

Заболевание зарегистрировано в прудовых хозяйствах Европы (в частности, в Германии, Чехии и России), а также в Японии и Северной Америке. Преимущественно наблюдаются спорадические вспышки, которые не приводят к массовой гибели рыбы. Тем не менее, описаны эпизоды вспышек поражения оспой у молоди карпов, сопровождавшиеся высокой смертностью [21]. В результате гистологических исследований обнаружены изменения в печени, почках и кишечнике. Наблюдается появление вакуолей разного размера в цитоплазме, которые заполнены цитоплазматической жидкостью, а также некроз паренхимы, гепатит и гломерулонефрит (заболевания почек).

Возбудитель впервые описан немецким исследователем Г. Шубертом методом электронной микроскопии. Вирус локализуется в клетках эпидермиса: капсид размером около 113 нм – в ядрах, вирионы размером до 190 нм – в цитоплазме [21]. Успешное культивирование вируса на клеточных линиях при температуре 15–20 °С впервые проведено в Японии в 1980-х годах.

Развитию болезни способствует ухудшение санитарного состояния водоемов, недостаток кальция, а также близкородственное скрещивание. Папилломы представляют собой доброкачественные кожные опухоли, формирующиеся из гиперплазированного эпителия. При прогрессировании новообразования могут сливаться в крупные конгломераты, поражая тело, плавники и жабры. Наглядно оспа карпа представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Наросты на коже карпа при оспе [22]

Заболевание хроническое, но при обширных поражениях у рыб наблюдаются истощение, замедление роста, размягчение костей и скелетные деформации. Внутренние органы, как правило, не изменены, хотя у мальков возможна генерализация инфекции с гистопатологией печени, почек и кишечника.

Профилактика включает санитарные меры, летование прудов, известкование водоемов, добавление мела, витаминов и белково-витаминных добавок в рацион. Селекционные программы направлены на предотвращение инбридинга. Тяжело поражённую рыбу утилизируют или скормливают животным после термообработки; условно здоровую допускают к реализации [23].

Герпесвирусная инфекция осетровых рыб. Герпесвирусная инфекция осетровых рыб (ГВИОС) – это системное вирусное заболевание, зафиксированное в США и Канаде.

Вирус осетровых инвазий был обнаружен у молоди и более крупных особей (примерно до 50 см). Исследования помогли прояснить, насколько опасен вирус осетровых для развития интенсивного разведения этих рыб. Разные размеры осетровых, заражённых вирусом, указывают на возможную вертикальную передачу вируса и на то, что взрослые особи являются носителями вируса осетровых [24, 25]. Интенсивные условия разведения (например, высокая плотность посадки) являются предрасполагающими факторами для развития заболеваний [26].

На сегодняшний день у американских осетров выявлено десять вирусов, наибольшую угрозу среди которых представляют аденовирусы, иридовирусы и два герпесвируса. Впервые болезнь была зафиксирована в 1990-х годах у белого (*Acipenser transmontanus*) и тупорылого осетра (*Acipenser brevirostrum*) в США и Канаде [27, 28]. В России первая вспышка заболевания была зарегистрирована в 2006 году на молоди сибирского осетра (*Acipenser baerii*) с массовой гибелью [29]. Диагностика осетровых герпесвирусных инфекций проводится в основном с помощью методов электронной и световой микроскопии, позволяющих визуализировать структуру вириона и патологию тканей хозяина [30, 31].

Возбудителем является герпесвирус, полученный от сибирского осетра, известен как *Siberian sturgeon herpesvirus* (SbSHV) и признан генетически близким к североамериканским штаммам. С помощью электронной микроскопии было выявлено, что наибольшее содержание вируса в коже, слизи, печени и почках. Вирус способен оставаться активным при 4 °С и сохраняться до 7 месяцев, при 45 °С в течение 15 мин вирус утрачивает патогенные свойства и погибает в прудовой воде при 15 °С через 5–10 суток [29]. Гибриды сибирского и русского осетров, стерлядь и их гибриды с бестером проявляют меньшую восприимчивость, с показателями заболеваемости и летальности 25–40 % [32]. Перенесшие болезнь особи могут сохранять вирус и оставаться переносчиками заболевания до двух месяцев и представлять опасность.

У инфицированных особей наблюдается образование язв, микроэрозий и очаги некроза, данные нарушения кожного барьера способствуют распространению вируса в организме. Через несколько дней появляются выраженные сосудистые расстройства: точечные кровоизлияния, гиперемия кожи, полупрозрачные узелки (бляшки) на боках и спине. На плавниках – бледные участки, налёт слизи, деструкция тканей. Представлена на рисунке 3.

В настоящее время специальные меры борьбы и профилактики герпесвирусной инфекции осетровых (ГВИОС) не разработаны. Поэтому применяют стандартизированные мероприятия, а именно вводят карантинные меры. Ограничивают перевозки молоди с целью разведения. Используют лекарственные препараты для лечебно-профилактической обработки рыб для снижения риска осложнений [23].



Рис. 3. Множественные кровоизлияния у осетра при герпесвирусной инфекции [33]

Монодон-бакуловиральная инфекция креветок. Монодон-бакуловиральная инфекция креветок – это болезнь, впервые обнаруженная у тигровых креветок на Тайване, позднее в других частях земного шара, где культивируют различные виды креветок.

Распространение вирусов среди ракообразных зачастую происходит через транспортировку инфицированного исходного материала, что делает карантинные меры важнейшим фактором безопасности и методом профилактики. Впервые заболевание было зарегистрировано в 1977 году у тигровой креветки (*Penaeus monodon*) на Тайване. Заболевания, поражающие личиночные стадии креветок, характеризуются особенно высоким патогенезом: например, на Тайване в ряде хозяйств зарегистрирована смертность, достигающая 90 %, что привело к резкому сокращению производства тигровых креветок за счёт массовой гибели молоди.

Возбудитель – ДНК-содержащий бакуловirus *Penaeus monodon Baculovirus*, обладающий высокой вирулентностью в отношении личиночных и постличиночных стадий креветок. Он преимущественно поражает эпителий пищеварительной железы и средней кишки, что приводит к резкому нарушению обмена веществ, пищеварения и, как следствие, – быстрой гибели молоди. Одной из ключевых проблем в борьбе с MBV является вирусоносительство у взрослых производителей, которые клинически здоровы, но передают вирус следующему поколению через репродуктивные продукты. Это делает невозможным полную эрадикацию инфекции без жёстких мер биоконтроля.

Синдром белых пятен, наблюдаемый у ракообразных, представляет собой комплекс заболеваний, вызываемых группами очень сходных бакуловирусов. У культивируемых креветок смертность обычно достигает 100 % в течение 3–10 дней с момента появления первых признаков [34]. Клинические признаки представлены на рисунке 4.

Папилломатоз атлантического лосося. Папилломатоз атлантического лосося (*Papillomatosis salmonis*) – опухолевое заболевание, проявляющаяся в период выращивания семги.

Болезнь, характеризуется появлением папиллом на поверхности тела, сопровождается гибелью молоди рыб и наносит ощутимый ущерб воспроизводству атлантического лосося. Она встречается в Финляндии, Швеции, Норвегии, Великобритании и др.

Этот герпесвирус (*Salmonid herpesvirus 4*, SalHV4) обнаруживается с помощью электронной микроскопии в ядрах и цитоплазме эпителиальных клеток папиллом, а также в межклеточном пространстве [35]. Вирус диаметром 110 нм заключен во внешнюю оболочку, за счет чего общий диаметр вирионов составляет 200–250 нм [36].



Рис. 4. Синдром белых пятен у креветок, вызванный монодон-бакуловирусной инфекцией [34]

В России случаи массового проявления болезни регистрируются на рыбоводных предприятиях, начиная с июля, с наибольшей выраженностью в сентябре. Наибольшую восприимчивость демонстрируют двух- и трёхлетние особи в фазе смолтификации. В этих возрастных группах уровень заболеваемости может достигать 90 %, а смертность – до 50 %. Заболевание обычно проявляется на фоне повышенного загрязнения водоемов солями тяжелых металлов и другими токсикантами [36]. Некоторые авторы в своих трудах связывают возникновение папилломатоза с нарушением гормональной перестройки молоди семги при ее длительной передержке в пресной воде [35].

Болезнь, характеризуется наличием опухолей серо-белого цвета, плотной консистенции и диаметром до 10 мм. Поверхность новообразований – шероховатая, с точечными кровоизлияниями. Они локализуются на спине, боках, голове и плавниках рыбы. Клинические признаки представлены на рисунке 5.



Рис. 5. Папилломатоз у молоди атлантического лосося, пойманной при температуре 10 °С [37]

Осенью наблюдается естественное отторжение наростов с образованием язв, которые часто инфицируются грибами (в частности, сапролегнией) и бактериями, вызывая некроз и распад тканей, вплоть до разрушения хвостового стебля.

Рыбу с выраженными поражениями допускается использовать в термически обработанном виде для кормления животных. Дополнительно целесообразно проводить химический контроль продукции на наличие тяжёлых металлов и токсикантов. Вводят ограничение транспортировки рыбы. Необходимы строгое соблюдение сроков содержания молоди, обработка водоемов, оборудования.

Вирусная геморрагическая септицемия. Вирусная геморрагическая септицемия (ВГС) – это опасное вирусное заболевание рыб, которое относится к числу трансмиссивных болезней, вызывающих массовую гибель как в промысловых, так и в декоративных популяциях рыб. Оно поражает более 50 видов пресноводных [38].

ВГС поражает выращиваемую на фермах радужную форель и некоторые другие пресноводные виды в Европе и Японии. Вирус ВГС также был выделен из множества диких морских рыб в Северной Атлантике, Балтийском море и североамериканской части Тихого и Атлантического океанов. Этот вирус также был зарегистрирован в Корею.

Возбудителем ВГС является рабдовирус пулевидной формы (VHSV) рода *Novirhabdovirus*, семейства *Rhabdoviridae*. Вирус чувствителен к эфиру и хлороформу, способен полностью инактивироваться при температуре 45 °С, а также его могут инактивировать ультрафиолетовые лучи. Геном вируса представляет собой одноцепочечную молекулу РНК, состоящей из 11 000 нуклеотидов. Вирус обладает оболочкой, содержащей мембранный гликопротеин, который является нейтрализующим поверхностным антигеном.

Эксперименты с заражением путем погружения привели к 100 % смертности у тихоокеанской сельди при инфицировании её вирусом [39]. Заболевание развивается в прохладной или холодной воде, при этом массовая гибель отмечается при температуре около 9–12 °С. Наиболее восприимчивы к вирусу маленькие мальки радужной форели – у них уровень смертности может достигать почти 100 %, но болезнь может поражать радужную форель всех размеров и их смертность варьирует от 5 до 90 %.

Все рыбы, пораженные вирусом, имеют сходные клинические признаки: у рыб отмечается потемнение кожи, пучеглазие, кровоизлияния в глазах, основании плавников и анемия жабр. Также признаком является многочисленные кровоизлияния в скелетных мышцах. Из дополнительных признаков неравномерный окрас и бледность почек и печени. Клинические признаки представлены на рисунке 6.

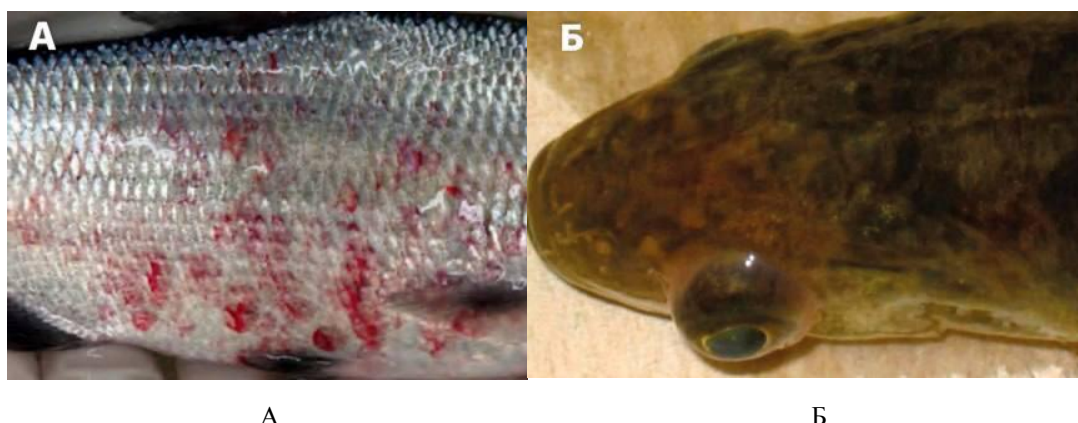


Рис. 6. Клинические признаки вирусной геморрагической септицемии. Петехиальные кровоизлияния по бокам тела у сельди (А). Экзофтальм, наблюдаемый у желтого окуня (Б) [40]

Для борьбы со вспышками вируса необходимо введение карантина. Современные методы борьбы включают программы эпиднадзора за здоровьем рыб и такие меры, как ликвидация и хранение под паром. Эти процедуры позволили ликвидировать вирусную геморрагическую септицемию в некоторых частях Европы. VHSV чувствителен ко многим распространённым дезинфицирующим средствам, включая формалин, йодофорные дезинфицирующие средства, гидроксид натрия и гипохлорит натрия. VHSV очень чувствителен к ультрафиолетовому излучению (длина волны 280–200 нм), которое можно использовать для обработки приточной воды в инкубаторах или для обработки воды в системах рециркуляции. Кроме того, этот вирус инактивируется при высушивании и pH 2,5 или 12,2.

Рекомендации по лабораторной диагностике заболеваний. На начальном этапе важную роль играют наблюдение за характерными клиническими признаками и учет эпизоотической обстановки. На основании этих данных может быть поставлен предварительный диагноз.

Для окончательного подтверждения заболевания применяются различные методы лабораторной диагностики, а именно электронная микроскопия, позволяющая визуализировать морфологию вирусных частиц в клетках поражённых тканей; гистологическое исследование, используемое для выявления характерных изменений в структуре тканей, включая гиперплазию, некроз и воспалительные реакции; выделение вируса на чувствительных клеточных линиях (например, SSO-2 для диагностики герпесвирусов осетров); биопробы на восприимчивых видах рыб, применяемые при отсутствии доступных методов культивирования или для оценки патогенности; молекулярно-биологические методы: полимеразная цепная реакция (ПЦР), в том числе с использованием кросс-реактивных праймеров (например, для выявления SalHV-4), и иммуноферментный анализ (ИФА) – наиболее точные и специфичные инструменты для экспресс-диагностики вирусных инфекций.

Основные вирусные заболевания представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные вирусные заболевания в современной аквакультуре

Наименование заболевания	Возбудитель	Клинические признаки	Профилактика и лечение	Источник информации
Оспа (папилломатоз, эпителиома) карпа (<i>Carp pox</i>)	<i>Cyprinid herpesvirus</i> (род <i>Cyprinivirus</i> , семейство <i>Alloherpesviridae</i>)	Образование папиллом, опухолевых наростов, которые четко ограничены, имеют плотную парафиноподобную консистенцию. Наросты разрастаются и занимают большие участки тела, а именно на плавниках и жабрах.	Проведение санитарных мероприятий, в особенности рекомендуется летование прудов. Известкование водоемов, добавление в рацион мела и витаминов.	[21–23]
Герпесвирусная инфекция осетровых рыб (ГВИОС)	<i>Acipenserid herpesvirus 2</i> (род <i>Ictavirus</i> , семейство <i>Alloherpesviridae</i>), <i>Siberian sturgeon herpesvirus</i>	Образуются язвы, микроэрозия и некроз. Впоследствии, появляются точечные кровоизлияния, гиперемия кожи, полупрозрачные узелки (бляшки) на боках и спине. На плавниках – бледные участки, налёт слизи, деструкция тканей.	Использование лекарственных препаратов для лечебной профилактики, проведение общих санитарных мероприятий.	[23, 29, 33]

Монодон- бакуловиру- сная инфекция креветок (MBV)	<i>Baculovirus</i> (семейство Baculoviridae)	Снижение аппетита, потеря подвижности, появление белых пятен, представляющих собой отложения солей кальция.	Основной мерой биозащиты остаются строгие карантинные мероприятия, направленные на предотвращение заноса вируса в здоровые аквакультурные хозяйства.	[34]
Папилломатоз атлантического лосося (<i>Papillomatosis salmonis</i>)	<i>Salmonid herpesvirus 4</i> (род <i>Salmovirus</i> , семейство Alloherpesviridae)	Появление новообразований серо- белого цвета с точечными кровоизлияниями, а в осенний период наросты отторгаются и образуются язвы.	Ограничивается транспортировка рыб, строгое соблюдение сроков содержания молоди в пресной воде, санитарная обработка водоёмов и оборудования.	[35–37]
Вирусная геморраги- ческая септицемия	Рабдовирус (VHSV) (род <i>Novirhabdovirus</i> , семейство Rhabdoviridae)	Образуются множественные кровоизлияния в скелетной мускулатуре. Наблюдается потемнение кожи, развивается экзофтальм (выпученность глаз), появляются кровоизлияния в области глаз, у основания плавников, а также отмечается анемия жабр.	Введение карантина, ликвидация и хранение под паром. Применение дезинфицирующих средств, ультрафиолетового излучения	[38–40]

Заключение. Современная аквакультура сталкивается с серьёзными проблемами, среди которых заболевания гидробионтов занимают ведущее место. Паразитарные и вирусные болезни рыб и ракообразных не только наносят вред водным экосистемам, но и приносят значительный экономический ущерб предприятиям, занимающимся рыбным хозяйством. Массовая гибель молоди, ухудшение товарного вида формируют необходимость комплексного подхода к профилактике и лечению распространенных заболеваний.

Паразитарные заболевания демонстрируют высокую интенсивность инвазий при нарушении санитарно-эпидемиологического режима, а их патогены характеризуются сложными циклами развития с участием промежуточных хозяев, что осложняет контроль за эпизоотическим процессом. Не менее опасны вирусные инфекции, проявляющиеся в виде острых эпизоотий с высокой летальностью и отсутствием специфической терапии.

Бактериоцины представляют собой многообещающую альтернативу традиционным антимикробным препаратам в аквакультуре, обладая высокой эффективностью против патогенных бактерий при минимальном негативном воздействии на окружающую среду и здоровье гидробионтов. Их способность подавлять устойчивые к антибиотикам штаммы, а также совместимость с пробиотиками и другими биологическими методами защиты открывают новые перспективы для устойчивого развития аквакультуры. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию производства, расширение спектра действия бактериоцинов и разработку практических схем их применения. Внедрение этих соединений в систему профилактики и лечения заболеваний позволит снизить экономические потери, повысить безопасность продукции и минимизировать

риски формирования антибиотикорезистентности, что соответствует принципам ответственного рыбоводства [4].

Решение этих проблем требует внедрения системного подхода, который включает строгий эпизоотический мониторинг, постоянную диагностику, применение антибиотиков с учетом устойчивости штаммов, карантин, контроля качества воды и кормов, а также обработку водоемов.

Работа проведена в рамках выполнения проекта «Разработка персонифицированных кормов нового поколения с растительными и пробиотическими добавками для повышения выживаемости и улучшения здоровья рыб» (FZNE-2023-0003)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Idowu T. A., Adedeji H. A., Sogbesan O. A. Fish disease and health management in aquaculture production // International Journal Environmental & Agricultural Science. – 2017. – Vol. 1, No 1. – P. 002.
2. Mansfield K., King N. Viral diseases // Nonhuman primates in biomedical research. – Academic Press, 1998. – P. 1-57.
3. Despommier D. D., Gwadz R. W., Hotez P. J. Parasitic diseases. – Springer Science & Business Media, 2012. – P. 283
4. Pereira W. A., Mendonca C.M., Urquiza A.V. Use of probiotic bacteria and bacteriocins as an alternative to antibiotics in aquaculture // Microorganisms. – 2022. – Vol. 10, No 9. – P. 1705.
5. Cooper A. R. A morphological study of bothriocephalid cestodes from fishes // The Journal of Parasitology. – 1917. – Vol. 4, No 1. – P. 33-39.
6. Robert F., Boy V., Gabrion C. Biology of parasite populations: population dynamics of bothriocephalids (Cestoda: Pseudophyllidae) in teleostean fish // Journal of Fish Biology. – 1990. – Vol. 37, No 2. – P. 327-342.
7. Scholz T., Di Cave D. Bothriocephalus acheilognathi (cestoda: pseudophyllidae) parasite of freshwater fish in Italy // Parasitologia. – 1992. – Vol. 34. – P. 155-158.
8. Хорошелева В. Н., Стрижакова Т.В., Мосеян Г.В. Филометроидоз объектов аквакультуры: биология возбудителя, патогенез, способы лечения (обзор литературы) // Рыбное хозяйство. – 2025. – № 2. – С. 66-71
9. Vismanis K.O. On the morphology of Philometrus vismanis, 1966 (Nematoda, Dracunculidae) // Zoological Journal. – 1967. – Vol. 46, Issue 5. – P. 759-762
10. Васильков Г. В. Патогенез и симптомы филометроидоза карпов // Бюллетень ВИЭВ. – 1975. – Вып. 25. – С. 45-46
11. Oros M., Hanzelova V., Scholz T. Tapeworm Khawia sinensis: review of the introduction and subsequent decline of a pathogen of carp, Cyprinus carpio // Veterinary parasitology. – 2009. – Vol. 164, No 2-4. – P. 217-222.
12. Feng Y., Feng H.L., Fang Y.H. Characterization of the complete mitochondrial genome of Khawia sinensis belongs among platyhelminths, cestodes // Experimental Parasitology. – 2017. – Vol. 177. – P. 35-39.
13. Scholz T. Early development of Khawia sinensis Hsü, 1935 (Cestoda: Caryophyllidae), a carp parasite // Folia Parasitol. – 1991. – Vol. 38. – P. 133-142.
14. Gutiérrez J. S., Hoole D. Ligula intestinalis // Trends in Parasitology. – 2022. – Vol. 38, No 4. – P. 344-345
15. Bouzid W., Stefka J., Hypsa V. Geography and host specificity: two forces behind the genetic structure of the freshwater fish parasite Ligula intestinalis (Cestoda: Diphyllididae) // International Journal for Parasitology. – 2008. – Vol. 38, No 12. – P. 1465-1479.
16. Хорошелева, В. Н. Фауна и экология паразитов рыб в хозяйствах аквакультуры Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна: специальность 1.5.15: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Хорошелева Виктория Николаевна, 2022. – 174 с. – EDN: DROHWG.
17. Gibson D. I., Timofeeva T. A., Gerashev P. I. A catalogue of the nominal species of the monogenean genus Dactylogyrus Diesing, 1850 and their host genera // Systematic Parasitology. – 1996. – Vol. 35. – P. 3-48.
18. Vinobaba P. Some aspects of the biology of Dactylogyrus vastator Nybelin, 1924 (Monogenea) a gill parasite of Cyprinus carpio L. – 1994. – P. 1-46
19. Zhang X.P., Shang B.D., Wang G.T. The effects of temperature on egg laying, egg hatching and larval development of Dactylogyrus vastator //水生生物学报. – 2015. – Vol. 39, No 6 – P. 1177-1183.

20. Murray A. G. Epidemiology of the spread of viral diseases under aquaculture // Current opinion in Virology. – 2013. – Vol 3, No 1. – P. 74-78.
21. Sano T., Fukuda H., Furukawa M. Herpesvirus cyprini: biological and oncogenic properties // Fish Pathology. – 1985. – Vol. 20, No 2/3. – P. 381–388.
22. Sellyei B., Baska F., Varga A. Molecular detection of a novel cyprinid herpesvirus in roach (*Rutilus rutilus*) and asp (*Leuciscus aspius*) showing typical signs of carp pox disease // Archives of Virology. – 2020. – Vol. 165. – P. 1569-1576.
23. Грищенко Л.И., Елеев Э.Л. Герпесвирусные болезни рыб: распространение, течение, диагностика и профилактика // Российский ветеринарный журнал. – 2018. – № 1. – P. 22-28.
24. Drennan J.D., LaPatra S.E., Siple J.T. Transmission of white sturgeon iridovirus in Kootenai River white sturgeon *Acipenser transmontanus* // Diseases of aquatic organisms. – 2006. – Vol. 70. – P. 37-45.
25. LaPatra S.E., Groff J.M., Patterson T.L. Preliminary evidence of sturgeon density and other stressors on manifestation of white sturgeon iridovirus disease // Journal of Applied Aquaculture. – 1996. – Vol. 6, No 3. – P. 51-58.
26. Georgiadis M.P., Hedrick R.P., Carpenter T.E. Factors influencing transmission, onset and severity of outbreaks due to white sturgeon iridovirus in a commercial hatchery // Aquaculture. – 2001. – Vol. 194. – No 1-2. – P. 21-35.
27. Hedrick R.P., McDowell T.S., Groff J.M. Isolation of an epitheliotropic herpesvirus from white sturgeon *Acipenser transmontanus* // Dis. aquatic organisms. – 1991. – Vol. 11. – P. 49-51.
28. La Parta, S.E., Groff J.M., Kelth I. Case report: concurrent herpesviral and presumptive iridoviral infection associated with diseases in cultured shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum* (L.), from the Atlantic coast of Canada // J. Fish Diseases. – 2014. – Vol. 37. – P. 141–147.
29. Щелкунов А. И., Щелкунов И. С. Герпесвирусная болезнь сибирского осетра // Ветеринария. – 2010. – № 1. – С. 18-21.
30. Watson L.R., Yun S.C., Groff J.M. Characteristics and pathogenicity of a novel herpesvirus isolated from adult and subadult white sturgeon *Acipenser transmontanus* // Diseases of Aquatic Organisms. – 1995. – Vol. 22, No 3. – P. 199-210.
31. Johnston A.E., Shavaliar M.A., Scribner K.T. First isolation of a herpesvirus (Family Alloherpesviridae) from Great Lakes Lake Sturgeon sturgeon (*Acipenser fulvescens*) // Animals. – 2022. – Vol. 12, No 23. – P. 3230.
32. Елеев Э. Л., Грищенко Л. И., Заботкина Е. А. Герпесвирусная инфекция осетровых рыб: патоморфология, патогенез и диагностика болезни // Труды ВНИРО. – 2016. – Т. 162. – С. 116-128.
33. Stachnik M. et al. Emerging viral pathogens in sturgeon aquaculture in Poland: Focus on Herpesviruses and Mimivirus detection // Viruses. – 2021. – Vol. 13, No 8. – P. 1496.
34. Нестерчук С.Л., Остапенко В.А., Новиков М.В. Технологические основы и эколого-паразитарные проблемы аквакультуры: учебное пособие. – М.: Изд-во «Сельскохозяйственные технологии», 2022. – С. 96-97.
35. Shelkunow I.S., Karaseva T.A. Atlantic salmon papillomatosis Visualisation of herpesvirus like particles in singrowth of affected fish // Bull. Eur. Ass. Fish Pathol. – 1992. – Vol. 12, No 1. – P. 28–31.
36. Рудиков Н.И., Грищенко Л.И., Пичугина Т.Д. Эпидермальная папиллома (эпителиома) семги: эпизоотология, патоморфология, вопросы этиологии и профилактики // Сб. научн. трудов «Паразиты и болезни рыб». – М.: ВНИРО, 2000. – С. 113–121.
37. Doszpoly A., Karaseva T.A., Waltzek T.B. et al. Atlantic salmon papillomatosis in Russia and molecular characterization of the associated herpesvirus // Diseases of aquatic organisms. – 2013. – Vol. 107, No 2. – P. 121-127.
38. Walker P. J., Blasdel K.R., Calisher C.H. et al. ICTV virus taxonomy profile: Rhabdoviridae // Journal of General Virology. – 2018. – Vol. 99, No 4. – P. 447-448.
39. Skall H. F., Olesen N. J., Møllergaard S. Viral haemorrhagic septicaemia virus in marine fish and its implications for fish farming—a review // Journal of fish diseases. – 2005. – Vol. 28, No 9. – P. 509-529.
40. Faisal M., Shavaliar M., Kim R.K. et al. Spread of the emerging viral hemorrhagic septicemia virus strain, genotype IVb, in Michigan, USA // Viruses. – 2012. – Vol 4, No 5. – P. 734-760.

Поступила в редакцию 30.07.2025 г.

OVERVIEW OF THE MAIN PARASITIC AND VIRAL DISEASES IN AQUACULTURE

D. S. Sarkisyan, E. E. Cholutaeva, V. N. Shevchenko, D. V. Starostin, I. O. Martyniuk

Aquaculture, being a critically important food source, faces significant development constraints due to diseases of various etiologies that cause significant economic damage. This article provides a comprehensive overview of the main groups of diseases that threaten modern aquaculture: viral and parasitic. Viral and parasitic diseases are one of the key threats to the development of modern aquaculture. Special attention is paid to viral infections such as carp pox, sturgeon herpesvirus infection, Atlantic salmon papillomatosis and viral hemorrhagic septicemia, these diseases cause mass deaths and lead to high economic losses. Parasitic diseases, including botrycephalosis, filometroidosis, ligulosis, cavirosis, dactylogyrosis, and others, are also considered. These diseases are caused by high planting density, intensification of production processes and deterioration of environmental conditions, which contributes to the active spread of pathogens and complication of disease diagnosis processes. The methods of diagnosis, prevention and control of these diseases are described. The use of electron microscopy, histological studies and molecular biotechnological methods makes it possible to diagnose the disease at an early stage. Aquaculture is facing the spread of infections that require alternatives to antibiotics. Bacteriocins are natural peptides that suppress pathogens, including resistant strains. Their use reduces the incidence of aquatic organisms and increases product safety.

Keywords: aquaculture; fish diseases; viral diseases; parasitic invasions; pathogens; clinical signs; prevention; treatment; resistance.

Саркисян Диана Славиковна

студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: dianassarkisyan@mail.ru
Author ID: 1180124, SPIN-код: 8500-8112

Sarkisyan Diana Slavikovna

Student, Faculty of Agribusiness,
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: dianassarkisyan@mail.ru
Author ID: 1180124, SPIN-code: 8500-8112

Чолутаева Энкрин Эренценовна

студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: cholutaevaa@mail.ru

Cholutaeva Enkrina Erentsenovna

Student, Faculty of Agribusiness,
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: cholutaevaa@mail.ru

Шевченко Виктория Николаевна

кандидат биологических наук, старший научный
сотрудник научно-исследовательской лаборатории
«Центр агробиотехнологии»,
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: vikakhorosheltseva@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5001-4959
AuthorID: 1031771, SPIN-код: 5860-1478

Shevchenko Victoria Nikolaevna

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at
the Research Laboratory “Agrobiotechnology Center”,
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: vikakhorosheltseva@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5001-4959
AuthorID: 1031771, SPIN-code: 5860-1478

Старостин Дмитрий Владимирович

студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: ddmmiitr@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-2444-1720
AuthorID: 1241469, SPIN-код: 1277-5492

Starostin Dmitry Vladimirovich

Student, Faculty of Agribusiness,
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: ddmmiitr@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-2444-1720
AuthorID: 1241469, SPIN-код: 1277-5492

Мартынюк Игорь Олегович

студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: igor.mart2004@mail.ru
ORCID ID: 0009-0009-3977-8446
AuthorID: 1266744, SPIN-код: 3668-6495

Martyniuk Igor Olegovich

Student, Faculty of Agribusiness,
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: igor.mart2004@mail.ru
ORCID ID: 0009-0009-3977-8446
AuthorID: 1266744, SPIN-код: 3668-6495

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДГОТОВКИ ЮНИОРОВ В СОВРЕМЕННОМ СПОРТЕ

© 2025. К. Тодороски, Д. С. Пушкин

В статье рассматривается анализ психофизиологических параметров у спортивных юниоров (16–18 лет) на основании результатов тестирования с использованием аппаратно-программного комплекса «НС-ПсихоТест». В исследование вошли показатели функционального состояния ЦНС, такие, как уровень функциональной системы (УФС), устойчивость реакции (УР), уровень функциональных возможностей (УФВ) и средний времени реакции (СВР). Обсуждаются закономерности психического состояния спортсменов и влияние выявленных факторов на подготовку спортсменов в свете современных тенденций развития физической культуры и спорта.

Ключевые слова: юниоры; психодиагностика; функциональное состояние; спортивная тренировка; зрительно-моторная реакция; психология спорта.

Введение. Современный спорт высоких достижений требует всесторонней оценки состояния спортсменов, особенно в юниорской категории, которая находится в фазе активного психофизиологического развития. Актуальность исследования определяется необходимостью раннего выявления признаков функционального напряжения и истощения центральной нервной системы, возникающих в ответ на длительные и интенсивные физические нагрузки [1]. Анализ научной литературы свидетельствует о высокой зависимости соревновательной результативности от психофизиологических ресурсов спортсмена. Особое внимание уделяется изучению функционального состояния ЦНС, включая скорость зрительно-моторных реакций, утомляемость, эмоциональную устойчивость и показатели тревожности [2]. Иностранные исследователи подчеркивают, что у триатлетов-подростков снижение когнитивной производительности на фоне физического утомления может критически влиять на технику плавания и бега [3]. Современные исследования демонстрируют, что эффективное управление тренировочной нагрузкой у юниоров должно учитывать индивидуальные психофизиологические реакции – например, с использованием GPS-трекинга, показателей частоты сердечных сокращений и психофизиологических проб – что позволяет адаптировать процесс восстановления и избежать перегрузок [4]. В отечественной спортивной практике такие методы внедряются пока лишь фрагментарно. Противоречия между необходимостью индивидуализации тренировочного процесса и использованием шаблонных методик обуславливают актуальность данного исследования. Кроме того, возраст 16–18 лет представляет собой критический период с точки зрения пластичности нервной системы и адаптационных возможностей организма. Целью данного исследования является выявление взаимосвязей между функциональными показателями центральной нервной системы и уровнем тревожности юниоров, занимающихся триатлоном, с целью персонализации тренировочного процесса.

Материалы и методы исследования.

Испытуемые. Исследование проводилось с участием 12 спортсменов-юниоров (возраст 16–18 лет), специализирующихся в триатлоне и тренирующихся не менее 5 раз в неделю [5]. Критерии включения: отсутствие хронических заболеваний, травм на момент тестирования и письменное информированное согласие участников и их

законных представителей. Этическое одобрение исследования получено локальным комитетом Московского городского педагогического университета (протокол № 01/2025).

Методика исследования. Психофизиологическое тестирование выполнено с использованием аппаратно-программного комплекса «НС-ПсихоТест» (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия), сертифицированного для применения в спортивной медицине. Основной методикой выступила оценка простой зрительно-моторной реакции (ПЗМР), включающая следующие параметры: среднее время реакции (мс), функциональный уровень системы (ФУС), устойчивость реакции (УР) и уровень функциональных возможностей (УФВ).

Дополнительные методики. Процедура тестирования соответствовала современным методикам регистрации сенсомоторных реакций, предполагающим многократные повторности для повышения точности измерений [6]. Дополнительно применена модифицированная шкала тревожности STAI, адаптированная для подростков, для оценки ситуативного и личностного уровня тревожности [7].

Статистическая обработка данных выполнена в программе IBM SPSS Statistics 26.0. Уровень значимости принят при $p < 0.05$.

Результаты исследования. Анализ психофизиологических параметров спортсменов позволил выявить закономерности, характеризующие уровень функциональных возможностей и адаптационные ресурсы организма, данные исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели психофизиологического состояния

Спортсмен	ФУС	УР	Время реакции	Баланс ВТ	Ситуативная тревожность	Личностная тревожность
№ 1	4.3	1.9	220	48.0	28	29
№ 2	4.5	2.3	193	-64.0	28	31
№ 3	4.4	1.7	211	4.8	28	25
№ 4	4.4	2.3	205	-33.0	36	37
№ 5	4.7	2.15	195	-11.0	27	23
№ 6	4.3	1.5	224	26.0	25	33
№ 7	4.6	2.0	201	-6.0	39	34
№ 8	4.9	2.2	200	50.0	28	31
№ 9	4.8	2.54	202	51.4	32	42
№ 10	5.14	2.66	194	1.0	26	27
№ 11	5.17	2.6	206	40.0	22	25
№ 12	4.34	1.76	225	-67.0	38	40

Функциональный уровень системы и устойчивость реакции.

Значения Функционального уровня системы (ФУС) варьировали от 4.3 до 5.17 баллов. У большинства спортсменов ФУС соответствовал среднему и выше среднего уровню активности ЦНС. Высшие значения (5.14–5.17) были зафиксированы у спортсменов с наименьшим временем реакции и относительно сбалансированными вегетативными показателями (баланс ВТ в пределах $\pm 10\%$).

Устойчивость реакции (УР) находилась в диапазоне от 1.5 до 2.66 балла, что указывает на варьирующую способность к сохранению точности реакции в условиях повторяющейся стимуляции. Наиболее стабильную УР продемонстрировали спортсмены с высокими значениями ФУС и низкой тревожностью.

Среднее значение времени реакции и баланс нервных процессов.

Среднее значение времени реакции спортсменов находилось в диапазоне от 193 до 220 мс. При этом большинство спортсменов характеризовались промежуточным типом нервных процессов, что отражает баланс процессов возбуждения и торможения. Однако в отдельных случаях отмечались выраженные сдвиги в сторону преобладания возбуждения или торможения.

Баланс возбуждения и торможения.

Значения колебались от -67.0 до $+51.4$, что отражает выраженные межиндивидуальные различия в соотношении процессов возбуждения и торможения. Положительные значения (до $+50.0$) могут указывать на дисбаланс в сторону торможения, что требует учёта при планировании нагрузок. Отрицательные значения (-64.0 ; -67.0) соответствуют активному, возбудимому типу, что также требует коррекции тренировочных и восстановительных мероприятий.

Шкала тревожности STAI.

Ситуативная тревожность (STAI-S) у большинства участников находилась в пределах нормы (22–36 баллов). Исключение составили два спортсмена, продемонстрировавшие повышенные значения (38–39), что может свидетельствовать о склонности к временным эмоциональным напряжениям в соревновательных ситуациях.

Личностная тревожность (STAI-T) варьировала от 23 до 42 баллов. У двух испытуемых (№9 и №12) был зафиксирован высокий уровень (40+), что указывает на устойчивую тенденцию к тревожному реагированию. Это может отрицательно влиять на концентрацию и психомоторные функции в условиях стресса.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о гетерогенности функционального состояния спортсменов и позволяют определить направления дальнейшей индивидуализации тренировочного процесса с учетом психофизиологических особенностей.

Обсуждение. Результаты исследования выявили, что 50% юных триатлетов демонстрируют подвижный тип нервной системы (ПЗМР <200 мс), что согласуется с данными метаанализа о связи целенаправленной практики с успешностью в дисциплинах, требующих быстрой сенсомоторной адаптации [8]. Это подтверждает важность развития сенсомоторной реакции как одного из базовых компонентов общей подготовленности спортсмена.

Однако у 25% испытуемых обнаружен низкий функциональный уровень системы (ФУС), что согласуется с выводами Kellmann (2018) о рисках хронического утомления у юниоров, занимающихся видами спорта на выносливость [9]. Низкие значения ФУС могут свидетельствовать о нарастающем неврологическом утомлении и несоответствии между объёмом тренировочной нагрузки и текущим уровнем адаптационных ресурсов.

Особого внимания заслуживает высокая личностная тревожность, зафиксированная у 17% испытуемых. Согласно Weinberg (2018), такой уровень тревожности способен снижать способность к концентрации внимания и ухудшать реализацию соревновательного потенциала, особенно на финальных этапах дистанции, где требуется предельная мобилизация психических ресурсов [10]. Учитывая, что тревожность носит устойчивый личностный характер, её следует рассматривать как ключевой фактор при индивидуализации психоподдержки.

Интеграция биологической обратной связи (БОС), как показано в современных исследованиях по вариабельности сердечного ритма (HRV biofeedback), может способствовать улучшению регуляции вегетативных функций у спортсменов с инертным типом реакции [11]. Технологии БОС позволяют формировать устойчивую саморегуляцию дыхания, сердечного ритма и психоэмоционального фона, что особенно важно для юниоров с низкой стрессоустойчивостью.

Использование VR-тренировок, как показано в исследовании Williams (2023), способно моделировать стрессовые сценарии соревнований, создавая виртуальные симуляции стартов, контрольных точек и финишных участков, что способствует формированию адаптивного поведения в условиях неопределённости [12]. Эти методы эффективны не только для когнитивной адаптации, но и для развития устойчивости к внешним раздражителям.

Подобные подходы отражают современные тренды спортивной науки, ориентированные на персонализацию тренировочного процесса и психофизиологическую коррекцию. В частности, модель Йеркса–Додсона, подтверждённая в ряде эмпирических работ, утверждает, что существует оптимальный уровень активации, при котором достигается максимальная производительность, а как гипо-, так и гиперактивация ухудшают результаты [13].

Ранее опубликованная работа авторов показывает, что биохимические маркеры стресса тесно коррелируют с показателями вегетативной регуляции, что может быть использовано для более глубокой интерпретации психофизиологического статуса юных спортсменов [14]. Данный подход открывает перспективы интеграции нейрофизиологических и биохимических данных в рамках комплексного мониторинга состояния спортсмена, что особенно актуально в подростковом возрасте.

Таким образом, совокупный анализ полученных результатов и их сопоставление с современными исследованиями подтверждают необходимость перехода от универсальных тренировочных схем к персонализированным протоколам с учётом психофизиологического профиля юного спортсмена.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило, что психофизиологический мониторинг является ключевым инструментом для оптимизации подготовки юных триатлетов. У 30% спортсменов выявлены признаки функционального напряжения ЦНС, требующие коррекции тренировочных нагрузок и внедрения нейрореабилитационных методик. Индивидуализация программ на основе типа нервной системы и уровня тревожности способна минимизировать риски переутомления и улучшить соревновательные результаты. Перспективным направлением является интеграция технологий биологической обратной связи и VR-тренировок, что соответствует глобальным тенденциям спортивной науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некрасов А.В. Психофизиология спорта. – Москва: Спорт, 2017. – 256 с.
2. Schmidt R.A. Motor Learning and Performance. – Champaign, IL: Human Kinetics, 2020. – 320 p.
3. Smith J., Jones R., Brown T. Cognitive fatigue in adolescent triathletes // Journal of Sports Sciences. – 2021. – Vol. 39, No. 12. – P. 1345–1355. – DOI: 10.1080/02640414.2021.1926354.
4. Teixeira J.E., Afonso P., Schneider A. et al. Player tracking data and psychophysiological features associated with mental fatigue in U15, U17, and U19 male football players: a machine learning approach // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 7. – Art. 3718. – DOI: 10.3390/app15073718.
5. Пушкин Д.С., Тодороски К. Современные тенденции в подготовке триатлетов: зарубежная и Российская практика // Ценности, традиции и новации современного спорта: материалы III Международного научного конгресса: в 3 ч. – Минск: Белорусский государственный университет физической культуры, 2024. – С. 66–68.
6. Сарайкин Д.А., Бачериков Е.Л., Павлова В.И. и др. Комплексная методика оценки психофизиологического и функционального состояния спортсменов // Человек. Спорт. Медицина. – 2021. – № S1. – С. 12–20. – DOI: 10.14529/hsm21s102.
7. Garrido S.J., Azpilicueta A.E., Morán V.E., Cupani M. Psychometric properties of the State-Trait Anxiety Inventory-Trait (STAI-T) in Argentinian adolescents // Psychological Thought. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 148–167. – DOI: 10.37708/psyc.v15i2.725.

8. Macnamara B.N., Moreau D., Hambrick D.Z. The relationship between deliberate practice and performance in sports: a meta-analysis // Perspectives on Psychological Science. – 2016. – Vol. 11, No 3. – P. 333–350. – DOI: 10.1177/1745691616635591.
9. Kellmann M. Preventing overtraining in athletes // International Journal of Sports Physiology. – 2018. – Vol. 13, No. 6. – P. 704–714. – DOI: 10.1123/ijsp.13.6.704.
10. Weinberg R.S. Foundations of Sport and Exercise Psychology. – Champaign, IL: Human Kinetics, 2018. – 480 p.
11. Shaffer F., Meehan Z.M. A practical guide to resonance frequency assessment for heart rate variability biofeedback // Frontiers in Neuroscience. – 2020. – Vol. 14. – Art. 570400. – DOI: 10.3389/fnins.2020.570400.
12. Williams A.M. Virtual Reality in Sport Training // Frontiers in Psychology. – 2023. – Vol. 14. – P. 101–115. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.101115.
13. Teigen K.H. Yerkes–Dodson: A Law for All Seasons // Theory & Psychology. – 1994. – Vol. 4, No. 4. – P. 525–547. – DOI: 10.1177/0959354394044004.
14. Todoroski K. Interrelation of biochemical stress markers and physiological indicators of autonomic regulation // Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences. – 2025. – No 2. – P. 145–162. – DOI: 10.5281/zenodo.15584789. – EDN: XYIMUT.

Поступила в редакцию 29.07.2025 г.

PSYCHOPHYSIOLOGICAL ASPECTS OF JUNIOR TRAINING IN MODERN SPORTS

K. Todoroski, D. S. Pushkin

The article examines the analysis of psychophysiological parameters in junior athletes (aged 16–18) based on testing results obtained using the *NS-PsychoTest* hardware-software complex. The study includes indicators of the central nervous system's functional state, such as the level of the functional system (LFS), reaction stability (RS), level of functional capabilities (LFC), and average reaction time (ART). The patterns of athletes' mental states and the influence of identified factors on sports training are discussed in the context of modern trends in the development of physical culture and sports.

Keywords: juniors; psychodiagnostics; functional state; sports training; visual-motor reaction; sports psychology.

Тодороски Кирил

кандидат биологических наук,
доцент департамента физической культуры,
спорта и медиакоммуникаций
ГАОУ ВО «Московский городской
педагогический университет», г. Москва, РФ.
E-mail: todoroski@mgpu.ru
ORCID: 0000-0003-4908-4316
AuthorID: 1129667

Todoroski Kiril

candidate of biological sciences, Associate Professor
of the Department of Physical Education, Sports and
Media Communications,
Moscow City Pedagogical University,
Moscow, Russian Federation.
E-mail: todoroski@mgpu.ru
ORCID: 0000-0003-4908-4316
AuthorID: 1129667

Пушкин Дмитрий Сергеевич

магистрант Института естествознания
и спортивных технологий,
ГАОУ ВО «Московский городской
педагогический университет», г. Москва, РФ.
E-mail: pushkinds639@mgpu.ru
ORCID: 0009-0009-1727-2700
AuthorID: 1268905

Pushkin Dmitry Sergeevich

master's student at the Institute of Natural Sciences
and Sports Technologies,
Moscow City Pedagogical University,
Moscow, Russian Federation.
E-mail: pushkinds639@mgpu.ru
ORCID: 0009-0009-1727-2700
AuthorID: 1268905

ВЛИЯНИЕ КУЛЬТУРАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ ГРИБА *T. HIRSUTA* TH-11 НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОРОСТКОВ *BRASSICA JUNCEA* L. В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ИОНАМИ КАДМИЯ

© 2025. О. В. Фрунзе

Исследовали влияние прикорневой подкормки органическим удобрением, полученным в результате биоконверсии лигноуглеводного компонента пшеничной соломы, на морфометрические показатели роста проростков *Brassica juncea* L., произрастающих в почве, загрязненной ионами кадмия. Проведена оценка ростстимулирующего и протекторного влияния внесения в почву культуральной жидкости гриба *Trametes hirsuta* Th-11 в качестве органического удобрения на длину корня и стебля, а также на накопление сухой биомассы проростков *Brassica juncea* L. Был определен защитный эффект культуральной жидкости *Trametes hirsuta hirsuta* Th-11 на ростовые показатели растений в условиях загрязнения почвы ионами кадмия. Установлено, что возможность использования биоудобрений, которые получены с помощью биоконверсии растительных отходов, повышает продуктивность и плодородие почв техногенных территорий, загрязненных ионами кадмия.

Ключевые слова: *Trametes hirsuta* Th-11, морфометрические показатели; биоконверсия; культуральная жидкость.

Введение. Загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) стало глобальной проблемой XXI века, затрагивающей практически все компоненты биосферы – почву, воду, атмосферу, а через них и биоту, включая растения, животных и человека. Тяжёлые металлы, в отличие от органических загрязнителей, не подвержены биологическому разложению и могут сохраняться в экосистемах в течение десятилетий, накапливаясь и распространяясь по трофическим цепям. Их воздействие на растительные организмы представляет собой особый интерес, так как именно растения выступают первыми индикаторами загрязнения [1].

Основными антропогенными источниками поступления кадмия и других ТМ в окружающую среду являются: выбросы металлургических заводов и шахт по добыче рудных минералов; сточные воды предприятий гальваники, кожевенной и текстильной промышленности; использование пестицидов, удобрений, осадков сточных вод в сельском хозяйстве; сжигание углеводородного топлива, в том числе в автомобильном транспорте; неправильное управление промышленными и бытовыми отходами [2, 3].

Кадмий является для растений одним из наиболее токсичных тяжелых металлов. Возрастание его содержания в почве, связанное с хозяйственной деятельностью человека, сопровождается значительным увеличением количества токсичных ионов в растениях, что оказывает отрицательное воздействие на многие стороны их жизнедеятельности. Не случайно исследованию влияния кадмия на растения посвящено довольно большое число работ [4].

Токсичность кадмия для растений проявляется в нарушении активности ферментов, торможении фотосинтеза, нарушении транспирации, а также ингибировании восстановления NO₂ до NO. Кроме того, в метаболизме растений он является антагонистом ряда элементов питания (Zn, Cu, Mn, Ni, Se, Ca, Mg, P). При токсичном воздействии металла у растений наблюдаются задержка роста, повреждение корневой системы и хлороз листьев. Ионы кадмия беспрепятственно поступают из почвы и атмосферы в растения. По фитотоксичности и способности накапливаться в растениях в ряду ТМ он занимает первое место (Cd>Cu>Zn>Pb) [4].

Одним из методов повышения продуктивности и биологической активности деградированных почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, является применение биоудобрений, полученных в результате твердофазного культивирования некоторых штаммов ксилотрофных базидиомицетов [5, 6]. Внедрение «зеленой» технологии минимизирует воздействие на почву антропогенных факторов и повышает качество пищевой продукции. Выделение экономически выходных и экологически безопасных стимуляторов роста для растений является приоритетной задачей, решением которой занимаются ученые всего мира [7]. Известно, что регуляторы роста растений, которые получены при культивировании базидиомицетов, в значительной степени повышают устойчивость растений к различным патогенам, они способны нарушать жизнедеятельность вредных микроорганизмов [8–10]. Биологически активные вещества базидиомицетов могут включать в свой состав ферменты, гормоны, аминокислоты, липиды, олигосахариды, органические кислоты и другие вещества, которые оказывают стимулирующий эффект на рост и развитие растений, повышают их иммунитет и устойчивость к токсичному влиянию ионов тяжелых металлов [11, 12].

Цель работы – оценка протекторного влияния внесения в почву культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 в качестве органического удобрения на морфометрические показатели проростков некоторых видов сельскохозяйственных технических культур в условиях загрязнения почвы ионами кадмия.

Материал и методика исследования. В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы проростки *Brassica juncea* L. В работе использовали штамм *T. hirsuta* Th-11, который был выделен в чистую культуру из плодовых тел, собранных в 2011 г. на пне лиственного дерева (вероятно, рода *Populus*) на территории г. Донецка и депонирован в Коллекции культур шляпочных грибов (IBK) под номером 2429. Штамм культивировали на жидкой среде Чапека следующего состава (г/л): NaNO_3 – 2, K_2HPO_4 – 1, $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5, KCl – 0,5, $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,01 [13]. Кислотность питательной среды доводили до значений pH 4,8 с помощью 10 %-го раствора HCl . Питательную среду разливали по 50 мл в колбы Эрленмейера объемом 100 мл, вносили 1,5 г воздушно-сухой пшеничной соломы, предварительно измельченной до конечного размера частиц 0,5–0,7 см, и стерилизовали в автоклаве при 0,8 атм в течение 40 минут. Штаммы *T. hirsuta* Th-11 культивировали в течение 30 суток при температуре 32 °С в статических условиях. По окончании культивирования гриба отделяли культуральную жидкость от субстратно-мицелиальной смеси путем фильтрования [14].

Для изучения влияния прикорневой подкормки исследованного органического удобрения на морфометрические показатели роста сельскохозяйственных технических растений использовали метод почвенных культур. Семена рапса проращивали, учитывая их биологические особенности. Растения выращивали на протяжении 30 дней при следующих условиях: продолжительность светового – дня 14 часов, температура выращивания – 20–22 °С, влажность почвы – 70 % от полной влагоёмкости. В каждый сосуд вносили по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм.

Исследования проводили по схеме полного двухфакторного трехуровневого эксперимента (табл. 1).

В качестве загрязнителя использовали нитрат кадмия по стехиометрическому отношению. Концентрации кадмия составляли 0, 1 ПДК, 2 ПДК.

Таблица 1

Схема эксперимента

Вариант	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$, мг/кг (в перерасчете на Cd^{2+})	Ростактивирующие вещества, %
1	0 (контроль)	0 (контроль)
2	0,5 (1 ПДК)	–
3	1 (2 ПДК)	–
4	0,5 (1 ПДК)	15 % КЖ (культуральная жидкость)
5	1 (2 ПДК)	15 % КЖ (культуральная жидкость)
6	0,5 (1 ПДК)	15 % ГН (гумат натрия)
7	1 (2 ПДК)	15 % ГН (гумат натрия)

На 5-е сут. выращивания растений (при появлении 1-го листа) проводили прикорневое внесение культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 и гумата натрия (номер государственной регистрации 247-18-669-1 изготовитель ООО «Биофит») в концентрации 15 %. В качестве контрольных показателей использовали растения, произрастающие в почве без добавления ионов кадмия и ростактивирующих веществ. На 30-е сутки роста у проростков проводили измерения длины корней и стеблей, а также определяли их сухую массу гравиметрическим методом. Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специальных компьютерных программ по методу Даннета.

Анализ результатов. Исследования показали, что при внесении в почву 1 ПДК ионов кадмия длина корня проростков *Brassica juncea* L. уменьшилась на 20 %, при увеличении концентрации ионов кадмия до 2 ПДК, длина корня проростков уменьшилась практически в три раза (вариант 2, 3). Это объяснимо, что кадмий обладает высокой токсичностью по отношению к растительным организмам, а физиологическая роль данного металла для растений еще не изучена. В условиях внесения в почву 15 %-го раствора гумата натрия загрязнение почвы 1 ПДК и 2 ПДК кадмия практически не оказывало ингибирующего влияния на рост корней, данный показатель был ниже контрольного на 4-5%, однако эти изменения были статистически недостоверными (таблица 2). При прикорневой подкормке проростков 15 %-ным раствором культуральной жидкости, в условиях загрязнения почвы 1 ПДК кадмия была отмечена активация роста корней проростков на 9 %, однако, при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК для корня уменьшилась до уровня контроля. Таким образом, прикорневое внесение 15 %-го раствора культуральной жидкости оказывает благоприятное действие на рост корней проростков, что лежит в основе реализации их защитного эффекта в отношении стрессовых факторов, к числу которых относится токсическое воздействие ионов тяжелых металлов.

Таблица 2

Влияние внесения в почву ростстимулирующих веществ на морфометрические показатели проростков (*Brassica juncea* L.)

№ варианта	Длина проростка, см					
	Корень			Стебель		
	$M \pm m$	D	D [%]	$M \pm m$	D	D [%]
1	4,58±0,82	–	–	5,00±0,82	–	–
2	3,67±0,08	-0,91	80	2,45±0,05	-4,55	49
3	1,50±0,46	-3,08	33	4,25±0,63	-2,75	85
4	4,33±0,33	-0,25	95	5,63±0,7	0,63	113
5	4,38±0,80	-0,21	96	5,95±1,13	0,95	119
6	5,00±0,35	0,42	109	5,38±0,43	0,38	108
7	4,25±0,32	-0,33	97	4,00±1,05	-1,00	80

Примечание: D – разница между средними; D[%] – процентное соотношение

При внесении в почву 1 ПДК кадмия длина стебля проростков уменьшилась практически в два раза (вариант 2). При увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК длина стебля проростков уменьшилась на 25 % в сравнении с растениями, произрастающими в незагрязненной почве. Визуально токсичное влияние ионов кадмия на растения выражалось в торможении развития проростков и некрозах (рис. 1).



Рис. 1. Проростки *Brassica juncea* L. В условиях внесения в почву ионов кадмия и ростстимулирующих веществ

При внесении в почву 15 %-го раствора гумата натрия в условиях загрязнения почвы 1 ПДК кадмия (вариант 6) длина стебля проростков увеличилась на 8 %, в сравнении с контролем, а при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК мы наблюдали достоверное снижение роста надземной части на 20 %, что подтверждает высокую токсичность кадмия. В условиях прикорневой подкормки проростков 15 %-ным раствором культуральной жидкости при загрязнении почвы 1 ПДК кадмия длина стебля проростков увеличилась на 13 % в сравнении с контролем, а при увеличении концентрации ионов кадмия до 2 ПДК длина стебля проростков увеличилась на 19 %. Визуально так же была отмечена активация роста надземной части растений, даже при высоких концентрациях поллютанта, повреждений листовых пластинок, хлорозов отмечено не было (см. рис. 1).

Одним из показателей биологической эффективности ростстимулирующих веществ является их влияние на накопление биомассы проростками (рис. 2).

Исследования показали, что при загрязнении почвы 1 ПДК кадмия биомасса проростков *Brassica juncea* L. уменьшилась на 21 %, а при увеличении концентрации кадмия до 2 ПДК накопление сухой массы проростками уменьшилось практически в 4 раза. При прикорневом внесении в почву 15 %-го раствора гумата натрия в условиях загрязнения 1 ПДК кадмия биомасса проростков снизилась на 6,5 % в сравнении с контролем. При увеличении концентрации поллютанта до 2 ПДК показатель биомассы проростков уменьшился на 7,8 % в сравнении с контролем, но данные изменения не были статистически достоверными. При внесении в почву 15 %-го раствора культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 в условиях загрязнения 1 ПДК кадмия биомасса проростков была меньше контрольного показателя на 5,3 %, при увеличении концентрации ионов кадмия до 2 ПДК биомасса проростков снизилась на 6,3 %, в сравнении с растениями, произрастающими на незагрязненной почве без внесения ростстимулирующих веществ.

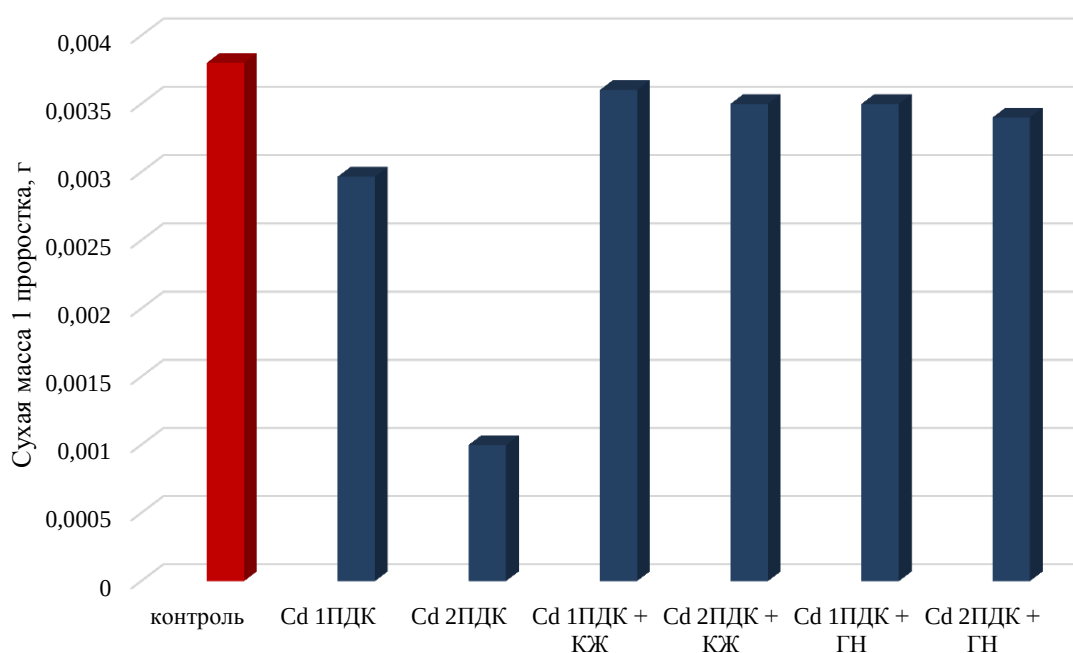


Рис. 2. Влияние внесения в почву ростстимулирующих веществ на биомассу проростков *Brassica juncea* L.

Выводы. Таким образом, внесение в почву 15 %-го раствора культуральной жидкости гриба *Trametes hirsuta* Th-11 стимулирует ростовые показатели длины корня и стебля проростков *Brassica juncea* L., подобная тенденция прослеживается и в накоплении биомассы проростками. Положительный эффект культуральной жидкости *T. hirsuta* Th-11 на ростовые показатели растений статистически сравним с ростостимулирующим влиянием гумата натрия сходной концентрации, что нам позволяет рекомендовать использование культуральной жидкости гриба *T. hirsuta* Th-11 для повышения устойчивости растений, произрастающих в почвах техногенных территорий, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Биологические способы переработки растительных отходов агропромышленного комплекса» (№ госрегистрации 124012400346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасова, А. С. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса / А. С. Алемасова, А. И. Сафонов, А. С. Сергеева // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Материалы международной научной конференции, Киров, 16-18 апреля 2019 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 60-65.
2. Сафонов А.И. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса / А.И. Сафонов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 96–100.
3. Фрунзе О.В. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений / О.В. Фрунзе // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26. – № 6. – С. 92–98. – DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98.
4. Фрунзе О.В. Сорбционная способность некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами кобальта и кадмия / О.В. Фрунзе, О.С. Горещкий // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 58-64.

5. Ферментативная активность ксилотрофных базидиомицетов при твердофазном культивировании / Д. Ю. Ильин, Г. В. Ильина, Ю. С. Лыков, М. И. Морозова // *Агрономия: Нива Поволжья*. – № 2 (23). – 2012. – С. 27-31
6. Концепция обращения с отходами производства и потребления в Донецкой Народной Республике. – Донецк, 2021. – 149 с.
7. Тенденции в развитии о способах утилизации коры и прутково-древесных отходов длительного хранения (обзорная статья) / В.В. Володин, А.А. Шубаков, С.О. Володина и др. // *Аграрная наука Европы-Северо-Востока*. – 2022. – №23(5). – С. 611-632. – DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632.
8. Линник П.Н. Методические особенности исследования гумусовых веществ в природных поверхностных водах / П.Н. Линник, Я.С. Иванченко, Р.П. Линник, В.А. Жежеря // *Химия и технология воды* – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 533-550.
9. Wendiro D. Identifying indigenous practices for cultivation of wild saprophytic mushrooms: responding to the need for sustainable utilization of natural resources / D. Wendiro, A.P. Wacoo, G. Wise // *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. – 2019. – P. 15-64. – DOI: DOI: 10.1186/s13002-019-0342-z.
10. Сафонов М.А. Комплексы дереворазрушающих базидиомицетов пойменных лесов Южного Предуралья (Оренбургская область) / М.А. Сафонов // *Успехи современного естествознания*. – 2015. – № (8). – С. 62-65.
11. Мухин В.А. Биота ксилотрофных базидиомицетов Западно-Сибирской равнины. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 232 с.
12. Микозы древесины, его продукты и их использование. Экологические аспекты микологического разрушения древесины. / Г.Н. Кононов, А.Н. Вережкин, Ю.В. Сердюкова, В.Д. Зайцев // *Лесной вестник*. – 2020. – №24(2). – С. 81-87. – DOI: DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-81-87.
13. Билай В.И. Методы экспериментальной микологии. – К.: Наук. думка, 1973. – 243 с.
14. Богородская А.В. Использование продуктов биоконверсии отходов деревообработки в качестве биоудобрений для ремедиации деградированных почв / А.В. Богородская, О.В. Киселева // *Агрохимия*. – 2021. – №2. – С. 86-93. – DOI: 10.31857/S0002188121020046.

Поступила в редакцию 10.09.2025 г.

THE EFFECT OF THE CULTURE FLUID OF THE *T. HIRSUTA* TH-11 FUNGUS ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF *BRASSICA JUNCEA* L. SEEDLINGS IN CONDITIONS OF SOIL CONTAMINATION WITH CADMIUM IONS

O. V. Frunze

The effect of basal top dressing with an organic fertilizer obtained as a result of the bioconversion of the lignocarbon component of wheat straw on the morphometric growth parameters of *Brassica juncea* L. seedlings growing in soil contaminated with cadmium ions was studied. The growth-stimulating and protective effect of applying the culture fluid of *T. hirsuta* Th-11 fungus to the soil as an organic fertilizer on the length of the root and stem, as well as on the accumulation of dry biomass of *Brassica juncea* L. seedlings, was evaluated. The protective effect of culture fluid of *T. hirsuta* Th-11 fungus was determined on plant growth in conditions of soil contamination with cadmium ions. It was found that the possibility of using biofertilizers obtained by bioconversion of plant waste increases the productivity and fertility of soils in man-made territories contaminated with cadmium ions.

Keywords: *Trametes hirsuta* Th-11; morphometric parameters; bioconversion; culture fluid

Фрунзе Оксана Валентиновна

Кандидат технических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: hromyh82@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1082-7012
AuthorID: 1053340

Frunze Oksana V.

Candidate of Technical Sciences, Docent;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия А: Естественные науки**

2025. – № 4

Технический редактор: *М.В. Фоменко*

Свидетельство о регистрации СМИ ДНР Серия ААА № 000077 от 21.11.2016 г.

Адрес редакции:
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк, ДНР, РФ.
Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92.
E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru
URL: <http://donnu.ru/vestnikA>
