

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

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

2/2025

**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 физ.-мат. наук, проф. **Г.В. Горр**; 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, проф. **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 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. Тюрин**; д-р биол. наук, доц. **М.Г. Холявка**; д-р хим. наук, доц. **И.Н. Щербаков**.

**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 phys. and math., prof. **G.V. Gorr**; 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., prof. **V.P. Zastavnyi**; 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 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**) 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 о 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 № 7 от 30.05.2025 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2025

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А. Естественные науки

№ 2

Донецк 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Механика

- Бондаренко Н. С.* Фундаментальное решение задачи статики для случая изгиба ортотропной пластины при действии сосредоточенной силы на базе обобщённой теории 5
- Пачева М. Н., Сторожев В. И., Сторожев С. В., Фоменко М. В.* Сдвиговые волны в упругом слое с дугообразными вставками вдоль волноводного тракта: алгоритм теоретического анализа 13
- Сторожев В. И., Сторожев С. В., Фоменко М. В.* Однородные решения для однофакторной модели пространственного динамического термоупругого деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит 21

Химические науки

- Белая Н. И., Белый А. В., Конайленко В. А.* Влияние комплексообразования на антирадикальное действие бинарных композиций кверцетина с олигосахаридами 28
- Белый А. В., Михайлова Н. В., Белая Н. И., Конайленко В. А.* Кинетика взаимодействия гидроксикоричных кислот с липо- и гидрофильными пероксирадикалами 36
- Кострюков С. Г., Алмазова А. В., Мишкин Д. В.* In silico дизайн новых АТФ-конкурентных ингибиторов янус-киназы JAK2 47

Биологические науки

- Аникина Е. А., Чуфицкий С. В., Романчук С. М., Горбунов Р. И., Сергеева Е. С.* Мониторинг южной части русла реки Кальмиус с применением метода биотестирования.... 57
- Антропова Л. П., Чуфицкий С. В.* Сравнительный анализ флуоресценции хлорофилла у древесных растений как метод биоиндикации городской среды 64
- Золотавина М. Л., Вековищева О. Ю., Гайдабура Е. А., Ковалёва Т. А., Братова А. В., Чернявская О. В.* Новые маркеры анемического синдрома у лиц, перенесших COVID-19 76
- Калинина А. В.* Изменчивость морфометрических признаков *Tragopogon major* Jacq. как индикатор состояния антропогенно трансформированной среды Донбасса 89
- Кулешова О. Н., Васильева А. В.* Свободнорадикальный статус маток пренатально стрессированных самок крыс на разных стадиях эстрального цикла 96
- Мирненко Э. И.* Структурная динамика и прогноз трансформации фитопланктонных сообществ в антропогенно нагруженных водоемах Донбасса 104

<i>Перова Н. А., Калаев В. Н.</i> Влияние защищенных белковых добавок на переваримость питательных веществ кормов рациона и воспроизводительную функцию коров	111
<i>Прокопенко Е. В.</i> Ложноскорпионы (Arachnida, Pseudoscorpiones) Центрального Донбасса...	118
<i>Уранова В. В., Ломтева Н. А.</i> Изучение влияния экстракта <i>Scutellaria baicalensis</i> на уровень потребления сахарозы в условиях «социального» стресса	126
<i>Чолутаева Э. Э., Саркисян Д. С., Ковальчук Д. Ю., Шевченко В. Н., Ольшевская А. В.</i> Опыт проведения нереста у австралийского красноклешневого рака <i>Cherax quadricarinatus</i> (Von Martens, 1868) в искусственных условиях	134
<i>Todoroski K.</i> Interrelation of biochemical stress markers and physiological indicators of autonomic regulation	145

CONTENTS

Mechanics

- Bondarenko N. S.* A fundamental solution to the problem of statics for bending an orthotropic plate under the action of a concentrated force based on a generalized theory 5
- Pacheva M. N., Storozhev V. I., Storozhev S. V., Fomenko M. V.* Shear waves in an elastic layer with arced inserts along a waveguide: algorithm of theoretical analysis 13
- Storozhev V. I., Storozhev S. V., Fomenko M. V.* Homogeneous solutions for a one-factor model of volume dynamic thermoelastic deformation of functional-gradient transversal-isotropic plates 21

Chemical sciences

- Belaya N. I., Belyi A. V., Konailenko V. A.* Influence of complexation on the antiradical action of binary compositions of quercetin with oligosaccharides 28
- Belyi A. V., Mikhaylova N. V., Belaya N. I., Konailenko V. A.* The kinetics of reaction of hydroxycinnamic acids with lipo- and hydrophilic peroxy radicals 36
- Kostyukov S. G., Almazova A. V., Mishkin D. V.* In silico design of new ATP-competitive JAK2 janus kinase inhibitors 47

Biological sciences

- Anikina E. A., Chufitskiy S. V., Romanchuk S. M., Gorbunov R. I., Sergeeva E. S.* Monitoring of the southern part of the Kalmius riverbed using the biotesting method 57
- Antropova L. P., Chufitsky S. V.* Comparative analysis of chlorophyll fluorescence in woody plants as a method of bioindication of the urban environment 64
- Zolotavina M. L., Vekovishcheva O. Yu., Gaidabura E. A., Kovaleva T. A., Bratova A. V., Chernyavskaya O. V.* The new markers of anemia syndrome in people who have had COVID-19 76
- Kalinina A. V.* Variability of morphometric traits of *Tragopogon major* Jacq. as an indicator of the state of the anthropogenically transformed environment of Donbass 89
- Kuleshova O. N., Vasilieva A. A.* Uterine redox status of prenatally stressed female rats at different stages of the estrous cycle 96
- Mirnenko E. I.* Structural dynamics and forecast of phytoplankton communities transformation in anthropogenically stressed water bodies of Donbass 104

<i>Perova N. A., Kalaev V. N.</i> Effects of rumen-protected protein supplementation on nutrient digestibility and reproductive function of cows	111
<i>Prokopenko E. V.</i> Pseudoscorpions (Arachnida, Pseudoscorpiones) of Central Donbas	118
<i>Uranova V. V., Lomteva N. A.</i> Study of the effect of <i>Scutellaria baicalensis</i> extract on the level of sucrose consumption under conditions of “social” stress	126
<i>Cholutaeva E. E., Sarkisyan D. S., Kovalchuk D. Yu., Shevchenko V. N., Olshevskaya A. V.</i> Experience in inducing spawning of the australian red claw crayfish <i>Cherax quadricarinatus</i> (Von Martens, 1868) under controlled conditions	134
<i>Тодороски К.</i> Взаимосвязь биохимических маркеров стресса и физиологических показателей автономной регуляции	145

М Е Х А Н И К А

УДК 539.3

DOI: 10.5281/zenodo.15575772

EDN: AYZZRL

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТАТИКИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ИЗГИБА ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛЫ НА БАЗЕ ОБОБЩЁННОЙ ТЕОРИИ

© 2025. *Н. С. Бондаренко*

Рассмотрено напряжённо-деформированное состояние ортотропной пластины, подверженной действию сосредоточенной силы, приложенной в начале координат. Построено фундаментальное решение задачи статики для случая изгиба пластины на базе обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации. При решении задачи предполагалось отсутствие «гипотетического» модуля сдвига. Исследована зависимость обобщённых перемещений от упругих постоянных ортотропного материала пластины.

Ключевые слова: ортотропная пластина; сосредоточенная сила; $\{1,0\}$ -аппроксимация; полиномы Лежандра; обобщённые перемещения.

Введение. Тонкостенные элементы конструкций благодаря своей прочности и лёгкости получили широкое распространение в строительстве для создания несущих конструкций зданий и в машиностроении для производства корпусов автомобилей, самолётов, космических аппаратов и др. Такие элементы могут быть выполнены из современных композиционных материалов, обладающих значительной анизотропией упругих свойств. Помимо этого, к преимуществам композиционных материалов относятся высокая прочность и жёсткость, низкий вес, устойчивость к коррозии и агрессивным средам, а также возможность получения различных форм и размеров. При проектировании и производстве элементов конструкций необходимо учитывать особенности материала и технологии изготовления, чтобы обеспечить необходимую прочность и долговечность конструкции. Кроме того, важно учитывать условия и нагрузки, к которым относятся сосредоточенные и локальные силовые и тепловые воздействия, которые могут действовать на элемент конструкции в процессе его эксплуатации.

В связи с вышеизложенным актуальными являются задачи, связанные с определением напряжённо-деформированного состояния (НДС) тонкостенных элементов конструкций. При этом в ряде публикаций используется сведение трёхмерных уравнений теории упругости к серии двумерных задач в плоскости пластины с использованием приближений высшего порядка по сравнению с классической теорией Г. Кирхгофа [1–4]. В публикациях А. А. Трещева, Н. С. Ющенко [1, 2] представлена математическая модель деформирования структурно ортотропной пластины прямоугольной формы при поперечном изгибе. В статье С. В. Шешенина, М. А. Кузьмина, Н. Б. Артамоновой [3] проводится асимптотическое осреднение упругих однородных и неоднородных в поперечном направлении пластин вплоть до пятого приближения. В статье С. В. Шешенина, Р. Р. Мурадханова [4] приводится обоснование применения методики асимптотического осреднения для трёхмерных уравнений в частных производных с быстро осциллирующими коэффициентами к

задаче с двумя малыми параметрами в случае однородной тонкой сильно ортотропной пластины, изгибаемой поверхностной нагрузкой без учёта массовых сил.

Целью настоящей статьи является построение фундаментального решения (обобщённых перемещений) задачи статики для ортотропной пластины на базе обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации при действии сосредоточенной силы, вызывающей состояние изгиба. При этом на упругие постоянные ортотропного материала пластины не накладывается никаких дополнительных ограничений в виде «гипотетического» модуля сдвига.

Постановка задачи. Рассмотрим ортотропную пластину толщины $2h$. На пластину действует сосредоточенная сила, приложенная в начале координат и вызывающая состояние изгиба. Отнесём пластину к безразмерной системе координат x_1, x_2, x_3 , определённой с точностью до полутолщины пластины h , причём x_1, x_2 – координаты точки в срединной плоскости пластины, x_3 – поперечная координата.

В рамках обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации имеют место такие представления компонент НДС [5]:

– компоненты вектора перемещений

$$u_j(x_1, x_2, x_3) = \gamma_j(x_1, x_2)P_1(x_3) \quad (j=1, 2); \quad u_3(x_1, x_2, x_3) = w_0(x_1, x_2)P_0(x_3),$$

где $\gamma_j(x_1, x_2)$, $w_0(x_1, x_2)$ – обобщённые перемещения пластины (γ_1, γ_2 – углы поворота нормали, w_0 – прогиб срединной поверхности); $P_k = P_k(x_3)$ – полиномы А. М. Лежандра;

– компоненты тензора напряжений

$$\sigma_{jj}(x_1, x_2, x_3) = \frac{3}{2}M_j(x_1, x_2)P_1(x_3) \quad (j=1, 2); \quad \sigma_{12}(x_1, x_2, x_3) = \frac{3}{2}H_{12}(x_1, x_2)P_1(x_3);$$

$$\sigma_{j3}(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2}Q_{j0}(x_1, x_2)\{P_0(x_3) - P_2(x_3)\} \quad (j=1, 2); \quad \sigma_{33}(x_1, x_2, x_3) = 0,$$

где $M_j(x_1, x_2)$, $H_{12}(x_1, x_2)$, $Q_{j0}(x_1, x_2)$ – обобщённые внутренние силовые факторы (M_1, M_2 – изгибающие моменты; H_{12} – крутящий момент; Q_{10}, Q_{20} – перерезывающие силы);

– компоненты вектора объёмной силы

$$F_j(x_1, x_2, x_3) = \frac{3}{2}m_j(x_1, x_2)P_1(x_3) \quad (j=1, 2); \quad F_3(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2}q(x_1, x_2)P_0(x_3). \quad (1)$$

Система уравнений НДС ортотропных пластин, записанная на базе $\{1,0\}$ -аппроксимации и описывающая состояние изгиба, включает в себя [5]:

– соотношения упругости в перемещениях

$$M_1 = D_1 \left(\frac{\partial \gamma_1}{\partial x_1} + \nu_{21} \frac{\partial \gamma_2}{\partial x_2} \right); \quad M_2 = D_2 \left(\frac{\partial \gamma_2}{\partial x_2} + \nu_{12} \frac{\partial \gamma_1}{\partial x_1} \right); \quad H_{12} = D_{12} \left(\frac{\partial \gamma_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \gamma_2}{\partial x_1} \right);$$

$$Q_{j0} = \Lambda_j \left(\gamma_j + \frac{\partial w_0}{\partial x_j} \right) \quad (j=1, 2), \quad (2)$$

где

$$D_1 = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \frac{1}{1 - v_{12}v_{21}}; \quad D_2 = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \frac{1}{1 - v_{12}v_{21}}; \quad D_{12} = \frac{2G_{12}}{3E};$$

$$\Lambda_j = \frac{5G_{j3}}{3E} \quad (j=1, 2); \quad E = \sqrt{E_1 E_2};$$

E_1, E_2 – модули Т. Юнга для направлений x_1, x_2 соответственно; G_{12}, G_{13}, G_{23} – модули сдвига, характеризующие изменение углов между главными направлениями x_1 и x_2, x_1 и x_3, x_2 и x_3 соответственно; v_{12}, v_{21} – коэффициенты С. Д. Пуассона ($E_2 v_{12} = E_1 v_{21}$);

– уравнения равновесия

$$\frac{\partial M_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H_{12}}{\partial x_2} - Q_{10} + m_1 = 0; \quad \frac{\partial M_2}{\partial x_2} + \frac{\partial H_{12}}{\partial x_1} - Q_{20} + m_2 = 0; \quad \frac{\partial Q_{10}}{\partial x_1} + \frac{\partial Q_{20}}{\partial x_2} + q = 0. \quad (3)$$

Обобщённые моменты в уравнениях (2), (3) определены с точностью до значения Eh^2 , а обобщённые перерезывающие силы – с точностью до Eh .

Для случая действия сосредоточенной силы компоненты вектора объёмной силы (1) берём в виде

$$m_j(x_1, x_2) = m_j^* \delta(x_1, x_2) \quad (j=1, 2); \quad q(x_1, x_2) = q^* \delta(x_1, x_2), \quad (4)$$

где $\delta(x_1, x_2)$ – двумерная дельта функция П. Дирака; $m_j^* = \text{const}; q^* = \text{const}$.

Методика решения задачи основана на применении двумерного интегрального преобразования Ж. Фурье [6] к разрешающей системе дифференциальных уравнений (2), (3) с правыми частями (4).

Подставляя соотношения упругости в перемещениях (2) в уравнения равновесия (3), получим систему уравнений равновесия в перемещениях:

$$L_{j1}\gamma_1 + L_{j2}\gamma_2 + L_{j3}w_0 = -m_j^* \delta(x_1, x_2) \quad (j=1, 2);$$

$$L_{31}\gamma_1 + L_{32}\gamma_2 + L_{33}w_0 = q^* \delta(x_1, x_2), \quad (5)$$

где L_{ij} – дифференциальные операторы второго порядка вида

$$L_{11} = D_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + D_{12} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \Lambda_1; \quad L_{12} = L_{21} = (v_{21}D_1 + D_{12}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2}; \quad L_{33} = -\left(\Lambda_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \Lambda_2 \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right);$$

$$L_{22} = D_{12} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + D_2 \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \Lambda_2; \quad L_{j3} = L_{3j} = -\Lambda_j \frac{\partial}{\partial x_j} \quad (j=1, 2).$$

Применяя двумерное интегральное преобразование Ж. Фурье к системе (5) получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\tilde{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} \tilde{\gamma}_1 \\ \tilde{\gamma}_2 \\ \tilde{w}_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} m_1^* \\ m_2^* \\ -q^* \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_2, \tilde{w}_0$ – трансформанты искомых функций;

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} D_1 \xi_1^2 + D_{12} \xi_2^2 + \Lambda_1 & (v_{21} D_1 + D_{12}) \xi_1 \xi_2 & -i \Lambda_1 \xi_1 \\ (v_{21} D_1 + D_{12}) \xi_1 \xi_2 & D_{12} \xi_1^2 + D_2 \xi_2^2 + \Lambda_2 & -i \Lambda_2 \xi_2 \\ -i \Lambda_1 \xi_1 & -i \Lambda_2 \xi_2 & -\Lambda_1 \xi_1^2 - \Lambda_2 \xi_2^2 \end{bmatrix};$$

ξ_1, ξ_2 – координаты точки в пространстве трансформант.

Выполним замену независимых переменных в пространстве оригиналов и трансформант:

$$\eta_j = \sqrt{\Lambda_j} \xi_j; \quad y_j = \frac{x_j}{\sqrt{\Lambda_j}} \quad (j=1, 2),$$

тогда СЛАУ (6) примет вид:

$$\begin{bmatrix} A_1 \eta_1^2 + A_4 \eta_2^2 + 1 & A_3 \eta_1 \eta_2 & -i \eta_1 \\ A_3 \eta_1 \eta_2 & A_4 \eta_1^2 + A_2 \eta_2^2 + 1 & -i \eta_2 \\ -i \eta_1 & -i \eta_2 & -\eta_1^2 - \eta_2^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\gamma}_1 \sqrt{\Lambda_1} \\ \tilde{\gamma}_2 \sqrt{\Lambda_2} \\ \tilde{w}_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} \frac{m_1^*}{\sqrt{\Lambda_1}} \\ \frac{m_2^*}{\sqrt{\Lambda_2}} \\ -q^* \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где

$$A_j = \frac{D_j}{\Lambda_j^2} \quad (j=1, 2); \quad A_3 = \frac{v_{21} D_1 + D_{12}}{\Lambda_1 \Lambda_2}; \quad A_4 = \frac{D_{12}}{\Lambda_1 \Lambda_2}.$$

Решение СЛАУ (7) имеет вид

$$\tilde{\gamma}_j = \sum_{k=0}^{14} \beta_{jk} \tilde{K}_k \quad (j=1, 2); \quad \tilde{w}_0 = \sum_{k=0}^{14} \beta_{3k} \tilde{K}_k, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{K}_0 &= \frac{1}{\Delta}; \quad \tilde{K}_j = \frac{\eta_j^4}{\Delta} \quad (j=1, 2); \quad \tilde{K}_3 = \frac{\eta_1^2 \eta_2^2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_4 = \frac{\eta_1^2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_5 = \frac{\eta_1^3 \eta_2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_6 = \frac{\eta_1 \eta_2^3}{\Delta}; \\ \tilde{K}_7 &= \frac{\eta_1 \eta_2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_8 = \frac{i \eta_1 \eta_2^2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_9 = \frac{i \eta_1^3}{\Delta}; \quad \tilde{K}_{10} = \frac{i \eta_1}{\Delta}; \quad \tilde{K}_{11} = \frac{\eta_2^2}{\Delta}; \\ \tilde{K}_{12} &= \frac{i \eta_1^2 \eta_2}{\Delta}; \quad \tilde{K}_{13} = \frac{i \eta_2^3}{\Delta}; \quad \tilde{K}_{14} = \frac{i \eta_2}{\Delta}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta = -A_4 (\eta_1^2 + \eta_2^2) \left\{ A_1 \eta_1^4 + A_2 \eta_2^4 + \frac{1}{A_4} (A_4^2 - A_3^2 + A_4 A_2) \eta_1^2 \eta_2^2 \right\} -$$

$$- \{ A_1 \eta_1^4 + A_2 \eta_2^4 + 2(A_3 + A_4) \eta_1^2 \eta_2^2 \}.$$

Ненулевые коэффициенты в формулах (8) равны

$$\begin{aligned} \frac{\beta_{11}}{A_4} = \frac{\beta_{12}}{A_2} = \frac{\beta_{13}}{A_2 + A_4} = \beta_{14} = -\frac{m_1^*}{\Lambda_1}; \quad \frac{\beta_{21}}{A_1} = \frac{\beta_{22}}{A_4} = \frac{\beta_{23}}{A_1 + A_4} = \beta_{2,11} = -\frac{m_2^*}{\Lambda_2}; \\ \frac{\beta_{25}}{m_1^*} = \frac{\beta_{26}}{m_1^*} = \frac{\beta_{15}}{m_2^*} = \frac{\beta_{16}}{m_2^*} = \frac{A_3}{\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}}; \quad \frac{\beta_{17}}{m_2^*} = \frac{\beta_{27}}{m_1^*} = -\frac{1}{\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}}; \quad \frac{\beta_{18}}{q^*} = -\frac{\beta_{38}}{m_1^*} = \frac{A_3 - A_2}{\sqrt{\Lambda_1}}; \\ \frac{\beta_{2,12}}{q^*} = -\frac{\beta_{3,12}}{m_2^*} = \frac{A_3 - A_1}{\sqrt{\Lambda_2}}; \quad \frac{\beta_{19}}{A_4} = \beta_{1,10} = -\frac{q^*}{\sqrt{\Lambda_1}}; \quad \frac{\beta_{2,13}}{A_4} = \beta_{2,14} = -\frac{q^*}{\sqrt{\Lambda_2}}; \\ \beta_{30} = \frac{\beta_{31}}{A_1 A_4} = \frac{\beta_{32}}{A_2 A_4} = \frac{\beta_{33}}{A_4^2 + A_1 A_2 - A_3^2} = \frac{\beta_{34}}{A_1 + A_4} = \frac{\beta_{36}}{A_2 + A_4} = -q^*; \\ \frac{\beta_{39}}{A_4} = \beta_{3,10} = \frac{m_1^*}{\sqrt{\Lambda_1}}; \quad \frac{\beta_{3,13}}{A_4} = \beta_{3,14} = \frac{m_2^*}{\sqrt{\Lambda_2}}. \end{aligned}$$

Методику обращения трансформант обобщённых перемещений (8), основанную на применении специальной G -функции, покажем на примере обращения трансформанты $\tilde{K}_7$ [формулы (9)]. Применяя формулу обращения для двумерного интегрального преобразования Ж. Фурье [6] и выделяя в полученных интегралах чётные и нечётные части, запишем

$$K_7 = -\frac{2}{\pi\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\eta_1 \eta_2}{\Delta} \sin \eta_1 y_1 \sin \eta_2 y_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (10)$$

Перейдём к полярным координатам по формулам

$$y_1 = r_0 \cos \varphi_0; \quad y_2 = r_0 \sin \varphi_0; \quad \eta_1 = \rho \cos \theta; \quad \eta_2 = \rho \sin \theta, \quad (11)$$

тогда (10) примет вид:

$$K_7 = \frac{1}{\pi\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin 2\theta d\theta}{a(\theta)} \int_0^\infty \frac{\sin(r_0 \rho \cos \varphi_0 \cos \theta) \sin(r_0 \rho \sin \varphi_0 \sin \theta)}{\rho \{ \rho^2 + c^2(\theta) \}} d\rho, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a(\theta) &= A_4 (A_1 \cos^4 \theta + A_2 \sin^4 \theta) + (A_4^2 - A_3^2 + A_1 A_2) \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \\ b(\theta) &= A_1 \cos^4 \theta + 2(A_3 + A_4) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + A_2 \sin^4 \theta; \quad c^2(\theta) = \frac{b(\theta)}{a(\theta)}. \end{aligned}$$

Применяя разложение К. Г. Якоби–К. Т. Ангера [7]

$$\sin(x \cos \varphi \cos \theta) \sin(x \sin \varphi \sin \theta) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} J_{2n}(x) \sin 2n\varphi \sin 2n\theta,$$

где $J_v(x)$ – функция Ф. В. Бесселя первого рода порядка v , преобразуем выражение (12) к виду

$$K_7 = \frac{2}{\pi\sqrt{\Lambda_1\Lambda_2}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \sin 2n\varphi_0 \int_0^{\pi/2} a_{7,n}(\theta) d\theta \int_0^{\infty} \frac{J_{2n}(r_0\rho)}{\rho\{\rho^2 + c^2(\theta)\}} d\rho, \quad (13)$$

где

$$a_{7,n}(\theta) = \frac{\sin 2\theta \sin 2n\theta}{a(\theta)} \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

Сравнивая интеграл в (13) с интегральным представлением специальной G -функции [7]

$$G_{n,v}(rz) = (-1)^n \left(\frac{r}{2}\right)^{v-n} \int_0^{\infty} \frac{\rho^{v-n+1} J_{v+n}(r\rho)}{\rho^2 + z^2} d\rho \quad \left(r > 0; \operatorname{Re} z > 0; -1 < \operatorname{Re} v < n + \frac{3}{2}\right),$$

заметим, что

$$K_7 = r_0^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin 2n\varphi_0 \int_0^{\pi/2} b_{7,n}(\theta) G_{n+1,n-1}(r_0 c(\theta)) d\theta, \quad (14)$$

где

$$b_{7,n}(\theta) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\Lambda_1\Lambda_2}} a_{7,n}(\theta) \quad (n=1, 2, 3, \dots); \quad r_0 = \sqrt{\frac{x_1^2}{\Lambda_1} + \frac{x_2^2}{\Lambda_2}};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{x_1}{\sqrt{\Lambda_1} r_0}; \quad \sin \varphi_0 = \frac{x_2}{\sqrt{\Lambda_2} r_0}.$$

Таким образом, оригиналы обобщённых перемещений (8) имеют вид:

$$\gamma_j = \sum_{k=0}^{14} \beta_{jk} K_k \quad (j=1, 2); \quad w_0 = \sum_{k=0}^{14} \beta_{3k} K_k, \quad (15)$$

где функции K_k имеют вид, аналогичный (14).

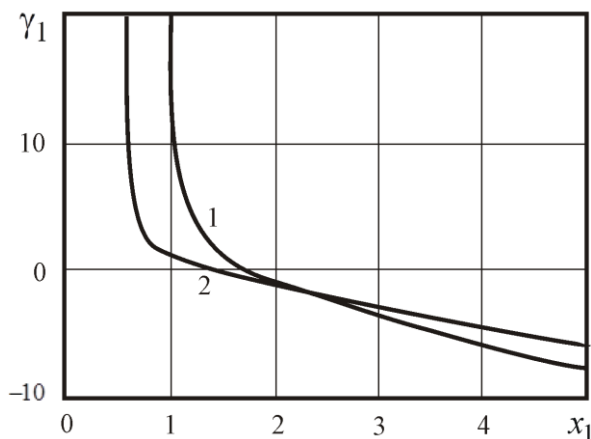
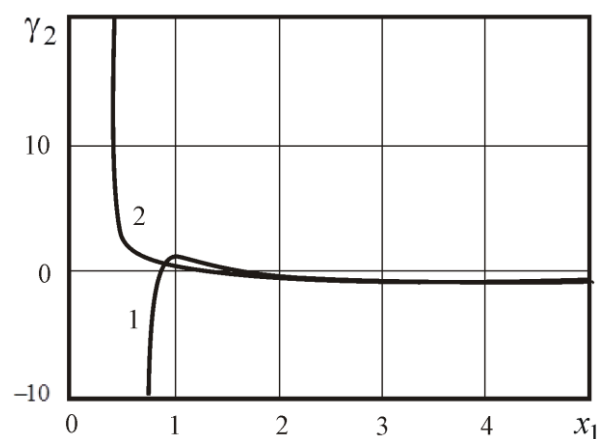
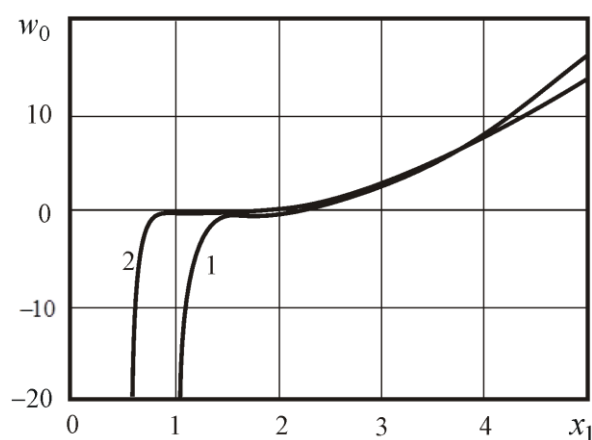
Анализ результатов численных исследований. Численные исследования посвящены выявлению влияния упругих постоянных ортотропного материала пластины на обобщённые перемещения (15). Рассмотрен случай действия сосредоточенной силы при $m_1^* = m_2^* = q^* = 1$ [формулы (4)]. Результаты исследований представлены на рис. 1–3 в виде графиков обобщённых перемещений (15), построенных вдоль оси x_1 при $x_2 = 0$. Рассмотрены такие виды материалов пластины (табл. 1, в которой константы E_i и G_{ij} приведены с точностью до 10^4 МПа):

- $\mathbf{M}_1$ – ортотропный материал (стеклопластик ВМ-1, кривые 1 на рис. 1–3);
- $\mathbf{M}_2$ – модельный изотропный материал (кривые 2 на рис. 1–3).

Таблица 1

Упругие постоянные материалов

Материал	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
$\mathbf{M}_1$	4,76	2,07	0,149	0,531	0,501	0,434
$\mathbf{M}_2$	4,76	4,76	0,149	2,071	2,071	2,071

Рис. 1. Угол поворота нормали γ_1 Рис. 2. Угол поворота нормали γ_2 Рис. 3. Прогиб пластины w_0

Выводы. Из рис. 1–3 видно, что упругие постоянные ортотропного материала оказывают существенное влияние на компоненты НДС, особенно в окрестности сосредоточенного воздействия.

Результаты, полученные в работе, послужат в дальнейшем для определения внутренних силовых факторов, возникающих при изгибе ортотропных пластин. Это позволит произвести численные исследования НДС пластин, изготовленных из современных композиционных материалов на базе обобщённой теории в варианте $\{m,n\}$ -аппроксимации.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при расчёте НДС ортотропных пластин на базе обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации, применив двумерное интегральное преобразование Ж. Фурье и методику обращения, основанную на применении специальной G -функции, можно найти фундаментальное решение в аналитическом виде. На основе полученного решения можно не только проводить численные исследования компонент НДС, но и использовать полученные результаты для решений задач о локальных силовых воздействиях.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400353-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трещев А. А. К расчету ортотропной пластины с учетом нелинейной зависимости жесткостных характеристик от вида напряженного состояния / А. А. Трещев, Н. С. Ющенко // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022-2023 годы. Научные труды РААСН: в 2-х томах. – Т. 2. – Москва, 2024. – С. 429–437.
2. Трещев А. А. Учет конструктивной ортотропии и нелинейной приобретаемой неоднородности при изгибе прямоугольных пластин средней толщины / А. А. Трещев, Н. С. Ющенко // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 3. – С. 36–57.
3. Шешенин С. В. Высшие асимптотические приближения в задаче о поперечном изгибе пластины / С. В. Шешенин, М. А. Кузьмин, Н. Б. Артамонова // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 222–236.
4. Шешенин С. В. Асимптотическое исследование изгиба пластины для сильно ортотропного материала / С. В. Шешенин, Р. Р. Мурадханов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 3. – С. 36–57.
5. Пелех Б. Л. Слоистые анизотропные пластины и оболочки с концентраторами напряжений / Б. Л. Пелех, В. А. Лазько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 296 с.
6. Снеддон И. Преобразования Фурье / И. Снеддон. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1955. – 668 с.
7. Хижняк В. К. Смешанные задачи теории пластин и оболочек : учебное пособие / В. К. Хижняк, В. П. Шевченко. – Донецк : ДонГУ, 1980. – 128 с.

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.

**A FUNDAMENTAL SOLUTION TO THE PROBLEM OF STATICS FOR BENDING
AN ORTHOTROPIC PLATE UNDER THE ACTION OF A CONCENTRATED FORCE BASED
ON A GENERALIZED THEORY**

N. S. Bondarenko

The stress-strain state of an orthotropic plate exposed to a concentrated force applied at the origin is considered. A fundamental solution of the statics problem for the case of bending of an plate is constructed on the basis of a generalized theory in the $\{1,0\}$ -approximation variant. When solving the problem, it was assumed that there was no «hypothetical» shear modulus. The dependence of generalized displacements on the elastic constants of the orthotropic plate material is investigated.

Keywords: orthotropic plate; concentrated force; $\{1,0\}$ -approximation; Legendre polynomials; generalized displacements.

Бондаренко Наталья Сергеевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной механики
и компьютерных технологий,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: n.bondarenko123@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5254-5545
Author ID: 1223868

Bondarenko Natalya Sergeevna

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent,
Associate Professor of the Department of Applied
Mechanics and Computer Technologies,
Senior Researcher,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

СДВИГОВЫЕ ВОЛНЫ В УПРУГОМ СЛОЕ С ДУГООБРАЗНЫМИ ВСТАВКАМИ ВДОЛЬ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА: АЛГОРИТМ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© 2025. *М. Н. Пачева, В. И. Сторожев, С. В. Сторожев, М. В. Фоменко*

На основе совместного применения метода рядов по базисным множествам бегущих и краевых стоячих нормальных упругих волн и метода частичных областей построены численно-аналитические решения задач о распространении сдвиговых волн деформаций вдоль составного тела, образуемого двумя полуслоями равной толщины и расположенными между ними дугообразными идеально контактирующими с полуслоями вставками из двух секторных фрагментов полукольцевого продольного сечения либо из одного секторного фрагмента полукольцевого и двух секторных фрагментов четвертькольцевого сечения. Решения задач на основе алгебраизации функциональных граничных условий сшивания фрагментов волноводов по идеально контактирующим боковым граничным поверхностям сведены к системам алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложений волновых полей в полуслоях и кольцевых секторах по базисным множествам нормальных волн сдвига в упругом слое и окружающих нормальных сдвиговых волн в упругом цилиндре кольцевого сечения. Дано детализированное описание алгоритма теоретического анализа рассматриваемой задачи для частного случая волноводов первого рассматриваемого типа с закрепленными лицевыми граничными поверхностями.

Ключевые слова: составной изотропный упругий волновод, слой с секторными кольцевыми вставками, сдвиговые упругие волны, метод рядов по базисным нормальным волнам, метод частичных областей, алгебраизация функциональных условий контакта фрагментов, определение коэффициентов разложений по базисным волнам, системы алгебраических уравнений.

Введение и постановка рассматриваемых задач. Представляющие фундаментальный теоретический и прикладной интерес вопросы исследования закономерностей распространения волн деформаций сдвигового типа вдоль упругого слоя с локальными участками-вставками из материалов с отличающимися физико-механическими свойствами либо участками видоизмененной геометрии на базе совместного применения метода рядов по базисным множествам бегущих и краевых стоячих нормальных упругих волн и метода частичных областей [1–5] рассматривались, в частности, в работах [6–15]. Целью данной работы является распространение такого численно-аналитического подхода на два типа задач о сдвиговых волнах в упругом слое с дугообразными вставками вдоль волноводного тракта, а именно задач о распространении сдвиговых волн деформаций вдоль составного тела, образуемого двумя полуслоями равной толщины и расположенными между ними дугообразными идеально контактирующими с полуслоями вставками из двух фрагментов полукольцевого продольного сечения либо из одного фрагмента полукольцевого и двух фрагментов четвертькольцевого сечения. В общем случае указанные фрагменты волноводов могут быть составлены из разнотипных изотропных материалов. На внешних граничных поверхностях всех составных элементов волновода формулируются однотипные условия отсутствия механических напряжений либо жесткой заделки, а также сочетания различных условий указанного типа на противоположных границах.

Продольные сечения волноводов и способы отнесения фрагментов волноводов первого и второго рассматриваемого типа к системам прямоугольных декартовых и цилиндрических координат представлены на рисунках 1 и 2.

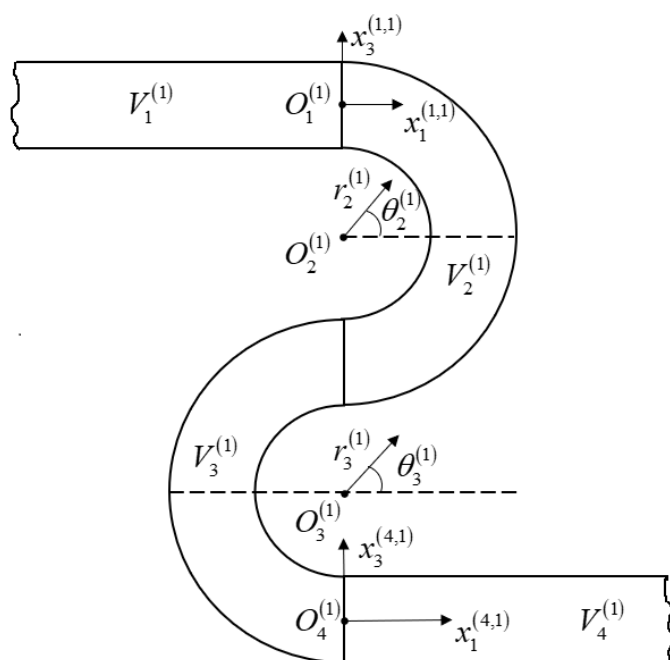


Рис. 1. Геометрия волновода первого типа

Составляющие волновода первого типа в виде плоскопараллельных полуслоев $V_1^{(1)}$ и $V_4^{(1)}$ в связываемых с ними локальных системах прямоугольных координат занимают области

$$\begin{aligned} V_1^{(1)} &= \{x_1^{(1,1)} \leq 0, x_2^{(1,1)} \in (-\infty, \infty), x_3^{(1,1)} \in [-h/2, h/2]\}, \\ V_4^{(1)} &= \{x_1^{(4,1)} \geq 0, x_2^{(4,1)} \in (-\infty, \infty), x_3^{(4,1)} \in [-h/2, h/2]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

а полуцилиндрические фрагменты вставки $V_2^{(1)}$ и $V_3^{(1)}$ в волноводе первого типа в локальных системах цилиндрических координат $O_2^{(1)} r_2^{(1)} \theta_2^{(1)} z_2^{(1)}$ и $O_3^{(1)} r_3^{(1)} \theta_3^{(1)} z_3^{(1)}$ представлены областями

$$\begin{aligned} V_2^{(1)} &= \{R \leq r_2^{(1)} \leq R+h, -\pi/2 \leq \theta_2^{(1)} \leq \pi/2, z_2^{(1)} \in (-\infty, \infty)\}, \\ V_3^{(1)} &= \{R \leq r_3^{(1)} \leq R+h, \pi/2 \leq \theta_3^{(1)} \leq 3\pi/2, z_3^{(1)} \in (-\infty, \infty)\}. \end{aligned} \quad (2)$$

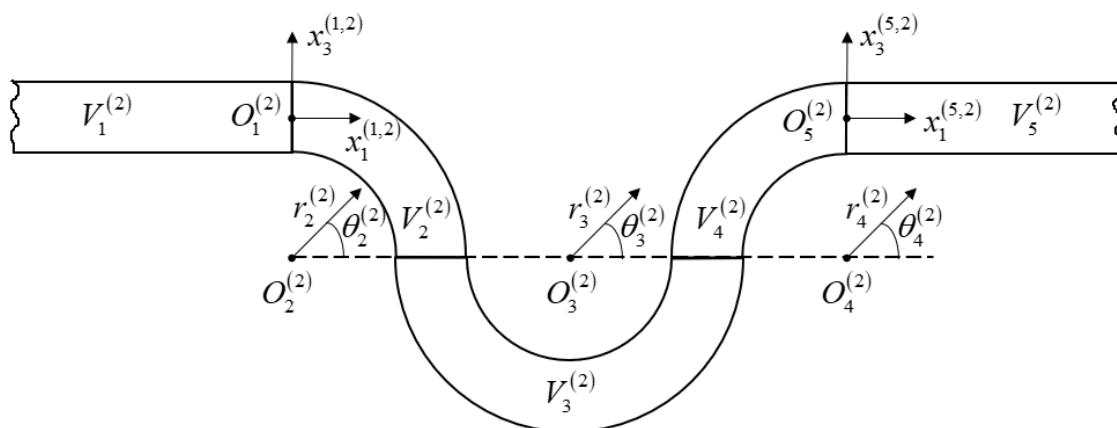


Рис. 2. Геометрия волновода второго типа

Составляющие волновода второго типа в виде плоскопараллельных полуслоев $V_1^{(2)}$ и $V_5^{(2)}$ в связываемых с ними локальных системах прямоугольных координат занимают области

$$\begin{aligned} V_1^{(2)} &= \{x_1^{(1,2)} \leq 0, x_2^{(1,2)} \in (-\infty, \infty), x_3^{(1,2)} \in [-h/2, h/2]\}, \\ V_5^{(2)} &= \{x_1^{(5,2)} \geq 0, x_2^{(5,2)} \in (-\infty, \infty), x_3^{(5,2)} \in [-h/2, h/2]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

четвертьцилиндрические фрагменты вставки $V_2^{(2)}$ и $V_4^{(2)}$ в волноводе второго типа в локальных системах цилиндрических координат $O_2^{(2)}r_2^{(2)}\theta_2^{(2)}z_2^{(2)}$ и $O_4^{(2)}r_4^{(2)}\theta_4^{(2)}z_4^{(2)}$ представлены областями

$$\begin{aligned} V_2^{(2)} &= \{R \leq r_2^{(2)} \leq R+h, 0 \leq \theta_2^{(2)} \leq \pi/2, z_2^{(2)} \in (-\infty, \infty)\}, \\ V_4^{(2)} &= \{R \leq r_4^{(2)} \leq R+h, \pi/2 \leq \theta_4^{(2)} \leq \pi, z_4^{(2)} \in (-\infty, \infty)\}, \end{aligned} \quad (4)$$

а полуцилиндрический фрагмент $V_3^{(2)}$ вставки в волноводе второго типа в локальной системе цилиндрических координат $O_3^{(2)}r_3^{(2)}\theta_3^{(2)}z_3^{(2)}$ занимает область

$$V_3^{(2)} = \{R \leq r_3^{(2)} \leq R+h, \pi \leq \theta_3^{(2)} \leq 2\pi, z_3^{(2)} \in (-\infty, \infty)\}. \quad (5)$$

Представления для волновых полей в составных элементах волноводов рассматриваемых типов. Вводимые для последующего применения метода сшивания частичных областей представления для волновых полей циклической частоты ω в составных элементах $V_j^{(q)}$ являются отрезками разложений по базисным бегущим и краевым стоячим волнам сдвига в изотропном упругом слое из соответствующего материала с различными вариантами граничных условий на плоских гранях [5], а также по базисным бегущим и краевым стоячим окружным волнам сдвига вдоль углового направления в изотропном полом цилиндре из соответствующего материала с аналогичными сочетаниями типов краевых условий на внутренней и внешней граничных поверхностях [16, 17].

В частном случае волноводов с закрепленными лицевыми граничными поверхностями представления для комплексных амплитудных составляющих в представлениях полей SH волн в фрагментах $V_1^{(1)}$, $V_4^{(1)}$ волновода с геометрией первого типа и в фрагментах $V_1^{(2)}$, $V_5^{(2)}$ волновода с геометрией второго типа могут быть соответственно записаны в виде

$$\begin{aligned} u_2^{(1,1)}(x_1^{(1,1)}, x_3^{(1,1)}) &= u_{20}^{(1)}\varphi_0^{(1)}(x_3^{(1,1)})\exp(ik_0^{(1,1)}x_1^{(1,1)}) + \sum_{p=1}^{N_{1,1}} A_p^{(1,1)}\varphi_p^{(1)}(x_3^{(1,1)})\exp(-ik_p^{(1,1)}x_1^{(1,1)}), \\ u_2^{(4,1)}(x_1^{(4,1)}, x_3^{(4,1)}) &= \sum_{p=1}^{N_{4,1}} A_p^{(4,1)}\varphi_p^{(1)}(x_3^{(4,1)})\exp(ik_p^{(4,1)}x_1^{(4,1)}); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_2^{(1,2)}(x_1^{(1,2)}, x_3^{(1,2)}) &= u_{20}^{(2)}\varphi_0^{(2)}(x_3^{(1,2)})\exp(-ik_0^{(1,2)}x_1^{(1,2)}) + \sum_{p=1}^{N_{1,2}} A_p^{(1,2)}\varphi_p^{(2)}(x_3^{(1,2)})\exp(ik_p^{(1,2)}x_1^{(1,2)}), \\ u_2^{(5,2)}(x_1^{(5,2)}, x_3^{(5,2)}) &= \sum_{p=1}^{N_{5,2}} A_p^{(5,2)}\varphi_p^{(2)}(x_3^{(5,2)})\exp(ik_p^{(5,2)}x_1^{(5,2)}); \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_p^{(n)}(x_3^{(m,n)}) &= \exp(i\nu_p h/2) \cdot \exp(i\nu_p x_3^{(m,n)}) - \exp(-i\nu_p h/2) \cdot \exp(-i\nu_p x_3^{(m,n)}), \\ \nu_p &= (p-1)\pi/h, \quad k_p^{(m,n)} = (\Omega_{mn}^2 - \nu_p^2)^{1/2}, \quad \Omega_{mn}^2 = \rho_{mn}\omega^2/\mu_{mn}; \end{aligned} \quad (8)$$

μ_{mn} , ρ_{mn} – соответственно сдвиговые модули Ламе и параметры плотности для материала в фрагменте $V_m^{(n)}$ волновода; $A_p^{(m,n)}$ – произвольные коэффициенты разложений волновых полей в $V_m^{(n)}$ по базисным множествам плоских нормальных волн; $u_{20}^{(1)}$, $u_{20}^{(2)}$ – соответственно амплитудные параметры падающих волн в фрагментах волноводов $V_1^{(1)}$ и $V_1^{(2)}$. Действительные значения $k_p^{(m,n)}$ отвечают бегущим нормальным волнам рассматриваемого типа, а мнимые описывают краевые стоячие базисные нормальные волны.

В фрагментах рассматриваемых волноводов, имеющих сечения в виде кольцевых секторов различной угловой меры, в допущении о том, что данные фрагменты могут иметь различные физико-механические характеристики, представления для комплексных амплитудных составляющих полей сдвиговых нормальных волн окружного типа могут быть записаны в виде

$$u_z^{(m,n)}(r_m^{(n)}, \theta_m^{(n)}) = \sum_{p=1}^{N_{m,n}} A_{1p}^{(m,n)} \varphi_p^{(m,n)}(r_m^{(n)}) \exp(ik_p^{(m,n)} \theta_m^{(n)}) + \sum_{p=1}^{N_{m,n}} A_{2p}^{(m,n)} \varphi_p^{(m,n)}(r_m^{(n)}) \exp(-ik_p^{(m,n)} \theta_m^{(n)}), \quad (9)$$

где

$$\varphi_p^{(m,n)}(r_m^{(n)}) = Y_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn}(R+h)) J_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn} r_m^{(n)}) - J_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn}(R+h)) Y_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn} r_m^{(n)}); \quad (10)$$

$k_p^{(m,n)}$ – элементы множества корней дисперсионного уравнения вида

$$Y_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn}(R+h)) J_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn} R) - J_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn}(R+h)) Y_{k_p^{(m,n)}}(\beta_{mn} R) = 0, \quad \beta_{mn}^2 = \rho_{mn} \omega^2 / \mu_{mn}. \quad (11)$$

Рассчитанные в качестве примера, серии корней уравнения (11) для однотипных по физико-механическим свойствам фрагментов волновода с $R=0.1$ м и $h=0.3$ м из меди с $\rho_{mn}=8.93 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu_{mn}=45.5 \cdot 10^9$ Па при значениях частотного параметра $\omega_1=2.257 \cdot 10^4$ рад/с, $\omega_2=2.709 \cdot 10^4$ рад/с, $\omega_3=3.160 \cdot 10^4$ рад/с, $\omega_4=3.612 \cdot 10^4$ рад/с представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения корней уравнения (11)

Частота ω	Действительный корень	Мнимые корни			
ω_1	–	0.525 i	3.925 i	6.425 i	8.775 i
ω_2	1.475	3.625 i	6.225 i	8.625 i	10.975 i
ω_3	2.275	3.275 i	6.025 i	8.475 i	10.875 i
ω_4	2.975	2.825 i	5.775 i	8.275 i	10.725 i

Алгоритм алгебраизации краевых условий сшивания фрагментов волноводов. Множества неопределенных коэффициентов, вводимых в представлениях (6), (7), (9) для амплитудных составляющих волновых полей в фрагментах соответствующего волновода, определяются из функциональных краевых условий идеального механического контакта фрагментов на боковых граничных поверхностях с использованием алгоритмов их алгебраизации. Контактные условия сшивания на соответствующей граничной поверхности являются условиями равенства амплитудных характеристик сдвиговых волновых смещений и касательных напряжений на площадках контакта в сопрягаемых фрагментах.

Рассматриваемым в данной работе в качестве инструмента алгебраизации функциональных краевых условий подходом является применение интегрального метода наименьших квадратов. В процессе реализации этого подхода в рассмотрение вводится характеристика $\Phi^{(n)}$ совокупной квадратичной невязки краевых условий на поверхностях $\Gamma_{ab}^{(n)}$ сопряжения фрагментов соответствующего волновода, рассматриваемая как функция неопределенных коэффициентов в представлениях (6), (7), (9).

Для волновода первого типа с имеющими эквивалентные физико-механические свойства фрагментами

$$\Phi^{(n)} = \Phi_{12}^{(1)} + \Phi_{23}^{(1)} + \Phi_{34}^{(1)},$$

где

$$\begin{aligned}\Phi_{12}^{(1)} &= \int_{-h/2}^{h/2} (|u_2^{(1,1)} - u_z^{(2,1)}|^2)_{\Gamma_{12}^{(1)}} + (|\sigma_{12}^{(1,1)} - \sigma_{2z}^{(2,1)}|^2)_{\Gamma_{12}^{(1)}} dx_3^{(1,1)}, \\ \Phi_{23}^{(1)} &= \int_{-h/2}^{h/2} (|u_z^{(2,1)} - u_z^{(3,1)}|^2)_{\Gamma_{23}^{(1)}} + (|\sigma_{2z}^{(2,1)} - \sigma_{2z}^{(3,1)}|^2)_{\Gamma_{23}^{(1)}} dx_3^{(1,2,3)}, \\ \Phi_{34}^{(1)} &= \int_{-h/2}^{h/2} (|u_z^{(3,1)} - u_z^{(4,1)}|^2)_{\Gamma_{34}^{(1)}} + (|\sigma_{2z}^{(3,1)} - \sigma_{12}^{(4,1)}|^2)_{\Gamma_{34}^{(1)}} dx_3^{(4,1)}.\end{aligned}\quad (12)$$

С учетом вида определяющих соотношений

$$\sigma_{12}(x_1, x_3) = \mu(\partial/\partial x_1)u_2(x_1, x_3), \quad \sigma_{2z}(r, \theta) = \mu r^{-1}(\partial/\partial \theta)u_z(r, \theta),$$

в выражениях (12)

$$\begin{aligned}\sigma_{12}^{(1,1)}(x_1^{(1,1)}, x_3^{(1,1)}) &= \mu i k_0^{(1,1)} u_{20}^{(1)} \varphi_0^{(1)}(x_3^{(1,1)}) \exp(i k_0^{(1,1)} x_1^{(1,1)}) - \mu i k_p^{(1,1)} \sum_{p=1}^{N_{1,1}} A_p^{(1,1)} \varphi_p^{(1)}(x_3^{(1,1)}) \exp(-i k_p^{(1,1)} x_1^{(1,1)}), \\ \sigma_{12}^{(4,1)}(x_1^{(4,1)}, x_3^{(4,1)}) &= \mu i k_p^{(4,1)} \sum_{p=1}^{N_{4,1}} A_p^{(4,1)} \varphi_p^{(1)}(x_3^{(4,1)}) \exp(i k_p^{(4,1)} x_1^{(4,1)}); \\ \sigma_{2z}^{(m,n)}(r_m^{(n)}, \theta_m^{(n)}) &= \mu i k_p^{(m,n)} (r_m^{(n)})^{-1} \sum_{p=1}^{N_{m,n}} A_{1p}^{(m,n)} \varphi_p^{(m,n)}(r_m^{(n)}) \exp(i k_p^{(m,n)} \theta_m^{(n)}) - \\ &\quad - \mu i k_p^{(m,n)} (r_m^{(n)})^{-1} \sum_{p=1}^{N_{m,n}} A_{2p}^{(m,n)} \varphi_p^{(m,n)}(r_m^{(n)}) \exp(-i k_p^{(m,n)} \theta_m^{(n)}).\end{aligned}$$

На граничной поверхности $\Gamma_{12}^{(1)}$ учитываются зависимости $x_1^{(1,1)} = 0$, $\theta_2^{(1)} = \pi/2$. $r_2^{(1)} = R + h/2 + x_3^{(1,1)}$; на граничной поверхности $\Gamma_{23}^{(1)}$ – $\theta_2^{(1)} = -\pi/2$, $\theta_3^{(1)} = \pi/2$, $r_3^{(1)} = R + h/2 + x_3^{(1,2,3)}$, $r_2^{(1)} = R + h/2 - x_3^{(1,2,3)}$, $-h/2 \leq x_3^{(1,2,3)} \leq h/2$; на граничной поверхности $\Gamma_{34}^{(1)}$ – $x_1^{(4,1)} = 0$, $\theta_3^{(1)} = -\pi/2$, $r_3^{(1)} = R + h/2 - x_3^{(4,1)}$.

После получения аналитического представления $\Phi^{(n)}(A_p^{(1,1)}, \bar{A}_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, \bar{A}_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, \bar{A}_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}, \bar{A}_p^{(4,1)})$ на основе расчетных соотношений (12), в которых часть интегралов вычисляется на основе точных квадратурных формул, а часть – на основе алгоритмов численного интегрирования быстроосциллирующих функций, и в которые величины $\bar{A}_p^{(1,1)}$, $\bar{A}_{1p}^{(m,n)}$, $\bar{A}_{2p}^{(m,n)}$, $\bar{A}_p^{(4,1)}$ входят линейно, в качестве следствия из соотношений минимизации квадратичной невязки краевых условий сшивания фрагментов волновода первого типа

$$\begin{aligned} \partial \Phi^{(n)}(A_p^{(1,1)}, \bar{A}_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, \bar{A}_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, \bar{A}_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}, \bar{A}_p^{(4,1)}) / \partial \bar{A}_p^{(1,1)} &= 0, \\ \partial \Phi^{(n)}(A_p^{(1,1)}, \bar{A}_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, \bar{A}_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, \bar{A}_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}, \bar{A}_p^{(4,1)}) / \partial \bar{A}_{1p}^{(m,n)} &= 0, \\ \partial \Phi^{(n)}(A_p^{(1,1)}, \bar{A}_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, \bar{A}_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, \bar{A}_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}, \bar{A}_p^{(4,1)}) / \partial \bar{A}_{2p}^{(m,n)} &= 0, \\ \partial \Phi^{(n)}(A_p^{(1,1)}, \bar{A}_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, \bar{A}_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, \bar{A}_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}, \bar{A}_p^{(4,1)}) / \partial \bar{A}_p^{(4,1)} &= 0, \end{aligned}$$

записывается система линейных алгебраических уравнений для определения величин коэффициентов $A_p^{(1,1)}, A_{1p}^{(m,n)}, A_{2p}^{(m,n)}, A_p^{(4,1)}$ порядка $N_{1,1} + 2N_{2,1} + 2N_{3,1} + N_{4,1}$.

Аналогичную структуру имеет и алгоритм алгебраизации краевых условий сшивания фрагментов для волноводов второго типа.

Заключение. В рамках сформулированных целей в работе осуществлена разработка методики численно-аналитические решения задач о распространении нормальных сдвиговых упругих волн вдоль составного волновода из двух полуслоев равной толщины и расположенных между ними дугообразных идеально контактирующих с полуслоями вставок в виде двух секторных фрагментов полукольцевого продольного сечения либо из одного секторного фрагмента полукольцевого и двух секторных фрагментов четвертькольцевого сечения. Описанный теоретический алгоритм базируется на совместном применении метода частичных областей и метода рядов по базисным множествам бегущих и краевых стоячих нормальных упругих волн в стыкуемых фрагментах волновода. На основе алгебраизации функциональных граничных условий сшивания фрагментов волноводов по идеально контактирующим боковым граничным поверхностям с применением метода наименьших квадратов решения задач сведены к системам алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложений волновых полей по базисным множествам нормальных волн сдвига в полуслоях и базисным множествам окружающих нормальных сдвиговых волн в кольцевых секторах. Дано детализированное описание алгоритма теоретического анализа рассматриваемой задачи для частного случая волноводов первого рассматриваемого типа с закрепленными лицевыми граничными поверхностями.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миттра Р. Аналитические методы теории волноводов / Р. Миттра, С. Ли. – М.: Мир, 1974. – 327 с.
2. Гринченко В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
3. Гетман И. П. Математическая теория нерегулярных твердых волноводов / И. П. Гетман, Ю. А. Устинов. – Ростов-на-Дону: РГУ 1999. – 142 с.
4. Упругие волноводы: история и современность / В.В. Мелешко, А.А. Бондаренко, С.А. Довгий, и др. // Математические методы и физико-механические поля. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 86–104.
5. Космодамианский А.С. Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред / А.С. Космодамианский, В.И. Сторожев. – К.: Наук. думка, 1985. – 176 с.
6. Пачева М.Н. Прохождение сдвиговой волны по ортотропному волноводу из состыкованных под углом полуслоев / М.Н. Пачева // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете. Тезисы докладов X Всероссийской школы-семинара (пос. Дивноморское, 25-30 мая 2015 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. – С. 86.
7. Пачева М.Н. Моделирование волновых процессов в изотропном волноводе из состыкованных под углом полуслоев / М.Н. Пачева // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты–2015: матер. IV Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (25 мая 2015 г.). – Донецк: ДонНУЭТ, 2015. – С. 51–54.

8. Болнокин В.Е. Трансформация поперечных волн в зоне прямоугольного излома волноводного слоя с сечением меандровой структуры / В.Е. Болнокин, М.Н. Пачева, В.И. Сторожев // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16 – 18 мая 2016 г.) – Т. 1. Физико-математические, технические науки и экология. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 25–27.
9. Сторожев В.И. Распространение волн сдвига по ортотропному волноводу меандровой геометрической структуры / В.И. Сторожев, М.Н. Пачева, С.А. Прийменко // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете. Тезисы докладов XI Всероссийской школы-семинара (пос. Дивноморское, 23-27 мая 2016 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 124.
10. Сторожев В.И. Модифицированная схема алгебраизации функциональных граничных условий задачи о поперечных упругих волнах в Г-образном волноводе / В.И. Сторожев, М.Н. Пачева // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты–2017: матер. VI Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (26 мая 2017 г.). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2017. – С. 45–48.
11. Пачева М.Н. Модифицированная методика алгебраизации краевых условий в задаче о распространении упругой волны сдвига по волноводу из состыкованных под углом полуслоев / М.Н. Пачева, В.И. Сторожев, А.С. Телевной // Журнал теорет. и прикладной механики. – 2017. – № 2 (59). – С. 65–74.
12. Пачева М.Н. Сдвиговые волны в составном поперечно-анизотропном волноводе из полуслоев с контактирующими полуцилиндрическими боковыми поверхностями / М.Н. Пачева, В.И. Сторожев // Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты–2018: матер. VII Междунар. научн.-практ. интернет-конф. (25 мая 2018 г.). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – С. 46–49.
13. Глухов А.А. Распространение волн сдвига по ортотропному волноводу меандровой геометрической структуры / Глухов А.А., М.Н. Пачева, В.И. Сторожев // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете: тезисы докладов XIV Всероссийской школы-семинара (пос. Дивноморское, 27-31 мая 2019 г.). – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 31.
14. Пачева М.Н. Эффекты прохождения сдвиговых нормальных волн по составному волноводу из контактирующих трансверсально-изотропных функционально-градиентных полуслоев / М.Н. Пачева, В.И. Сторожев // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IV Международной научной конференции (Донецк, 31 октября 2019 г.). – Том 1: Физико-математические и технические науки. Часть 1. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2019. – С. 68–70.
15. Пачева М.Н. Энергетические характеристики нормальных волн сдвига в составном волноводе из изотропного и ортотропного полуслоев / М.Н. Пачева // Донецкие чтения 2020. Образование, наука и вызовы современности: материалы V Международной научной конференции (Донецк, 17 – 18 ноября 2020 г.) – Т. 1: Физико-математические и технические науки. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2020. – С. 90–93.
16. Тютюкин В.В. Нормальные волны кругового типа в полом упругом цилиндре / В.В. Тютюкин // Акуст. журн. – 2004. – Т. 50, № 6. – С. 855–864.
17. Глущенко А.В. Нормальные окружные волны сдвига в двухслойном протяженном полом цилиндре / А.В. Глущенко, М.Н. Пачева, В.И. Сторожев, М.В. Фоменко // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2024. – № 3 (88). – С. 65–71. – DOI:10.24412/0136-4545-2024-3-65-71. – EDN:UAJSDF

Поступила в редакцию 30.04.2025 г.

SHEAR WAVES IN AN ELASTIC LAYER WITH ARCED INSERTS ALONG A WAVEGUIDE: ALGORITHM OF THEORETICAL ANALYSIS

M. N. Pacheva, V. I. Storozhev, S. V. Storozhev, M. V. Fomenko

Based on the combined application of the method of series over basis sets of running and edge standing normal elastic waves and the method of partial domains, numerical and analytical solutions are constructed for problems of propagation of shear waves of deformations along a composite body formed by two half-layers of equal thickness and arc-shaped inserts located between them, ideally contacting the half-layers, made of two sector fragments of a semi-ring longitudinal section or of one sector fragment of a semi-ring and two sector fragments of a quarter-ring section. Solutions of problems based on algebraization of functional boundary

conditions for stitching waveguide fragments along ideally contacting lateral boundary surfaces are reduced to systems of algebraic equations for the expansion coefficients of wave fields in half-layers and annular sectors in terms of basis sets of normal shear waves in an elastic layer and circumferential normal shear waves in an elastic cylinder of annular cross-section. A detailed description of the algorithm for theoretical analysis of the problem under consideration is given for a particular case of waveguides of the first and second types under consideration with fixed front boundary surfaces.

Key words: compound isotropic elastic waveguide, layer with sector annular inserts, shear elastic waves, method of series in terms of basis normal waves, method of partial domains, algebraization of functional conditions for fragment contact, determination of expansion coefficients in terms of basis waves, systems of algebraic equations.

Пачева Марина Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории упругости и вычислительной математики им. акад. А.С. Космодамианского ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: pacheva.m.n@mail.ru.
Author ID: 1050985.

Pacheva Marina Nikolaevna

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Departament of Theory of Elasticity and Computational Mathematics named after Academician A.S. Kosmodamiansky, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Сторожев Валерий Иванович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: stvistvi@mail.ru.
ORCID: 0009-0006-8448-4963
Author ID: 1051802

Storozhev Valeriy Ivanovich

Doctor of Technical Science, Professor, Chief Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Сторожев Сергей Валериевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специализированных информационных технологий и систем строительного факультета ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, ДНР, РФ.
E-mail: s.v.storozhev@donnasa.ru.
ORCID: 0000-0002-4198-3491
Author ID: 1099797

Storozhev Sergey Valerievich

Doctor of Technical Science, Docent, Professor at the Chair of Specialized Information Technologies and Systems, Faculty of Civil Engineering, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, DPR, RF.

Фоменко Максим Владимирович

кандидат физико-математических наук, ученый секретарь научно-исследовательской части, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: maxim_fom@mail.ru.
ORCID: 0009-0003-9649-1827
Author ID: 1034058

Fomenko Maksim Vladimirovich

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Scientific Secretary of the Research Department, Senior Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

ОДНОРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОДНОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ПЛИТ

© 2025. *В. И. Сторожев, С. В. Сторожев, М. В. Фоменко*

Получено решение задачи построения системы базисных однородных решений для модели связанного пространственного термоупругого стационарного динамического деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит из материалов с однофакторной экспоненциальной неоднородностью физико-механических характеристик по толщине. Аналитические представления однородных решений найдены с применением полуобратного метода.

Ключевые слова: плиты пространственной геометрии, трансверсально-изотропные функционально-градиентные материалы, однофакторная экспоненциальная поперечная неоднородность, связанное стационарное термомеханическое деформирование, базисные однородные решения, аналитические представления, полуобратный метод.

Введение и цели исследования. Модели пространственного деформирования конструкционных элементов в виде упругих плит произвольной толщины с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами относятся к актуальным объектам исследований, связанных с проектированием деталей машин, приборов и строительных сооружений, а также с вопросами верификации результатов расчетного анализа конструкционных элементов данного типа с применением прямых численных и конечно-элементных подходов. Одним из весьма эффективных инструментов этих исследований является разработка и применение численно-аналитического метода однородных решений, концепция которого заключается в построении базисных функциональных систем, элементы которых являются точными решениями дифференциальных уравнений модели, удовлетворяют граничным условиям на плоских гранях плит и в совокупности обладают достаточным функциональным произволом для удовлетворения функциональным краевым условиям на боковых граничных поверхностях с использованием рядов по базисным элементарным однородным решениям с неопределенными коэффициентами. Ретроспективу и актуальную характеристику выполненных исследований в области развития метода однородных решений содержат публикации [1–13], на основе обобщения которых может быть поставлена задача дальнейшей разработки основ данного метода применительно к изготавливаемым на базе применения аддитивных технологий 3D печати плитам из инновационных непрерывно-неоднородных функционально-градиентных анизотропных материалов, получающих все более широкое и эффективное применение во многих современных научно-технических отраслях [14–18]. В этой связи, целью настоящей работы является построение базисных систем элементарных однородных решений для модели пространственного стационарного динамического термоупругого деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит с однофакторной экспоненциальной поперечной неоднородностью физико-механических свойств.

Основные соотношения задачи. Рассматривается трансверсально-изотропное функционально-градиентное упругое тело в форме плиты произвольной толщины h со

срединой плоскостью S , занимающее в декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ область

$$V = \{(x_1, x_2) \in S, 0 \leq x_3 \leq h\}. \quad (1)$$

Определяющие соотношения модели связанного пространственного стационарного динамического термоупругого деформирования [19] с циклической частотой ω для рассматриваемой плиты, обладающей однофакторной экспоненциальной поперечной неоднородностью физико-механических свойств, которая описывается компонентами матриц модулей упругости $c_{ij}(x_3)$, коэффициентов линейного теплового расширения $\alpha_{ij}(x_3)$, коэффициентов теплопроводности $k_{ij}(x_3)$, параметрами теплоемкости $\alpha(x_3)$ и плотности $\rho(x_3)$ материала, а также параметром однофакторной экспоненциальной неоднородности λ , могут быть представлены в форме

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{11}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{12}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{11}(x_3)\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{22}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{12}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{11}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{11}(x_3)\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{33}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{13}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{33}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{33}(x_3)\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{23}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{44}(x_3)(\partial_2 u_3(x_1, x_2, x_3) + \partial_3 u_2(x_1, x_2, x_3))]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{13}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{44}(x_3)(\partial_1 u_3(x_1, x_2, x_3) + \partial_3 u_1(x_1, x_2, x_3))]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{12}(x_1, x_2, x_3, t) &= [(c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2](\partial_1 u_2(x_1, x_2, x_3) + \partial_2 u_1(x_1, x_2, x_3))\exp(-i\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} c_{ij}(x_3) &= c_{ij0} \exp(\lambda x_3), \quad \alpha_{ij}(x_3) = \alpha_{ij0} \exp(\lambda x_3), \quad k_{ij}(x_3) = k_{ij0} \exp(\lambda x_3), \\ \alpha(x_3) &= \alpha_0 \exp(\lambda x_3), \quad \rho(x_3) = \rho_0 \exp(\lambda x_3), \quad \partial_j = \partial / \partial x_j. \end{aligned} \quad (3)$$

Система разрешающих уравнений относительно амплитудных составляющих $u_j(x_1, x_2, x_3)$ в представлениях динамических упругих перемещений $u_j(x_1, x_2, x_3)\exp(-i\omega t)$ и амплитудной составляющей $\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3)$ для температурной функции $\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3)\exp(-i\omega t)$, имеет вид

$$\begin{aligned} &[c_{11}(x_3)\partial_1^2 + (c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2]\partial_2^2 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_1(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [(c_{11}(x_3) + c_{12}(x_3))/2]\partial_1\partial_2]u_2(x_1, x_2, x_3) + [c_{13}(x_3)\partial_1\partial_3 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_1)]u_3(x_1, x_2, x_3) - \\ &\quad - [\alpha_{11}(x_3)\partial_1]\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) = 0, \\ &[(c_{11}(x_3) + c_{12}(x_3))/2]\partial_1\partial_2]u_1(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [(c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2]\partial_1^2 + c_{11}(x_3)\partial_2^2 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_2(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad + [c_{13}(x_3)\partial_2\partial_3 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_2)]u_3(x_1, x_2, x_3) - [\alpha_{11}(x_3)\partial_2]\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) = 0, \\ &[(c_{44}(x_3)\partial_1\partial_3 + \partial_3(c_{13}(x_3)\partial_1)]u_1(x_1, x_2, x_3) + [c_{44}(x_3)\partial_2\partial_3 + \partial_3(c_{13}(x_3)\partial_2)]u_2(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [c_{44}(x_3)\partial_3^2 + c_{44}(x_3)\partial_2^2 + \partial_3(c_{33}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_3(x_1, x_2, x_3) - [\partial_3\alpha_{11}(x_3)]\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) = 0, \\ &[i\omega\alpha_{11}(x_3)\partial_1]u_1(x_1, x_2, x_3) + [i\omega\alpha_{11}(x_3)\partial_2]u_2(x_1, x_2, x_3) + [i\omega\alpha_{33}(x_3)\partial_3]u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad + [T_0^{-1}(k_{11}(x_3)(\partial_1^2 + \partial_2^2) + \partial_3(k_{33}(x_3)\partial_3)) + i\omega\alpha(x_3)]\mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

На форму и порядок связности срединной плоскости плиты S в процессе построения элементарных базисных однородных решений ограничения не накладываются. На плоских гранях плиты $\Gamma_0 = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = 0\}$ и $\Gamma_1 = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = h\}$ в рассматриваемой модели в различных сочетаниях задаются механические краевые условия свободной от усилий поверхности $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, жестко закрепленной поверхности $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, фиксируемой поверхности с проскальзыванием в плоскости $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, либо поверхности с абсолютно гибким нерастяжимым безинерционным тонким покрытием $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, а для краевые условия для температурной компоненты связанного термомеханического деформирования – условие теплоизолированной поверхности $(\partial_3 \vartheta)_{\Gamma_j} = 0$, условие свободного теплообмена $(\vartheta + \eta \partial_3 \vartheta)_{\Gamma_j} = 0$, либо условие поддержания на поверхности заданной температуры $(\vartheta)_{\Gamma_j} = \vartheta^*$.

Получение представлений для базисных элементарных однородных решений. Для получения представлений базисных элементарных однородных решений применяется полуобратный метод [8, 12]. С использованием исходного представления амплитудных составляющих для базисных однородных решений потенциального типа

$$u_1(x_1, x_2, x_3) = \partial_1 \Phi(x_1, x_2) \varphi_1(x_3), \quad u_2(x_1, x_2, x_3) = \partial_2 \Phi(x_1, x_2) \varphi_1(x_3), \quad u_3(x_1, x_2, x_3) = \Phi(x_1, x_2) \varphi_2(x_3), \\ \vartheta(x_1, x_2, x_3) = \Phi(x_1, x_2) \varphi_3(x_3), \quad D^2 \Phi(x_1, x_2) + \gamma^2 \Phi(x_1, x_2) = 0, \quad (5)$$

и с учетом представлений (3), система разрешающих уравнений (4) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами относительно функций $\varphi_j(x_3)$ ($j=1, 3$)

$$c_{440} \varphi_1''(x_3) + \lambda c_{440} \varphi_1'(x_3) + (\rho_0 \omega^2 - c_{110} \gamma^2) \varphi_1(x_3) + (c_{130} + c_{440}) \varphi_2'(x_3) + \lambda c_{440} \varphi_2(x_3) - \alpha_{110} \varphi_3(x_3) = 0, \quad (6) \\ - (c_{130} + c_{440}) \gamma^2 \varphi_1'(x_3) - c_{130} \lambda \gamma^2 \varphi_1(x_3) + c_{330} \varphi_2''(x_3) + c_{330} \lambda \varphi_2'(x_3) + (\rho_0 \omega^2 - c_{440} \gamma^2) \varphi_2(x_3) - \\ - \alpha_{330} \varphi_3'(x_3) - \alpha_{330} \lambda \varphi_3(x_3) = 0, \\ - i \omega \alpha_{110} \gamma^2 \varphi_1(x_3) + i \omega \alpha_{330} \varphi_2'(x_3) + T_0^{-1} k_{330} \varphi_3''(x_3) + T_0^{-1} k_{330} \lambda \varphi_3'(x_3) + (i \omega \alpha_0 - T_0^{-1} k_{110} \gamma^2) \varphi_3(x_3) = 0. \quad (6)$$

Предварительно преобразуя (6) к виду (7)

$$a_{11} \varphi_1''(x_3) + b_{11} \varphi_1'(x_3) + c_{11} \varphi_1(x_3) + b_{12} \varphi_2'(x_3) + c_{12} \varphi_2(x_3) + c_{13} \varphi_3(x_3) = 0, \\ b_{21} \varphi_1'(x_3) + c_{21} \varphi_1(x_3) + a_{22} \varphi_2''(x_3) + b_{22} \varphi_2'(x_3) + c_{22} \varphi_2(x_3) + b_{23} \varphi_3'(x_3) + c_{23} \varphi_3(x_3) = 0, \\ c_{31} \varphi_1(x_3) + b_{32} \varphi_2'(x_3) + a_{33} \varphi_3''(x_3) + b_{33} \varphi_3'(x_3) + c_{33} \varphi_3(x_3) = 0, \quad (7)$$

где

$$a_{11} = c_{440}, \quad b_{11} = \lambda c_{440}, \quad c_{11} = (\rho_0 \omega^2 - c_{110} \gamma^2), \quad b_{12} = (c_{130} + c_{440}), \quad c_{12} = \lambda c_{440}, \quad c_{13} = -\alpha_{110}, \\ b_{21} = -(c_{130} + c_{440}) \gamma^2, \quad c_{21} = -c_{130} \lambda \gamma^2, \quad a_{22} = c_{330}, \quad b_{22} = c_{330} \lambda, \\ c_{22} = (\rho_0 \omega^2 - c_{440} \gamma^2) \varphi_2(x_3), \quad b_{23} = -\alpha_{330}, \quad c_{23} = -\alpha_{330} \lambda, \\ c_{31} = -i \omega \alpha_{110} \gamma^2, \quad b_{32} = i \omega \alpha_{330}, \quad a_{33} = T_0^{-1} k_{330}, \quad b_{33} = T_0^{-1} k_{330} \lambda, \quad c_{33} = (i \omega \alpha_0 - T_0^{-1} k_{110} \gamma^2), \quad (8)$$

и применяя для решения (7) метод Эйлера, можно получить полиномиальное характеристическое уравнение для системы (7)

$$\mu_6 p^6 + \mu_5 p^5 + \mu_4 p^4 + \mu_3 p^3 + \mu_2 p^2 + \mu_1 p + \mu_0 = 0, \quad (9)$$

в котором

$$\begin{aligned}
 \mu_6 &= a_{11}a_{22}a_{33}, \quad \mu_5 = a_{22}a_{33}b_{11} + a_{11}a_{33}b_{22} + a_{11}a_{22}b_{33}, \\
 \mu_4 &= a_{11}a_{22}c_{33} + a_{11}a_{33}c_{22} + a_{22}a_{33}c_{11} + a_{11}b_{22}b_{33} + a_{22}b_{11}b_{33} - a_{11}b_{23}b_{32} + a_{33}b_{11}b_{22} - a_{33}b_{12}b_{21}, \\
 \mu_3 &= a_{11}b_{22}c_{33} + a_{22}b_{11}c_{33} - a_{11}b_{32}c_{23} + a_{11}b_{33}c_{22} + a_{33}b_{11}c_{22} - a_{33}b_{21}c_{12} + a_{22}b_{33}c_{11} + a_{33}b_{22}c_{11} + \\
 &\quad + b_{11}b_{22}b_{33} - b_{12}b_{21}b_{33} - b_{11}b_{23}b_{32}, \\
 \mu_2 &= a_{11}c_{22}c_{33} + a_{22}c_{11}c_{33} + b_{11}b_{22}c_{33} - b_{12}b_{21}c_{33} - a_{22}c_{13}c_{31} + b_{12}b_{23}c_{31} - b_{11}b_{32}c_{23} + a_{33}c_{11}c_{22} + b_{11}b_{33}c_{22} + b_{21}b_{32}c_{13} - \\
 &\quad - b_{21}b_{33}c_{12} + b_{22}b_{33}c_{11} - b_{23}b_{32}c_{11}, \\
 \mu_1 &= b_{11}c_{22}c_{33} - b_{21}c_{12}c_{33} + b_{22}c_{11}c_{33} + b_{12}c_{23}c_{31} - b_{22}c_{13}c_{31} + b_{23}c_{12}c_{31} - b_{32}c_{11}c_{23} + b_{33}c_{11}c_{22}, \\
 \mu_0 &= c_{11}c_{22}c_{33} + c_{12}c_{23}c_{31} - c_{13}c_{22}c_{31}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

При введении обозначений $\{p_j\}_{j=1}^6$ для корней (10), решение системы (7) может быть записано в виде

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(x_3) &= \tau_1 Q_1 e^{p_1 x_3} + \tau_2 Q_2 e^{p_2 x_3} + \tau_3 Q_3 e^{p_3 x_3} + \tau_4 Q_4 e^{p_4 x_3} + \tau_5 Q_5 e^{p_5 x_3} + \tau_6 Q_6 e^{p_6 x_3}, \\
 \varphi_2(x_3) &= \eta_1 Q_1 e^{p_1 x_3} + \eta_2 Q_2 e^{p_2 x_3} + \eta_3 Q_3 e^{p_3 x_3} + \eta_4 Q_4 e^{p_4 x_3} + \eta_5 Q_5 e^{p_5 x_3} + \eta_6 Q_6 e^{p_6 x_3}, \\
 \varphi_3(x_3) &= \zeta_1 Q_1 e^{p_1 x_3} + \zeta_2 Q_2 e^{p_2 x_3} + \zeta_3 Q_3 e^{p_3 x_3} + \zeta_4 Q_4 e^{p_4 x_3} + \zeta_5 Q_5 e^{p_5 x_3} + \zeta_6 Q_6 e^{p_6 x_3},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где

$$\begin{aligned}
 \tau_j &= a_{22}a_{33}p_j^4 + (a_{22}b_{33} + a_{33}b_{22})p_j^3 + (a_{22}c_{33} + a_{33}c_{22} + b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32})p_j^2 + \\
 &\quad + (b_{33}c_{22} - b_{32}c_{23} + b_{22}c_{33})p_j + c_{22}c_{33}, \\
 \eta_j &= -a_{33}b_{21}p_j^3 - b_{21}b_{33}p_j^2 + (b_{21}c_{33} - b_{23}c_{31})p_j + c_{23}c_{31}, \\
 \zeta_j &= (b_{21}b_{32} - a_{22}c_{31})p_j^2 - b_{22}c_{31}p_j - c_{22}c_{31}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Трансцендентное дисперсионное уравнение для определения множества значений спектрального параметра γ для рассматриваемой задачи является следствием из граничных условий на плоских гранях плиты при конкретных вариантах их задания, и записывается как условие равенства нулю функционального определителя однородной системы линейных алгебраических уравнений относительно неопределенных постоянных коэффициентов Q_j . В частности, для плиты со свободными от напряжений теплоизолированными гранями Γ_0 и Γ_1 следствием краевых условий является система относительно Q_j вида

$$\begin{aligned}
 (p_1\tau_1 + \zeta_1)Q_1 + (p_2\tau_2 + \zeta_2)Q_2 + (p_3\tau_3 + \zeta_3)Q_3 + (p_4\tau_4 + \zeta_4)Q_4 + (p_5\tau_5 + \zeta_5)Q_5 + (p_6\tau_6 + \zeta_6)Q_6 &= 0, \\
 (p_1\tau_1 + \zeta_1)Q_1 e^{p_1 h} + (p_2\tau_2 + \zeta_2)Q_2 e^{p_2 h} + (p_3\tau_3 + \zeta_3)Q_3 e^{p_3 h} + \\
 + (p_4\tau_4 + \zeta_4)Q_4 e^{p_4 h} + (p_5\tau_5 + \zeta_5)Q_5 e^{p_5 h} + (p_6\tau_6 + \zeta_6)Q_6 e^{p_6 h} &= 0, \\
 (-c_{130}\gamma^2\tau_1 + c_{330}p_1\eta_1 - \alpha_{330}\zeta_1)Q_1 + (-c_{130}\gamma^2\tau_2 + c_{330}p_2\eta_2 - \alpha_{330}\zeta_2)Q_2 + \\
 + (-c_{130}\gamma^2\tau_3 + c_{330}p_3\eta_3 - \alpha_{330}\zeta_3)Q_3 + (-c_{130}\gamma^2\tau_4 + c_{330}p_4\eta_4 - \alpha_{330}\zeta_4)Q_4 + \\
 + (-c_{130}\gamma^2\tau_5 + c_{330}p_5\eta_5 - \alpha_{330}\zeta_5)Q_5 + (-c_{130}\gamma^2\tau_6 + c_{330}p_6\eta_6 - \alpha_{330}\zeta_6)Q_6 &= 0, \\
 (-c_{130}\gamma^2\tau_1 + c_{330}p_1\eta_1 - \alpha_{330}\zeta_1)Q_1 e^{p_1 h} + (-c_{130}\gamma^2\tau_2 + c_{330}p_2\eta_2 - \alpha_{330}\zeta_2)Q_2 e^{p_2 h} + \\
 + (-c_{130}\gamma^2\tau_3 + c_{330}p_3\eta_3 - \alpha_{330}\zeta_3)Q_3 e^{p_3 h} + (-c_{130}\gamma^2\tau_4 + c_{330}p_4\eta_4 - \alpha_{330}\zeta_4)Q_4 e^{p_4 h} + \\
 + (-c_{130}\gamma^2\tau_5 + c_{330}p_5\eta_5 - \alpha_{330}\zeta_5)Q_5 e^{p_5 h} + (-c_{130}\gamma^2\tau_6 + c_{330}p_6\eta_6 - \alpha_{330}\zeta_6)Q_6 e^{p_6 h} &= 0,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & p_1 \zeta_1 Q_1 + p_2 \zeta_2 Q_2 + p_3 \zeta_3 Q_3 + p_4 \zeta_4 Q_4 + p_5 \zeta_5 Q_5 + p_6 \zeta_6 Q_6 = 0, \\
 & p_1 \zeta_1 Q_1 e^{p_1 h} + p_2 \zeta_2 Q_2 e^{p_2 h} + p_3 \zeta_3 Q_3 e^{p_3 h} + p_4 \zeta_4 Q_4 e^{p_4 h} + p_5 \zeta_5 Q_5 e^{p_5 h} + p_6 \zeta_6 Q_6 e^{p_6 h} = 0,
 \end{aligned} \quad (13)$$

а уравнение относительно спектрального параметра γ может быть записано в форме

$$\begin{aligned}
 & F(\omega, \gamma) = \det \|\delta_{qj}\|_{q,j=1}^6, \\
 & \delta_{1j} = p_j \tau_j + \zeta_j, \quad \delta_{2j} = (p_j \tau_j + \zeta_j) e^{p_j h}, \quad \delta_{3j} = -c_{130} \gamma^2 \tau_j + c_{330} p_j \eta_j - \alpha_{330} \zeta_j, \\
 & \delta_{4j} = (-c_{130} \gamma^2 \tau_j + c_{330} p_j \eta_j - \alpha_{330} \zeta_j) e^{p_j h}, \quad \delta_{5j} = p_j \zeta_j, \quad \delta_{6j} = p_j \zeta_j e^{p_j h}.
 \end{aligned} \quad (14)$$

Для каждого значения корня γ_m из множества $\{\gamma_m\}_{m=1}^\infty$ решений уравнения (14) соответствующие величины Q_{jm} в представлениях (11) могут быть записаны в форме алгебраических дополнений Δ_{jm} к элементам j -го столбца четвертой строки матрицы $\left(\|\delta_{qj}\|_{q,j=1}^6\right)_{\gamma=\gamma_m}$, и, в итоге, выражения для отвечающих величинам γ_m элементарных базисных однородных решений потенциального типа принимают вид

$$\begin{aligned}
 & u_{1m}^{(1)}(x_1, x_2, x_3, t) = \partial_1 \Phi_m(x_1, x_2) \sum_{j=1}^6 \tau_{jm} \Delta_{jm} \exp(p_{jm} x_3 - i \omega t), \\
 & u_{2m}^{(1)}(x_1, x_2, x_3, t) = \partial_2 \Phi_m(x_1, x_2) \sum_{j=1}^6 \tau_{jm} \Delta_{jm} \exp(p_{jm} x_3 - i \omega t), \\
 & u_{3m}^{(1)}(x_1, x_2, x_3, t) = \Phi_m(x_1, x_2) \sum_{j=1}^6 \eta_{jm} \Delta_{jm} \exp(p_{jm} x_3 - i \omega t), \\
 & \mathcal{G}_m^{(1)}(x_1, x_2, x_3, t) = \Phi_m(x_1, x_2) \sum_{j=1}^6 \zeta_{jm} \Delta_{jm} \exp(p_{jm} x_3 - i \omega t).
 \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Phi_m(x_1, x_2)$ – метагармонические функции, определяемые из уравнений

$$D^2 \Phi_m(x_1, x_2) + \gamma_m^2 \Phi_m(x_1, x_2) = 0 \quad (16)$$

соответственно виду области S , занимаемой срединной плоскостью плиты.

Далее, на основе исходного представления амплитудных составляющих в базисных однородных решениях вихревого типа

$$\begin{aligned}
 & u_1(x_1, x_2, x_3) = \partial_2 \Psi(x_1, x_2) \chi(x_3), \quad u_2(x_1, x_2, x_3) = -\partial_1 \Psi(x_1, x_2) \chi(x_3), \\
 & u_3(x_1, x_2, x_3) \equiv 0, \quad \mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) \equiv 0, \quad D^2 \Psi(x_1, x_2) + \beta^2 \Psi(x_1, x_2) = 0,
 \end{aligned} \quad (17)$$

устанавливается, что следствием подстановки выражений (17) в систему уравнений (4) с учетом представлений (3) в данном случае является обыкновенное дифференциальное уравнение

$$c_{440} \chi''(x_3) + \lambda c_{440} \chi'(x_3) + (\rho_0 \omega^2 - ((c_{110} - c_{120})/2) \beta^2) \chi(x_3) = 0 \quad (18)$$

с решениями вида

$$\begin{aligned}
 & \chi(x_3) = U_1 e^{s_1 x_3} + U_2 e^{s_2 x_3}, \\
 & s_j = (-\lambda c_{440} + (-1)^j (\lambda^2 c_{440}^2 - 4 c_{440} (\rho_0 \omega^2 - ((c_{110} - c_{120})/2) \beta^2))^{1/2}) / (2 c_{440}) \quad (j = \overline{1, 2}).
 \end{aligned}$$

Базисные однородные решения вихревого типа описывают, тем самым, случай осциллирующего динамического напряженного состояния плиты, при котором механические деформации не генерируют тепловые поля и наоборот.

Трансцендентное дисперсионное уравнение относительно множества значений спектрального параметра β базисных однородных решений вихревого типа в частном случае плиты со свободными от напряжений теплоизолированными гранями имеет вид

$$G(\omega, \beta) = s_1 s_2 (e^{s_2} - e^{s_1}) = 0,$$

а отвечающие значениям его корней β_m элементарные базисные частные решения вихревого типа могут быть записаны в форме

$$\begin{aligned} u_{1m}^{(2)}(x_1, x_2, x_3) &= \partial_2 \Psi_m(x_1, x_2) (s_{2m} e^{s_{2m} x_3} - s_{1m} e^{s_{1m} x_3}), \\ u_{2m}^{(2)}(x_1, x_2, x_3) &= -\partial_1 \Psi_m(x_1, x_2) (s_{2m} e^{s_{2m} x_3} - s_{1m} e^{s_{1m} x_3}), \\ u_{3m}^{(2)}(x_1, x_2, x_3) &= \mathcal{G}_m^{(2)}(x_1, x_2, x_3, t) = 0, \quad D^2 \Psi_m(x_1, x_2) + \beta_m^2 \Psi_m(x_1, x_2) = 0. \end{aligned}$$

Заключение. Результатом представленных в работе исследований является получение аналитических представлений для элементарных базисных однородных решений в модели термоупругого пространственного стационарного динамического деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит с однофакторной экспоненциальной неоднородностью физико-механических свойств по толщине. Для частного случая плиты со свободными теплоизолированными плоскими гранями дано описание дисперсионных уравнений относительно значений спектральных параметров, определяющих конкретные элементарные базисные однородные решения потенциального или вихревого типа. Результаты представленных исследований являются основой для получения решений различных классов задач о термоупругом стационарном динамическом деформировании различной конфигурации.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400353-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопов В.К. Однородные решения теории упругости и их приложение к теории тонких пластинок / В.К. Прокопов // Труды II Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. – М.: Наука, 1966. – С. 253–259.
2. Прокопов В.К. Обзор работ по однородным решениям теории упругости и их приложениям / В.К. Прокопов // Труды ЛПИ. – 1967. – № 279. – С. 31–46.
3. Ворович И.И. О базисных свойствах одной системы однородных решений / И.И. Ворович, В.Е. Ковальчук // Прикладная математика и механика. – 1967. – Т. 31, вып. 5. – С. 861–869.
4. Устинов Ю.А. О полноте системы однородных решений теории плит / Ю.А. Устинов // Прикладная математика и механика. – 1976. – Т. 40, вып. 3. – С. 236–243.
5. Журавская О.А. Однородные решения в задачах изгиба ортотропной пластины / О.А. Журавская, Н.И. Наумова // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1976. – № 4. – С. 48–51.
6. Зильберглейт А.С. Обобщенная ортогональность однородных решений в динамических задачах теории упругости / А.С. Зильберглейт, Б.М. Нулер // ДАН СССР. – 1977. – Т. 234, № 2. – С. 333.
7. Гринченко, В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
8. Космодамианский А.С. Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред / А.С. Космодамианский, В.И. Сторожев. – К.: Наук. думка, 1985. – 176 с.
9. Нескородев Н.М. Построение однородных решений трехмерных задач теории упругости для ортотропного тела / Н.М. Нескородев // Теорет. и прикладная механика. – 1986. – Вып. 17. – С. 3–7.
10. Лурье С.А. Обобщенный метод однородных решений в прикладных задачах теории плит и оболочек с оператором разрешающего уравнения порядка $2n$ / С.А. Лурье // Механика композиционных материалов и конструкций. РАН. – 1996. – Т. 2, № 3. – С. 58–70.
11. Упругие волноводы: история и современность / В.В. Мелешко, А.А. Бондаренко, С.А. Довгий и др. // Математические методы и физико-механические поля. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 86–104.
12. Алтухов Е.В. Равновесие и установившиеся колебания изотропных пластин / Е.В. Алтухов, М.В. Фоменко. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2014. – 436 с.

13. Алтухов Е.В. Однородные решения краевых задач трехмерной теории упругости изотропных тел. Однородные плиты / Е.В. Алтухов, М.В. Фоменко // Вестник ДонНУ. Сер. А.: Естественные науки. – 2017. – № 3. – С. 34–79.
14. Жаворонок С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 1 / С.И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 227–260. – DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.02.227_260.06.
15. Жаворонок С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 2 / С.И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 36–86. – DOI: 10.33113/mkmk.ras.2022.28.01.036_086.03.
16. Birman V. Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures / V. Birman, L.W. Byrd // Appl. Mech. Rev. – 2007. – Vol. 60, No 5. – P. 195–216.
17. A review of functionally gradient materials (FGM's) and their applications / V. Bhavar, P. Kattire, S. Patil, R.K.P. Singh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. – 012021.
18. State of the art in functionally graded materials / V. Boggarapu, R. Gujjala, S. Ojha et al. // Composite Structures. – 2021. – Vol. 262. – Article No 113596. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113596.
19. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1970. – 256 с.

Поступила в редакцию 30.04.2025 г.

HOMOGENEOUS SOLUTIONS FOR A ONE-FACTOR MODEL OF VOLUME DYNAMIC THERMOELASTIC DEFORMATION OF FUNCTIONAL-GRADIENT TRANSVERSAL-ISOTROPIC PLATES

V. I. Storozhev, S. V. Storozhev, M. V. Fomenko

A solution to the problem of constructing a system of basic homogeneous solutions for a model of coupled spatial thermoelastic stationary dynamic deformation of functionally graded transversely isotropic slabs made of materials with one-factor exponential heterogeneity of physical and mechanical characteristics across the thickness is obtained. Analytical representations of homogeneous solutions are found using the semi-inverse method.

Keywords: plates of volume slabs of spatial geometry, plates of volume geometry, transversely isotropic functionally graded materials, one-factor exponential transverse heterogeneity, coupled stationary thermomechanical deformation, basic homogeneous solutions, analytical representations, semi-inverse method.

Сторожев Валерий Иванович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: stvistvi@mail.ru
ORCID: 0009-0006-8448-4963
Author ID: 1051802

Storozhev Valeriy Ivanovch

Doctor of Technical Science, Professor, Chief Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Сторожев Сергей Валериевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специализированных информационных технологий и систем строительного факультета ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, ДНР, РФ.
E-mail: s.v.storozhev@donnasa.ru
ORCID: 0000-0002-4198-3491
Author ID: 1099797

Storozhev Sergey Valerievich

Doctor of Technical Science, Docent, Professor at the Chair of Specialized Information Technologies and Systems, Faculty of Civil Engineering, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, DPR, RF.

Фоменко Максим Владимирович

кандидат физико-математических наук, ученый секретарь научно-исследовательской части, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: maxim_fom@mail.ru
ORCID: 0009-0003-9649-1827
Author ID: 1034058

Fomenko Maksim Vladimirovich

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Scientific Secretary of the Research Department, Senior Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Х И М И Ч Е С К И Е Н А У К И

УДК 544.43:547.565

DOI: 10.5281/zenodo.15575905

EDN: EQERBJ

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ НА АНТИРАДИКАЛЬНОЕ
ДЕЙСТВИЕ БИНАРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ КВЕРЦЕТИНА
С ОЛИГОСАХАРИДАМИ**© 2025. *Н. И. Белая, А. В. Белый, В. А. Конайленко*

Методом ЯМР- и УФ-спектроскопии установлено, что образование нековалентных модификаций олигосахаридов с кверцетином в растворе приводит не только к росту антирадикальной активности углеводов, но и к повышению эффективности кверцетина как антиоксиданта. Наиболее высокие синергические эффекты характерны для бинарных композиций кверцетина с мальтотриозой и мелицитозой при соотношении $\text{ArOH} - \text{Sacch}$ как 70:30 % (с суммарной концентрацией компонентов в растворе $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л) в реакции с 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразилом в этаноле при 298 ± 2 К. На примере сахаридов с одинаковыми углеводными остатками показано, что эффект синергизма возрастает в ряду моно-, ди- и трисахаридов, а дальнейшее увеличение молекулярной массы не способствует повышению антирадикального синергического эффекта смеси.

Ключевые слова: кверцетин, олигосахарид, антиоксидант, синергизм, радикал.

Введение. Одним из распространенных способов получения полимерных соединений пролонгированного действия для фармацевтической, пищевой и агрохимической промышленности является присоединение к природным полимерам низкомолекулярных веществ [1, 2]. В этом плане наиболее привлекательным и актуальным направлением является модификация олиго- и полисахаридов путем введения в их структуру природных фенольных соединений с высокой антиоксидантной активностью [3, 4]. При этом наиболее часто функционализация полисахаридов фенолами и их производными проводится за счет образования ковалентных конъюгатов с последующим выделением комплекса в индивидуальном виде [5, 6]. Для этого необходимо либо использовать в качестве связующих агентов водорастворимые карбодиимиды, либо проводить синтез в течение длительного времени при повышенных температурах [7, 8]. Такой подход, безусловно, приводит к расширению функциональности полисахарида, поскольку образующиеся комплексы проявляют антиоксидантную активность выше, чем у углеводов, но по сравнению с исходным фенольным антиоксидантом она либо не изменяется, либо понижается. Причина заключается в том, что ковалентная модификация полисахаридов фенолами приводит, как правило, к окислительной деструкции активного фенольного компонента или к чрезмерному связыванию функциональных групп, ответственных за антиоксидантную и антирадикальную активность вещества. В данной работе авторы предлагают получать нековалентно-связанные полисахариды в композиции с растительными фенолами путем физического смешения растворов при комнатной температуре без выделения из раствора образующегося углевод-фенольного конъюгата.

Цель данной работы – исследование влияния процессов комплексообразования на реакционную способность бинарных композиций кверцетина (ArOH) с олигосахаридами (Sacch) при взаимодействии с радикалом 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразилом ($\text{DPPH}^\bullet$) в этаноле при 298 ± 2 К.

Методика эксперимента. В качестве объектов исследования использовали олигосахариды с двумя, тремя и четырьмя углеводными остатками (мальтоза, лактоза, сахароза, мальтотриоза, мелицитоза, рафиноза и стахиоза (Acros Organics, Бельгия; Panreac, Испания)) в композиции с растительным флавоноидом кверцетином (Aldrich-Sigma, США). Реакционную способность олигосахаридов сравнивали с моносахаридами (глюкоза, галактоза, арабиноза и фруктоза) (Acros Organics, Бельгия) и полисахаридами открыто-цепного строения – декстрином (Acros Organics, Бельгия) и арабиногалактаном (Робиос, Россия). Свободный стабильный радикал 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразил (Aldrich-Sigma, США) применяли как наиболее широко используемый реагент для тестирования антирадикальной активности веществ [9]. Для исследования процесса комплексообразования бинарные композиции олиго- и полисахаридов с кверцетином готовили путем физического смешения растворов исходных компонентов при 298 ± 2 К с последующим выдерживанием смеси в течение 40 минут с периодическим перемешиванием.

Процесс комплексообразования между сахарами и кверцетином исследовали методом ЯМР-спектроскопии на спектрометре Bruker Avance-II-400 (Bruker, Германия) с рабочей частотой 400 МГц при 298 ± 2 К. Спектры ЯМР ^1H регистрировали в $\text{CCl}_4\text{:DMCO-}d_6$ (70:30 об. %). Добавка $\text{DMCO-}d_6$ способствовала повышению растворимости реагентов в композиции $\text{ArOH} - \text{Sacch}$. Для снижения процесса самоассоциации кверцетина с углеводами смешивали в соотношении 1:20.

Методом разностной УФ-спектроскопии на спектрофлуориметре Solar CM 2203 (Беларусь) определяли стехиометрию и константу устойчивости образующихся комплексов при условии фиксированной концентрации кверцетина ($1,2 \cdot 10^{-5}$ моль/л) и переменной концентрации олигосахаридов ($10^{-3} - 10^{-2}$ моль/л) в композиции. Контролировали изменение оптической плотности раствора ArOH в зависимости от концентрации Sacch . Эксперимент проводили при температуре 293 ± 2 К в солянокислом буфере с pH 2 для предотвращения процесса диссоциации кверцетина. Время выдержки раствора ArOH с Sacch составляло 40 минут.

Реакции $\text{DPPH}^\bullet$ с кверцетином и его бинарными композициями с сахарами проводили в этаноле. Кинетику реакций исследовали на спектрофлуориметре Solar CM 2203 (Беларусь) в термостатируемой ячейке со встроенной магнитной мешалкой при 293 ± 2 К. Композиции $\text{ArOH} - \text{Sacch}$ в разных соотношениях растворяли в этаноле, выдерживали в течение 40 минут, а затем аликвоту этого раствора вводили в раствор $\text{DPPH}^\bullet$ в этаноле. Суммарная концентрация смеси $\text{ArOH} - \text{Sacch}$ в растворе составляла $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л, а радикала $\text{DPPH}^\bullet - 1,23 \cdot 10^{-2}$ г/л. Затем измеряли оптическую плотность раствора (с интервалом 1–2 секунды) и с помощью молярного коэффициента светопоглощения ($\epsilon_{\text{этанол}} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$) по закону Бугера–Ламберта–Бера рассчитывали концентрацию радикала. Кинетический эксперимент повторяли не менее 3 раз. Для обработки полученных данных использовали специализированное программное обеспечение по управлению спектрофлуориметром Solar CM 2203 (Беларусь).

Анализ результатов. Методом ЯМР-спектроскопии подтверждено образование водородносвязанных комплексов в бинарных смесях $\text{Sacch} - \text{ArOH}$. Показано, что в диапазоне 7,10–12,20 м.д. находятся сигналы протонов гидроксигрупп кверцетина, а для углеводов соответствующие сигналы расположены в области меньших химических сдвигов, что значительно упрощает анализ спектров смесей фенола с сахарами. На примере композиции кверцетина с мальтозой показано (рис. 1, б), что добавка дисахарида к флавоноиду приводит к смещению пиков фенола при 12,01, 8,85 и 7,21 м.д. в более слабое поле по сравнению с индивидуальным веществом (рис. 1, а). Это является характерной особенностью О–Н-групп, связанных водородной связью [10].

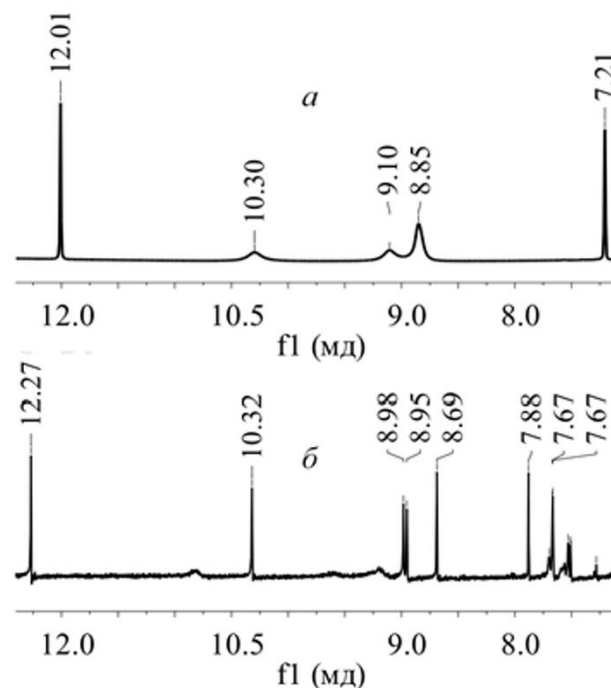


Рис. 1. ^1H ЯМР-спектры кверцетина (а) ($0,01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) и смеси $0,01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ кверцетина с $0,2 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ мальтозы (б). Растворитель – CCl_4 – DMCO-d_6 (90:10 об. %). $T = 298 \text{ K}$.

Об образовании комплекса судили также и по изменениям в УФ-спектрах поглощения кверцетина при добавлении олигосахарида. Установлено (рис. 2), что характеристический спектр кверцетина имеет две полосы поглощения при 257–256 нм и 369–370 нм. На примере рафинозы показано, что при добавлении трисахарида в спектрах растворов кверцетина появляется новый пик в области при 269–272 нм, что свидетельствует об образовании комплексного соединения. С увеличением концентрации дисахарида в смеси его интенсивность возрастает.

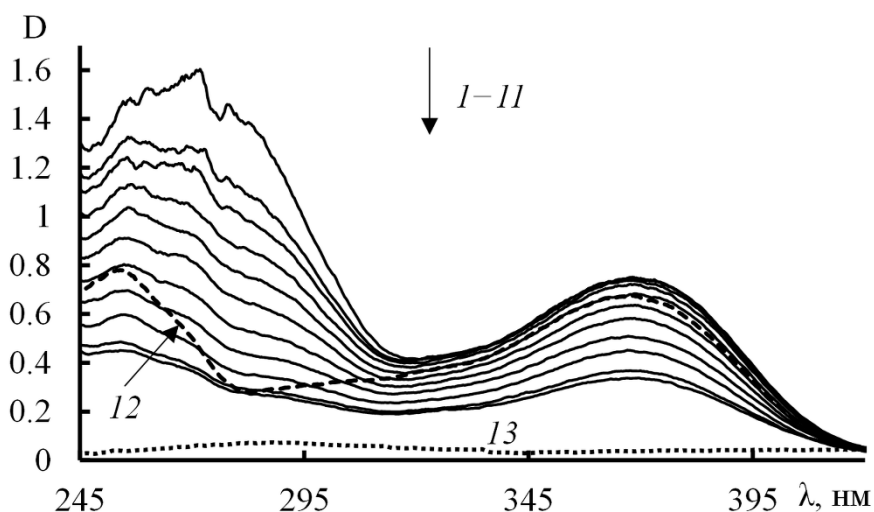


Рис. 2. УФ-спектры поглощения кверцетина ($4 \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) (12), рафинозы ($5 \cdot 10^{-2} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) (13) и смеси кверцетина ($4 \cdot 10^{-5} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) с рафинозой при концентрации: 1 – $5 \cdot 10^{-2}$; 2 – $4 \cdot 10^{-2}$; 3 – $3,5 \cdot 10^{-2}$; 4 – $3 \cdot 10^{-2}$; 5 – $2,5 \cdot 10^{-2}$; 6 – $2 \cdot 10^{-2}$; 7 – $1,5 \cdot 10^{-2}$; 8 – $1 \cdot 10^{-2}$; 9 – $8 \cdot 10^{-3}$; 10 – $6 \cdot 10^{-3}$; 11 – $5 \cdot 10^{-3} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$. Растворитель – солянокислый буфер с $\text{pH} = 2$, $T = 298 \pm 2 \text{ K}$.

Стехиометрическое соотношение ассоциированных компонентов смеси вычисляли методом «насыщения» [11] в растворах с pH 2. Точка излома на кривой насыщения (рис. 3) наблюдается нечетко, что характерно для малопрочных комплексов, образующихся при физическом смешении растворов; ее величина отвечает соотношению молекул кверцетина и сахара в ассоциате как 1:1.

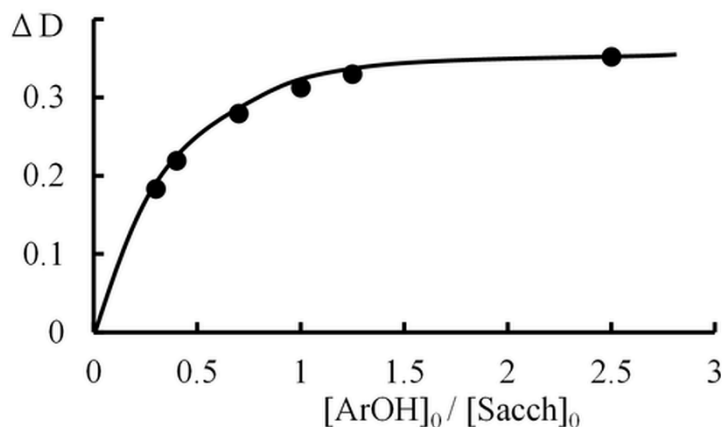


Рис. 3. Зависимость изменения оптической плотности (ΔD) раствора кверцетина ($1 \cdot 10^{-4}$ моль·л $^{-1}$) от концентраций мальтозы ($3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-5}$ моль·л $^{-1}$) в смеси. Растворитель – солянокислый буфер с pH = 2, T = 298±2 К.

Константу устойчивости комплексов $K_{уст.}$ состава 1:1 (реакция (1)) определяли методом разностной УФ-спектроскопии по изменению оптической плотности раствора ArOH с Sacch при условии фиксированной концентрации кверцетина и переменной концентрации углевода (рис. 4, а).

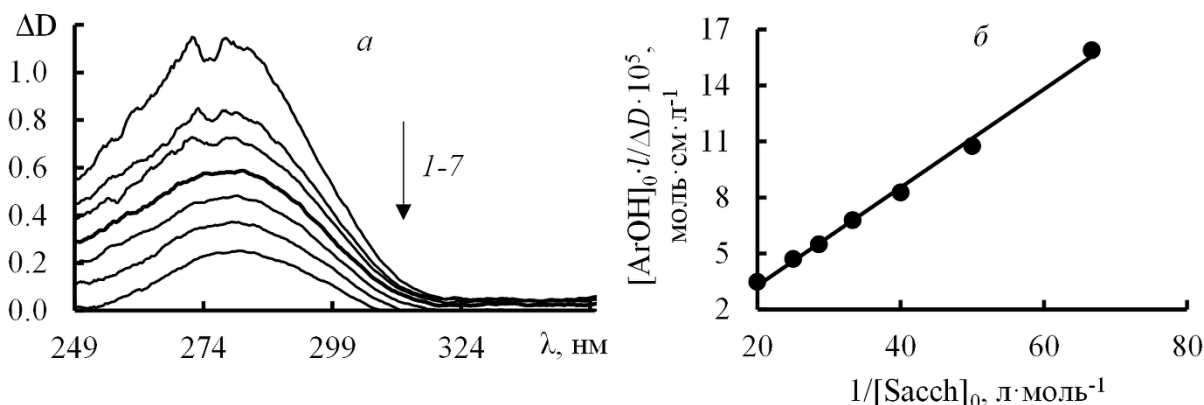
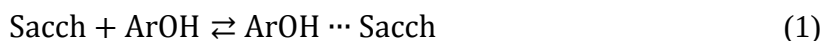


Рис. 4. а – Разностные УФ-спектры поглощения кверцетина в присутствии рафинозы при концентрации (моль·л $^{-1}$): 1 – $5 \cdot 10^{-2}$; 2 – $4 \cdot 10^{-2}$; 3 – $3,5 \cdot 10^{-2}$; 4 – $3 \cdot 10^{-2}$; 5 – $2,5 \cdot 10^{-2}$; 6 – $2 \cdot 10^{-2}$; 7 – $1,5 \cdot 10^{-2}$ моль·л $^{-1}$; б – Определение константы устойчивости $K_{уст.}$ комплексов ArOH $\cdots$ Sacch состава 1:1 в координатах уравнения Бенеша-Гильдебранда. Растворитель – солянокислый буфер с pH = 2, T = 298±2 К.

По параметрам линейной зависимости, построенной в координатах уравнения Бенеша-Гильдебранда [12, 13] (рис. 4, б), были вычислены $K_{уст.}$ комплексов кверцетина с некоторыми олигосахаридами, величины которых не превышают 10^2 л·моль $^{-1}$.

Установлено, что образование нековалентных модификаций сахаридов с кверцетином в растворе приводит не только к росту антирадикальной активности

углеводов, но и к повышению эффективности кверцетина как антиоксиданта. Методом фотоколориметрии по изменению кинетики расходования модельного гидразильного радикала в этаноле при 298 К установлено (рис. 6), что кверцетин активно дезактивирует $\text{DPPH}^\bullet$ по реакции [14, 15]:



Исследованные олиго- и полисахариды не окисляются радикалом, но при определенной концентрации в бинарной смеси с кверцетином усиливают его антирадикальное действие, проявляя функции синергиста (рис. 5).

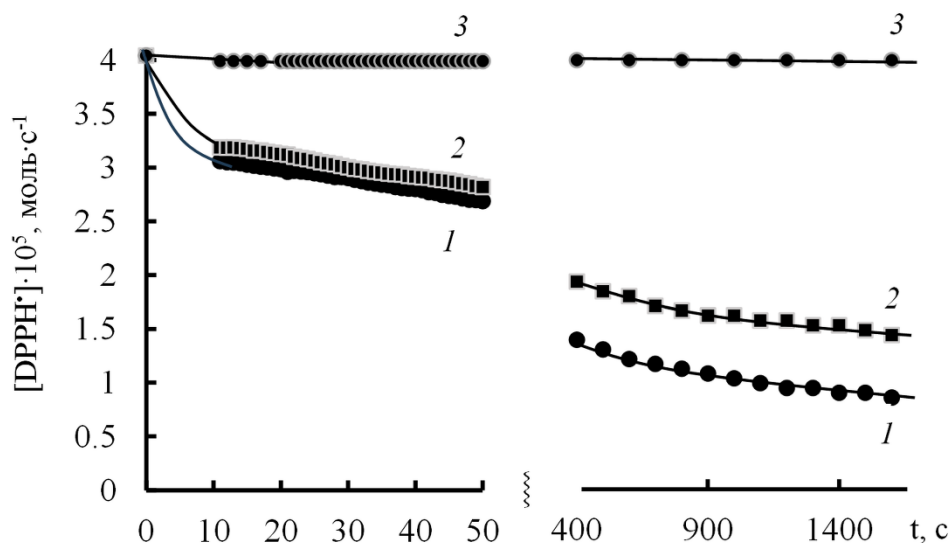


Рис. 5. Кинетические кривые расходования $\text{DPPH}^\bullet$ ($1,23 \cdot 10^{-2}$ г/л) в присутствии кверцетина ($3,33 \cdot 10^{-2}$ г/л) (1), раффинозы ($1,42 \cdot 10^{-2}$ г/л) (2) и их смеси в соотношении 70:30% с суммарной концентрацией $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л. Растворитель – этанол, $T = 298 \pm 2$ К.

В качестве характеристики антирадикальной активности соединений использовали начальную скорость реакции, которую определяли путем проведения регрессионного полиномиального анализа начальных участков кинетических кривых расходования $\text{DPPH}^\bullet$ в реакции с исследованными веществами (рис. 5).

Для отбора композиций с выраженной антирадикальной активностью варьировали соотношение кверцетина и сахаридов в широком диапазоне при постоянной суммарной концентрации смеси. Синергический эффект (SE) количественно характеризовали по усилению антирадикального действия смеси по сравнению с аддитивным действием компонентов (уравнение (3)) и по сравнению с действием кверцетина, взятым в суммарной концентрации композиции (уравнение (4)).

$$\text{SE} = ((v_{(0)\text{mix}} - v_{\text{add}})/v_{\text{add}}) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $v_{(0)\text{mix}}$ — начальная скорость реакции $\text{DPPH}^\bullet$ со смесью кверцетина и сахара, моль/(л·с); $v_{\text{add}} = v_{(0)\text{ArOH}} + v_{(0)\text{Sacch}} = v_{(0)\text{ArOH}}$ — величина начальной скорости в предположении, что действие смеси аддитивно; $v_{(0)\text{ArOH}}$ — начальная скорость реакции $\text{DPPH}^\bullet$ с кверцетином при ее молярной концентрации, взятой в смеси, моль/(л·с); $v_{(0)\text{Sacch}}$ — начальная скорость реакции $\text{DPPH}^\bullet$ с сахаридом при его молярной концентрации, взятой в смеси, моль/(л·с); SE_{max} — максимальное значение синергического эффекта смеси, %. Эффект считается зафиксированным, если $\text{SE} > 0$.

$$S = v_{(0)\text{mix}}/v_{(0)\text{ArOH}(100)}, \quad (4)$$

где $v_{(0)\text{ArOH}(100)}$ — начальная скорость реакции DPPH[•] с кверцетином при ее концентрации, равной суммарной молярной концентрации смеси, моль/(л·с). Эффект считается зафиксированным, если $S > 1$.

Изменение параметра синергического эффекта SE от состава смеси представлены в виде диаграмм (рис. 6). Показано, что наиболее выражен эффект синергизма при соотношении кверцетин–углевод в растворе как 70:30 %. При увеличении в системе доли углевода эффект синергизма снижается вплоть до появления антагонизма, причины которого предстоит выяснить в дальнейших исследованиях. Для всех изученных композиций было установлено, что изменение суммарной концентрации смеси не приводит к смещению положения максимума на диаграмме.

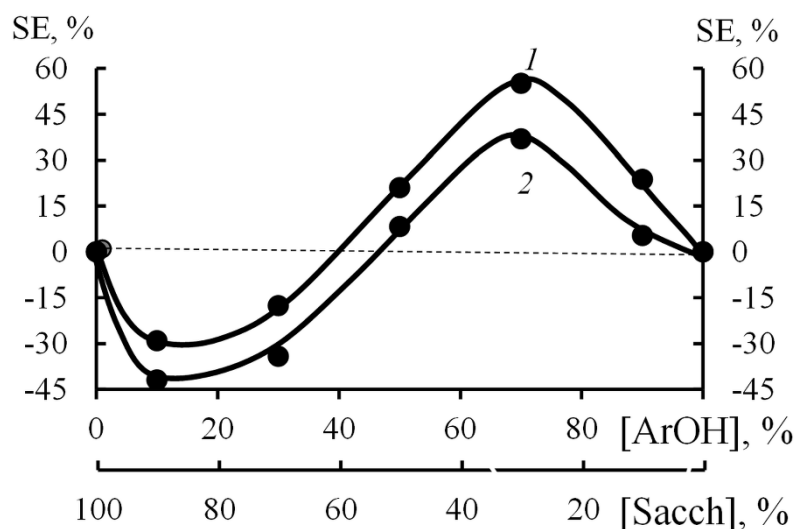


Рис. 6. Зависимость величины синергического эффекта (SE) в реакции с DPPH[•] от состава смеси: 1 – кверцетин – мальтоза (с суммарной концентрацией компонентов $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л); 2 – кверцетин – мальтоза (с суммарной концентрацией компонентов $2,3 \cdot 10^{-2}$ г/л). Растворитель – этанол, $T = 293 \pm 2$ К.

При этом второй параметр синергизма, характеризующий усиление антирадикального действия композиции по сравнению с действием кверцетина, взятого в суммарной концентрации смеси, для всех углеводов, кроме стахиозы, превышает единицу (табл. 1). Это свидетельствует об образовании в системе соединения, которым является водородносвязанный комплекс, с активностью выше, чем у кверцетина. Примечательно, что поли- и олигосахариды в композиции с кверцетином являются более эффективными синергистами, по сравнению с моносахаридами, у которых эффект сверхаддитивности не превышает 17 %.

Сравнительный анализ исследованных композиций показал (табл. 1), что наибольшие синергические эффекты характерны для смесей кверцетина с олигосахаридом – мальтотриозой и полисахаридом – декстрином. На примере сахаридов с одинаковыми углеводными (глюкозными) остатками установлено (табл. 1), что эффект синергизма возрастает в ряду моно-, ди- и трисахаридов: глюкоза < мальтоза < мальтотриоза. Дальнейшее увеличение молекулярной массы углевода у декстрина не приводит к повышению антирадикального эффекта смеси.

Таблица 1

Параметры синергического эффекта для бинарных композиций кверцетина с моно-, олиго- и полисахаридами в соотношении 70:30% (с суммарной концентрацией смеси $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л)

Композиция кверцетин – Sacch	SE, %	S
Олигосахариды		
Мальтоза	39,7±1,39	1,1
Лактоза	43±1,51	1,13
Сахароза	50,9±1,78	1,19
Мальтотриоза	81,4±2,85	1,43
Мелицитоза	59±2,01	1,25
Рафиноза	45,8±1,61	1,15
Стахиоза	25,6±0,88	0,99
Полисахариды		
Арабиногалактан	58,6±2,04	1,17
Декстрин	76±2,66	1,38
Моносахариды		
Глюкоза	17,14±0,58	1,02
Фруктоза	10,15±0,36	0,96
Арабиноза	14,4±0,51	1
Галактоза	16,07±0,56	1,01

Выводы. Таким образом, предложено получение нековалентно-модифицированных олиго- и полисахаридов в бинарных композициях с кверцетином в соотношении ArOH:Sacch как 70:30 % с суммарной концентрацией компонентов $4,75 \cdot 10^{-2}$ г/л. Нековалентные модификации представляют собой водородносвязанные комплексы углеводов с кверцетином. Реакция комплексообразования лежит в основе антирадикального синергического действия смеси и приводит к повышению функциональности как углеводного, так и флавоноидного компонентов. Полученные новые композиции кверцетина с мальтотриозой и декстрином с антирадикальным синергическим эффектом более 70 % могут быть рекомендованы для практического применения в пищевой, фармацевтической и агрохимической промышленности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400355-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Il'ina A.V. Neutralization of reactive oxygen species by chitosan and its derivatives in vitro/in vivo / A.V. Il'ina, V.P. Varlamov // Appl. Biochem. Microbiol. – 2016. – Vol. 52, No 1. – P. 1–14.
2. Antimutagenic systems based on chitosan conjugates with plant antioxidants / V.A. Alexandrova, N.S. Domnina., G.P. Snigireva // Appl. Biochem. Microbiol. – 2016. – Vol. 52, No 5. – P. 491–495.
3. Characterization of plant phenolic compounds by cyclic voltammetry / K.E. Yakovleva, S.A. Kurzeev, E.V. Stepanova, et al. // Appl. Biochem. Microbiol. – 2007. – Vol. 43, No 6. –P. 661–668.
4. Preparation, characterization, and antioxidant properties of gallic acid-grafted-chitosans / Y.-S. Cho, S.-K. Kim, C.-B. Ahn, et al. // Carbohydr. Polym. – 2011. – Vol. 83, No 4. – P. 1617–1622.
5. Synthesis of phenolic acid conjugated chitoooligosaccharides and evaluation of their antioxidant activity / T.-K. Eoma, M. Senevirathne, S.-K. Kima // Environ. Toxicol. Pharmacol. – 2012. – Vol. 34. – P. 519–527.
6. Covalent insertion of antioxidant molecules on chitosan by free radical grafting procedure / M. Curcio, F. Puoci, F. Iemma, et al. // J. Agric. Food Chem. – 2009. – Vol. 57. – P. 5933–5938.
7. B-secretase inhibitory activity of phenolic acid conjugated chitoooligosaccharides / T.K. Eom, B.M. Ryu, J.K. Lee, et al. // J. Enzyme Inhib. Med. Chem. – 2013. – Vol. 28, No 1. – P. 214–217.
8. Мударисова Р. Х. Взаимодействие арабиногалактана лиственницы сибирской с аминокислотными соединениями / Р. Х. Мударисова, Л. А. Бадыхова // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2012. – Т. 54, № 2. – С. 237–243.
9. Перевозкина М.Г. Тестирование антиоксидантной активности полифункциональных соединений кинетическими методами: монография / М.Г. Перевозкина. – Новосибирск: СибАК, 2014. – 240 с.

10. ОНУ Hydrogen Bond Geometries and NMR Chemical Shifts: From Equilibrium Structures to Geometric H/D Isotope Effects, with Applications for Water, Protonated Water, and Compressed Ice / H.H. Limbach, P.M. Tolstoy, N. Pérez-Hernández, et al. // *Isr. J. Chem.* – 2009. – Vol. 49, No 2. – P. 199–216.
11. Ельчищева Ю.Б. Спектрофотометрические методы анализа [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю.Б. Ельчищева; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023. – 188 с.
12. Applying non-parametric statistical methods to the classical measurements of inclusion complex binding constants / E.A. Almansa Lopez, J.M. Bosque-Sendra, L. Cuadros Rodríguez, et. al // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2003. – Vol. 375, No 3. – P. 414–423.
13. Preparation and study the 1:2 inclusion complex of carvedilol with β -cyclodextrin / X. Wen, F. Tan, Z. Jing, et al. // *J. Pharm. Biomed. Anal.* – 2004. – Vol. 34. – P. 517–523.
14. Эффекты сверхаддитивности композиций галловой и пара-кумаровой кислот в реакциях радикального окисления / Н.В. Михайлова, Н.И. Белая, А.В. Белый и др. // Вестник Донецкого нац. ун-та. Сер. А: Естественные науки. – 2024. – № 1. – P. 75–84.
15. Kedare S. B. Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay / S.B. Kedare, R. P. Singh. // *J. Food Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 48, No 4. – P. 412–422.

Поступила в редакцию 16.05.2025 г.

INFLUENCE OF COMPLEXATION ON THE ANTIRADICAL ACTION OF BINARY COMPOSITIONS OF QUERCETIN WITH OLIGOSACCHARIDES

N. I. Belaya, A. V. Belyi, V. A. Konailenko

Using NMR and UV spectroscopy, it was found that the formation of non-covalent modifications of oligosaccharides with quercetin in solution leads not only to an increase in the antiradical activity of carbohydrates, but also to an increase in the efficiency of quercetin as an antioxidant. The highest synergistic effects are characteristic of binary compositions of quercetin with maltotriose and melizitose at an ArOH – Sacch ratio of 70:30 % (with a total concentration of the components in solution of $4.75 \cdot 10^{-2}$ g / l) in a reaction with 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl in ethanol at 298 ± 2 K. Using saccharides with identical carbohydrate residues, it was shown that the synergistic effect increases in a series of mono-, di- and trisaccharides. A further increase in molecular weight does not contribute to the rise of the mixture antiradical synergistic effect.

Keywords: quercetin, oligosaccharide, antioxidant, synergism, radical.

Белая Наталья Ивановна

доктор химических наук, доцент;
заведующий кафедрой физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: n.iv.belaya@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3359-3239.
AuthorID: 886435

Belaya Natalya Ivanovna

Doctor of Chemical Sciences, Docent;
Head of the Department of
Physical Chemistry,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Белый Александр Владимирович

кандидат химических наук, доцент;
проректор ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: belyj@donnu.ru
ORCID: 0000-0001-6837-9211.
AuthorID: 958567

Belyi Alexandr Vladimirovich

Candidate of Chemical Sciences, Docent;
Vice-Rector of the Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Конайленко Владислав Артемович

студент по специальности Фундаментальная и
прикладная химия
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: vlad.konaylenko@gmail.com
ORCID: 0009-0007-2444-7877

Konailenko Vladislav Artemovich

student at the specialty of Fundamental and Applied
Chemistry,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

КИНЕТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИДРОКСИКОРИЧНЫХ КИСЛОТ С ЛИПО- И ГИДРОФИЛЬНЫМИ ПЕРОКСИРАДИКАЛАМИ

© 2025. *А. В. Белый, Н. В. Михайлова, Н. И. Белая, В. А. Конайленко*

Методом хемилюминесценции установлено, что в реакции с пероксирадикалами, генерируемыми при распаде липофильных и гидрофильных азосоединений, гидроксикоричные кислоты проявили разную антирадикальную активность. В жироподобных средах (бензол) их активность невелика, что связано с влиянием неполярной среды – бензола, где фенольные соединения реагируют с пероксирадикалами с невысокой скоростью по механизму отрыва атома водорода. В водной среде (фосфатный буфер с $\text{pH}=7,34$) реакционная способность соединений возрастает в разы за счет реализации в водных средах быстрого механизма переноса электрона от образующихся фенолят-ионов гидроксикоричных кислот. Зависимость реакционной способности кислот от pH среды является надежным критерием реализации в водных средах механизма электронного переноса. Установленные отличия свидетельствуют о необходимости разработки разных подходов к оценке антирадикальной активности фенолокислот в зависимости от природы стабилизируемого субстрата.

Ключевые слова: гидроксикоричная кислота, антирадикальная активность, хемилюминесценция, пероксирадикал.

Введение. Гидроксипроизводные коричной кислоты, относящиеся к группе фенилпропаноидов, широко распространены в растительном мире. Они образуются из аминокислот – фенилаланина и тирозина, играют важную роль в качестве промежуточных продуктов при биосинтезе лигнина, в растениях присутствуют как в форме сложных эфиров, так и в свободном виде. В настоящее время фенилпропаноиды являются ведущей группой биологически активных соединений, обеспечивающих адаптогенные, иммуностимулирующие, антиоксидантные и гепатопротекторные свойства лекарственных растений [1–3]. Особого внимания заслуживает их участие в утилизации активных форм кислорода, которые способны повреждать клеточные структуры в организме человека [4].

Фенилпропаноиды, несмотря на широкое распространение в растительном мире, лишь в последние годы стали предметом внимания исследователей при поиске перспективных биологически активных соединений. В химии природных соединений их целесообразно рассматривать как самостоятельный класс веществ, состоящий из групп простых фенилпропаноидов (коричные кислоты и их производные, коричные спирты и их производные, фенилпропаны и т.д.), сложных фенилпропаноидов (фенилпропаноидные гликозиды, флаволигнаны, ксантолигнаны и т.д.) и биогенетически родственных фенилпропаноидам соединений (флавоноиды, кумарины и т.д.) [5]. Перечисленные группы многочисленны и разнообразны. Для исследования их антиоксидантной и антирадикальной активностей требуется правильный подбор модельных реакций, который позволил бы объективно оценить их активность *in vitro* в средах, имитирующих как жировую фазу, так и физиологические жидкости живого организма (кровь, лимфа).

Целью данной работы является хемилюминесцентное исследование реакции взаимодействия гидроксикоричных кислот (ArOH) с пероксирадикалами, моделирующими активные формы кислорода в жировой и водной фазах.

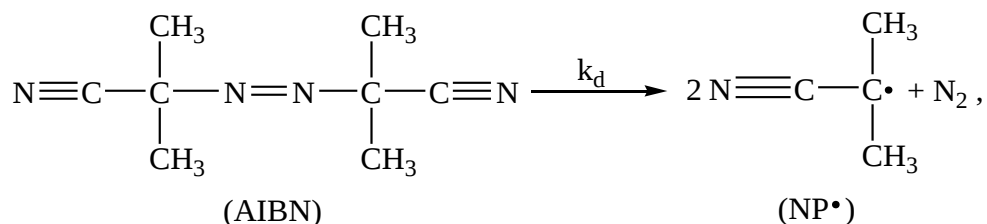
Методика эксперимента. В качестве акцепторов свободных радикалов использовали моно- и дигидроксикоричные кислоты (*пара*-, *орто*- и *мета*-кумаровые, кофейная, феруловая и синаповая кислоты) (>98%, «Acros Organics», Бельгия), которые относятся к группе простых фенилпропаноидов и являются генетическими предшественниками сложных фенилпропаноидов и родственных им групп флавоноидов. Генераторы свободных радикалов (инициаторы) – липофильное азосоединение 2,2'-азобисизобутиронитрил (AIBN) и гидрофильное – 2,2'-азобис(2-амидинопропан) дигидрохлорид (AAPH) ($\geq 96\%$, «Sigma-Aldrich», США). Бензол и диметилсульфоксид (ДМСО) очищали по известной методике [6]. Для поддержания постоянного pH водного раствора использовали солянокислую и фосфатную буферные системы, приготовленные по ГОСТ 4949.2–2016 [7].

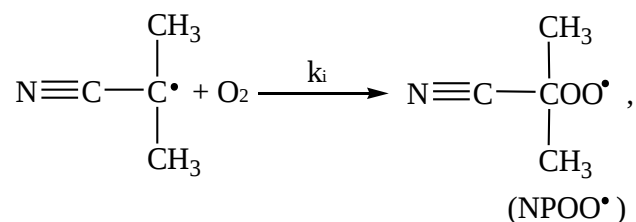
Методом хемилюминесценции (ХЛ) определяли константы скорости реакции исследуемых фенольных антиоксидантов с пероксирадикалами, генерируемыми при термическом распаде AAPH в буферном растворе с pH 1,5–7,35 и AIBN в бензоле и ДМСО [8]. В качестве физических активаторов свечения применялись 9,10-дибромантрацен (DBA) в бензоле и родамин 6Ж (Rd6G) в фосфатном буфере.

Фенолы растворяли в диметилсульфоксиде, а затем аликвоту этого раствора (0,1 мл) вводили в смесь (4,9 мл), содержащую инициатор и активатор свечения. Полученный раствор помещали в термостатируемую кювету хемилюминометра и барботировали предварительно осушенным воздухом для насыщения кислородом и перемешивания. Скорость подачи газа в реакционную смесь составляла $0,6\text{--}0,8\text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$, что не влияло на интенсивность хемилюминесцентного свечения и соответствовало кинетической области протекания реакции. Температура проведения эксперимента $T = 323 \pm 2\text{ К}$ соответствовала температуре, при которой используемые инициаторы распадаются на радикалы с постоянной скоростью. Скорость инициирования (генерирования) пероксирадикалов рассчитывали по формулам $v_i = 2ek_d[\text{AAPH}]$ и $v_i = 2ek_d[\text{AIBN}]$ [9, 10]. Измерения проводились с помощью хемилюминесцентной установки (фотоумножитель ФЭУ-38), принципиальная схема которой описана в работах [9, 11], с цифровой обработкой сигнала посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-305 с пакетом программного обеспечения «PowerGraph» производства «LCARD» (Россия). Кинетические данные обрабатывались нелинейным методом обобщенного приведенного градиента, реализованного в Solver MS Excel.

Для расчета констант диссоциации кумаровых кислот использовали полуэмпирический метод QSPR (Quantitative Structure – Property Relationship – Количественная взаимосвязь структура – свойство) в программе Marvin 18.14 [12].

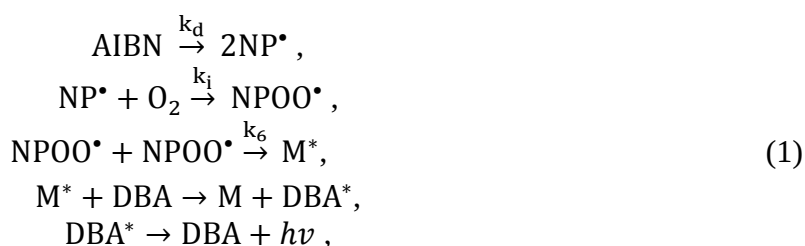
Анализ результатов. Антирадикальную активность природных фенилпропаноидов проверяли методом ХЛ относительно лабильных О-центрированных радикалов, имитирующих пероксильные радикалы органических субстратов. Генерировали такого типа радикалы при термическом распаде AIBN в бензоле при 323 К [9, 13, 14]:





где $\text{NPOO}\cdot$ – 2-цианоизопропанпероксильный радикал.

В реакции рекомбинации $\text{NPOO}\cdot$, генерируемых при распаде AIBN, может возникать ХЛ, интенсивность которой может быть усилена за счет переноса энергии на эффективный флуорофор – DBA [9]:



где M^* – электронно-возбужденное состояние карбонильного соединения; $h\nu$ – квант света (хемилюминесценция).

Если считать, что ХЛ (I_0) возбуждается лишь в реакции (1), то интенсивность ХЛ должна быть пропорциональна квадрату концентрации перекисных радикалов: $I_0 \sim [\text{NPOO}\cdot]^2$. При добавлении в систему гидроксикоричных кислот как акцепторов пероксирадикалов наблюдается уменьшение интенсивности ХЛ-свечения (I) по реакции:



Видно (рис. 1), что относительная интенсивность (I/I_0) ХЛ сразу после введения антиоксиданта (АО) резко снижается, затем, по мере его расходования, восстанавливается до начального уровня.

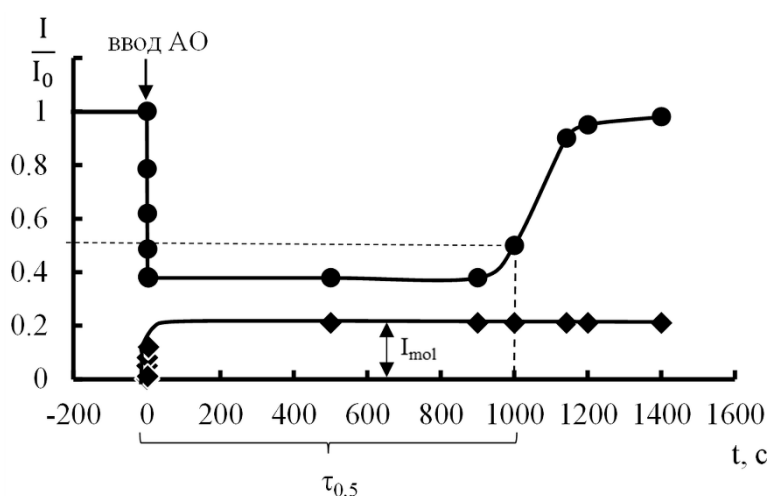
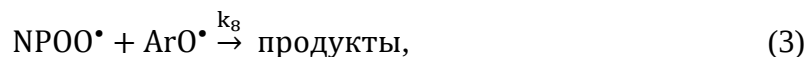


Рис. 1. Изменение относительной интенсивности ХЛ (I/I_0) при термическом распаде AIBN в присутствии кофейной кислоты ($2 \cdot 10^{-4}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$). $T=323 \pm 2$ К, $v_i=3,5 \cdot 10^{-7}$ моль $\cdot$ л $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$, $[\text{DBA}]=3 \cdot 10^{-3}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$, растворитель – бензол

При высоких концентрациях наблюдается период индукции ($\tau_{0,5}$) – время полувосстановления ХЛ, когда I становится равной половине I_0 . Однако в периоде индукции ХЛ не ослабляется до нуля, что, вероятно, связано с возбуждением ХЛ в каких-либо нерадикальных (молекулярных) реакциях, на которые $ArOH$ не влияет. Было показано, что появление молекулярной ХЛ связано с влиянием активатора свечения. Относительную интенсивность I_{mol} определяли, когда в реакционной смеси присутствовал только растворитель и активатор, ее величину учитывали при расчете кинетических параметров (рис. 1).

Поскольку относительная интенсивность свечения ($\sqrt{I/I_0}$) количественно характеризует концентрацию пероксирадикалов [9, 11], а введение кислот приводит к пропорциональному уменьшению этого свечения, то реакция (2) является лимитирующей и позволяет использовать величину ХЛ для определения константы скорости реакции $ArOH$ с $NPOO^\bullet$ как параметра антирадикальной активности (АРА) гидроксикоричных кислот.

Для этого был выбран метод исследования нестационарной кинетике ХЛ, предложенный в работе [9] и проверенный в [15], при условии низких скоростей инициирования (v_i) и достаточно высоких концентрациях АО. Указанный метод крайне удобен, поскольку позволяет исключить влияние на кинетику реакции продуктов превращения природных фенолов, а также не требует знания величины константы скорости рекомбинации пероксирадикалов (k_6). Расчет $k_{NPOO^\bullet(benz)}$ проводили в начальный момент времени, когда концентрация $ArO^\bullet$ крайне мала и реакциями (3) и (4) пероксирадикалов с продуктами превращения $ArOH$ можно пренебречь:



С учетом реакций (3) и (4) изменение концентрации перекисных радикалов описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d[NPOO^\bullet]}{dt} = v_i - k_6[NPOO^\bullet]^2 - k_{NPOO^\bullet(benz)}[NPOO^\bullet][ArOH] - k_8[NPOO^\bullet][ArO^\bullet]. \quad (5)$$

В начальный момент, когда $[ArO^\bullet] \rightarrow 0$, последним членом в уравнении (5) можно пренебречь. В этом случае решение имеет вид как показано в работе [9]:

$$\ln \frac{(\sqrt{\frac{I}{I_0}} - y_2 \sqrt{\frac{k_6}{v_i}})(1 - y_1 \sqrt{\frac{k_6}{v_i}})}{(\sqrt{\frac{I}{I_0}} - y_1 \sqrt{\frac{k_6}{v_i}})(1 - y_2 \sqrt{\frac{k_6}{v_i}})} = t \sqrt{4v_i k_6 + (k_{NPOO^\bullet(benz)}[ArOH])^2}, \quad (6)$$

$$\text{где } y_{1,2} = -\frac{k_{NPOO^\bullet(benz)}[ArOH]}{2k_6} \pm \sqrt{\left(\frac{k_{NPOO^\bullet(benz)}[ArOH]}{2k_6}\right)^2 - \frac{v_i}{k_6}}.$$

При условии

$$k_{NPOO^\bullet(benz)}[ArOH] \gg \sqrt{k_6 v_i}. \quad (7)$$

выражение (6) приводится к виду

$$\ln \sqrt{\frac{I_0}{I}} = k_{NPOO^\bullet(benz)}[ArOH]t. \quad (8)$$

Условие (7) оказывается выполненным при малых v_i и больших $[ArOH]$. Начальный участок ХЛ-кривой (рис. 2) обрабатывали двумя способами.

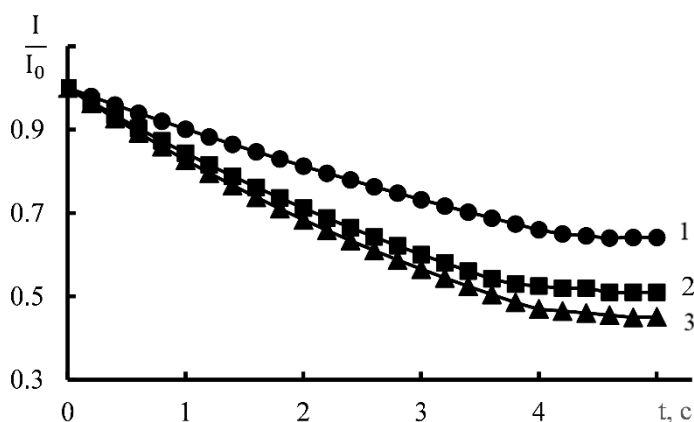


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности ХЛ (I/I_0) при термическом распаде AIBN в присутствии гидроксикоричных кислот: 1 – о-кумаровая ($1 \cdot 10^{-2}$ моль·л $^{-1}$); 2 – феруловая кислота ($1 \cdot 10^{-3}$ моль·л $^{-1}$); 3 – синаповая кислота ($1 \cdot 10^{-3}$ моль·л $^{-1}$). $T=323 \pm 2$ К, $v_i=3,5 \cdot 10^{-7}$ моль·л $^{-1}$ ·с $^{-1}$, $[DBA]=3 \cdot 10^{-3}$ моль·л $^{-1}$, растворитель – бензол

Первый способ предусматривает спрямление этого участка в полулогарифмических координатах (рис. 3) кинетического уравнения первого порядка (8). Используя линейный регрессионный анализ (ЛРА), рассчитывали угловой параметр уравнения (8), по величине которого определяли $k_{NPOO \cdot (benz)}$ (табл. 1).

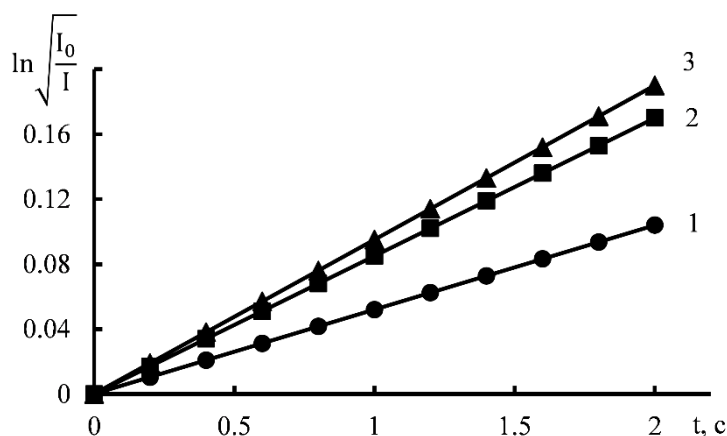


Рис. 3. Анаморфозы начальных участков кинетических кривых, представленных на рис. 2

По второму способу кинетические данные обрабатывали нелинейным методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ) [16], реализованного в надстройке «Поиск решений» (Solver) программы MS Excel (рис. 4).

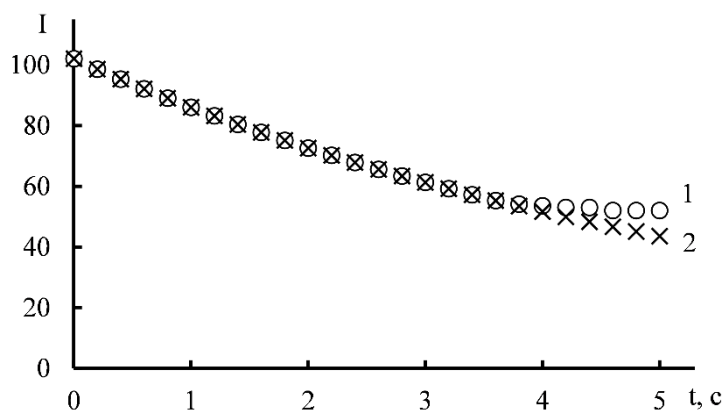


Рис. 4. Кинетика изменения интенсивности ХЛ при термическом распаде AIBN в присутствии феруловой кислоты ($1 \cdot 10^{-3}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$), определенная экспериментально (1) и смоделированная нелинейным методом ОПГ в Solver MS Excel (2)

Видно, что отклонение наблюдалось при снижении ХЛ более чем на 50 %, что объясняется, вероятно, неспособностью АО гасить свечение, возникающее в нерадикальных реакциях. В связи с этим расчёт константы $k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})}$ проводили до момента времени, соответствующего 50 % падения ХЛ. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры АРА ($k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})}$), рассчитанные методами ЛРА и ОПГ, а также значения тролоксового эквивалента (ТЕ) гидроксикоричных кислот. Растворитель – бензол

Соединение	ЛРА	ОПГ	$TE = \frac{k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})\text{ArOH}}}{k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})\text{Trolox}}}$
	$k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})},$ л $\cdot$ моль $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$	$k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})},$ л $\cdot$ моль $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$	
о-Кумаровая кислота	$6,5 \pm 0,23$	$5,2 \pm 0,21$	0,006
м-Кумаровая кислота	$10,1 \pm 0,3$	$9,3 \pm 0,3$	0,001
п-Кумаровая кислота	$8,7 \pm 0,26$	$7,5 \pm 0,25$	0,008
Кофейная кислота	323 ± 9	273 ± 8	0,3
Феруловая кислота	$94 \pm 2,8$	$82 \pm 2,7$	0,09
Синаповая кислота	106 ± 4	95 ± 3	0,1
Тролокс	931 ± 27	830 ± 26	1

Видно (табл. 1), что $k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})}$ несколько занижены по сравнению с константами, полученными с помощью ЛРА. Это связано с большей точностью нелинейного метода ОПГ, поскольку в этом случае обрабатываются непосредственно исходные экспериментальные данные.

Константы скорости $k_{\text{NPOO}^{\bullet}(\text{benz})}$ реакции ArOH с $\text{NPOO}^{\bullet}$ сравнивали с аналогичной величиной для реперного АО, в качестве которого использовали водорастворимый аналог витамина Е – 6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновую кислоту, известную как тролокс. По величине тролоксового эквивалента (ТЕ) определяли во сколько раз АРА исследуемой кислоты выше активности ингибитора сравнения. Видно (табл. 1), что в бензоле ни одна из исследуемых фенолокислот не проявила активности больше, чем у тролокса. Низкая реакционная способность исследуемых фенолокислот связана с механизмом их антирадикального действия в органической фазе, который представляет собой перенос атома Н от

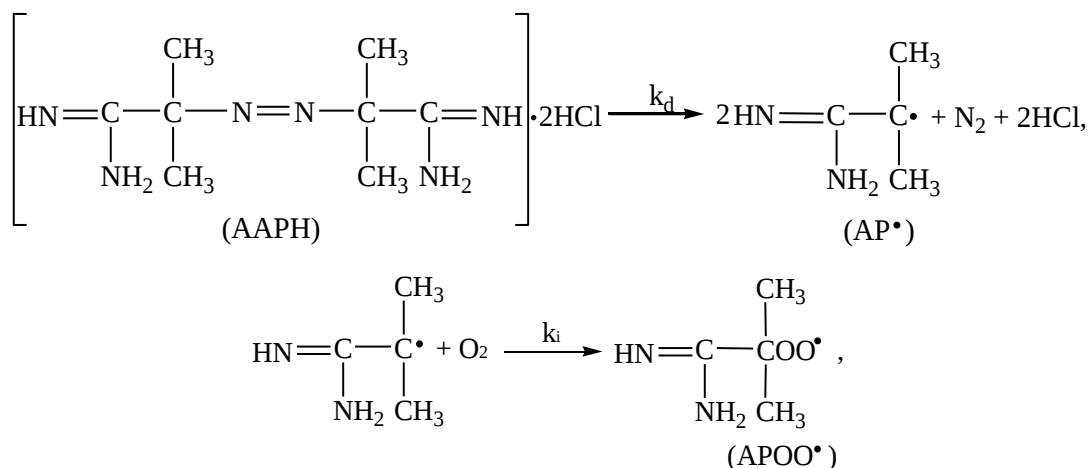
молекулы АО к радикалу [17, 18]. Этот механизм медленно реализуется в неполярных растворителях, способных к образованию водородных связей с фенольными О–Н группами.

Для доказательства этого утверждения, на примере кофейной кислоты, были определены $k_{\text{NPOO}^\bullet(\text{benz})}$ (табл. 2) в средах с одинаковой диэлектрической проницаемостью (ϵ), но разной способностью к образованию Н-связи, которую характеризовали по β_2^{H} -шкале основности водородных связей вещества, предложенной в работе [19]. Видно (табл. 2), что чем больше основность акцептора Н-связи, то есть растворителя, тем менее эффективно фенолокислота гасит ХЛ-свечение. Наибольшее значение $k_{\text{NPOO}^\bullet(\text{benz})}$ определено в гексане с параметром β_2^{H} равным 0, поскольку в этом случае фенольная О–Н группа не связана межмолекулярной Н-связью с молекулой растворителя и способна свободно реагировать с пероксирадикалом (табл. 2).

Таблица 2
Зависимость АРА ($k_{\text{NPOO}^\bullet(\text{benz})}$) кофейной кислоты от основности растворителя как акцептора водородной связи [19]

Растворитель	ϵ	β_2^{H}	$k_{7(\text{benz})}$, л·моль ⁻¹ ·с ⁻¹
Гексан	1,89	0	410±15
Бензол	2,32	0,14	273±8
1,4-Диоксан	2,2	0,41	87±2,7

Возможность аппроксимации полученных результатов на водную среду была проверена в реакции с 2-амидинопропан-2-пероксилами, генерируемыми в фосфатном буфере при физиологическом pH = 7,35 и T = 323 К.



где $\text{APOO}^\bullet$ – 2-амидинопропанпероксильный радикал.

Как и в предыдущей реакции в бензоле, введение в реакционную смесь гидроксикоричных кислот приводит к падению ХЛ свечения за счёт их взаимодействия с $\text{APOO}^\bullet$:



По ХЛ-кривым (рис. 5) нелинейным методом ОПГ были рассчитаны $k_{\text{NPOO}^\bullet(\text{buff})}$ реакции (9) в буфере (табл. 3).

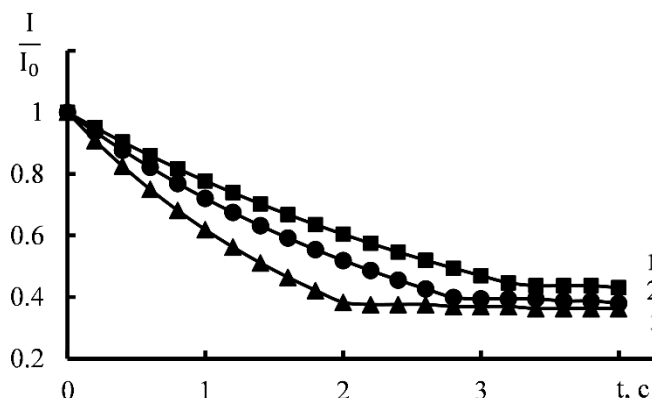


Рис. 5. Изменение относительной интенсивности ХЛ (I/I_0) при распаде ААРН в присутствии фенолоксилов: 1 – тролокс ($2 \cdot 10^{-5}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$); 2 – феруловая кислота ($2 \cdot 10^{-5}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$); 3 – кофейная кислота ($2 \cdot 10^{-5}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$). $T=323 \pm 2$ К, $v_i=3,5 \cdot 10^{-7}$ моль $\cdot$ л $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$, $[RdG]=3 \cdot 10^{-3}$ моль $\cdot$ л $^{-1}$, растворитель – фосфатный буфер, pH=7,35

Сравнительный анализ реакционной способности АгОН в водной и органической фазах показал, что закономерности, установленные в бензоле, не соблюдаются при переходе к фосфатному буферу при pH = 7,35. Так, константы в буфере на 1–2 порядка больше, чем в бензоле (табл. 1, 2). По величине ТЕ также имеются некоторые несоответствия: в органическом растворителе все соединения менее активны, чем тролокс, в то время как в фосфатном буфере низкой АРА обладают только кумаровые кислоты. Поскольку в реакциях (2) и (9) использовали О-центрированные радикалы со схожей структурой, то причина резкого роста активности фенолоксилов может заключаться в изменении механизма отрыва атома Н на перенос электрона за счет перехода от неполярного растворителя к водной среде, где в реакцию с радикалами могут вступать фенолят-ионы кислот.

Таблица 3
Параметры АРА ($k_{NPOO^*(buff)}$) и значения тролоксного эквивалента (ТЕ) гидроксикоричных кислот. Растворитель – буфер с pH=7,35

Соединение	$k_{NPOO^*(buff)}$, л $\cdot$ моль $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$	$TE = \frac{k_{NPOO^*(buff)ArOH}}{k_{NPOO^*(buff)Trolox}}$
о-Кумаровая кислота	$82 \pm 2,6$	0,013
м-Кумаровая кислота	$93 \pm 2,7$	0,015
п-Кумаровая кислота	$102 \pm 2,9$	0,016
Кофейная кислота	$(1,22 \pm 0,04) \cdot 10^3$	0,19
Феруловая кислота	$(8,2 \pm 0,3) \cdot 10^3$ *	1,3
Синаповая кислота	$(9,4 \pm 0,3) \cdot 10^3$	1,5
Тролокс	$(6,3 \pm 0,3) \cdot 10^3$	1

* в средах с pH = 1,5 и 9 величина $k_{NPOO^*(buff)}$ равна $(2,01 \pm 0,01) \cdot 10^2$ и $(2,03 \pm 0,01) \cdot 10^4$ л $\cdot$ моль $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$ соответственно.

Из распределения ионных форм гидроксикоричных кислот в зависимости от pH среды при $T = 323$ К (растворитель – вода), рассчитанного методом QSPR в программе Marvin 18.14.0, следует, что при pH = 7,35 (табл. 4) представленные фенолоксиловы частично диссоциируют с образованием активных фенольных биионов, способных реагировать с $APOO^{\bullet}$ по реакции переноса электрона:

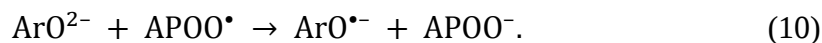


Таблица 4

Константы диссоциации ArOH и доля их молекулярных и ионных форм при pH = 7,35, смоделированные в программе Marvin 18.14

Соединение	pK _{a1}	pK _{a2}	[Ar-OH], %	[Ar-O ²⁻], %
о-Кумаровая кислота	8,96	3,88	98,870	0,028
м-Кумаровая кислота	9,03	3,86	99,048	0,026
п-Кумаровая кислота	9,11	3,85	99,213	0,026
Феруловая кислота	9,54	3,83	99,724	0,015
Синаповая кислота	9,01	3,48	99,012	0,010
Кофейная кислота	12,04	3,52	98,677	0,011

Подтвердить механизм переноса электрона можно путем изменения pH реакционной смеси. На примере феруловой кислоты показано, что при изменении pH с 7,35 до 1,5 константа скорости $k_{\text{NPOO}\cdot(\text{buff})}$ уменьшается более чем на порядок (табл. 3) за счет снижения в кислой среде концентрации ионных форм ArO^{2-} , более активных в реакции с пероксирадикалом, чем нейтральные молекулы. Напротив, замена кислого буфера на борно-щелочной с pH 9 приводит к резкому увеличению скорости расщепления радикалов по реакции (10) (табл. 3). Зависимость $k_{\text{NPOO}\cdot(\text{buff})}$ исследуемой реакции от pH среды подтверждает, что в нейтральных средах преобладает механизм переноса электрона от фенолят-иона кислоты к радикалу.

Выводы. Определены параметры АРА гидроксикоричных кислот в реакции с $\text{NPOO}\cdot$ в бензоле и с $\text{APOO}\cdot$ в водной среде методом ХЛ. В органической среде наибольшим антирадикальным действием по сравнению с тролоксом обладает кофейная кислота, а в водной – синаповая кислота. Установлено, что активность кислот по отношению к пероксирадикалам в бензоле на 1–2 порядка ниже, чем в фосфатном буфере при физиологическом pH = 7,35. Это связано с тем, что антирадикальное действие гидроксикоричных кислот в бензоле реализуется по медленному механизму переноса атома водорода, а в буфере – путем быстрого переноса электрона. Такие явные отличия свидетельствуют о необходимости разработки разных подходов к оценке АРА соединений группы гидроксикоричных кислот в зависимости от природы стабилизируемого субстрата.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124051400022-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевозкина М.Г. Тестирование антиоксидантной активности полифункциональных соединений кинетическими методами: монография / М.Г. Перевозкина. – Новосибирск: СибАК, 2014. – 240 с.
2. Костюк В.А. Биорадикалы и биоантиоксиданты: монография / В.А. Костюк, А.И. Потапович. – Минск: БГУ, 2004. – 179 с.
3. Vermerris W. Phenolic Compound Biochemistry / W. Vermerris, R. Nicholson. – Dordrecht: Springer, 2006. – 275 p.
4. Theoretical study of the thermodynamics of the mechanisms underlying antiradical activity of cinnamic acid derivatives / A. Amić, Z. Marković, E. Klein, et al. // Food Chem. – 2018. – Vol. 246. – P. 481–489.
5. Kurkin V.A. Phenylpropanoids from medicinal plants: distribution, classification, structural analysis, and biological activity / V.A. Kurkin // Chem. Nat. Compd. – 2003. – Vol. 39, No 2. – P. 123–153.
6. Armarego W.L.F. Purification of Laboratory Chemicals. Fifth Edition / W.L.F. Armarego, C.L.L. Chai. – Amsterdam: Elsevier Science, 2003. – 608 p.
7. ГОСТ 4919.2–2016 Реактивы и особо чистые вещества. Методы приготовления буферных растворов. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13 с.
8. Хемиллюминесцентное исследование антирадикальной активности композиций кофейной кислоты с моно- и дисахаридами / Е.А. Будникова, Н.И. Белая, А.В. Белый [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А: Естественные науки. – 2024. – № 1. – С. 3–10.

9. Хемилюминесцентные методы исследования медленных химических процессов / В.Я. Шляпинтох, О.Н. Карпунин, Л.М. Постников [и др.] – М.: Наука, 1966. – 300 с.
10. Denisov E.T. Handbook of Free Radical Initiators / E.T. Denisov, T.G. Denisova, T.S. Pokidova. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 879 p.
11. Кинетика окси-хемилюминесценции и ее использование для анализа антиоксидантов / В.А. Беляков, Р.Ф. Васильев, Г.Ф. Федорова // Кинетика и катализ. – 2004. – Т. 45, № 3. – С. 355–362.
12. Marvin 18.14 ChemAxon (<https://www.chemaxon.com>).
13. Development of a novel micro-assay for evaluation of peroxy radical scavenger capacity: Application to carotenoids and structure-activity relationship / E. Rodrigues, L.R.B. Mariulti, R.C. Chisté, et al. // Food Chem. – 2012. – Vol. 135, No 3. – P. 2103–2111.
14. Is the Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC) Method a Peroxyl-radical Scavenging Assay? / B.Y. Sueishi, D. Yoshioka, S. Oowada, et al. // Z. Phys. Chem. – 2010. – Vol. 224. – P. 921–928.
15. Белая Н. И. Регрессионно-классификационная модель «дескриптор – активность» в кинетике радикального окисления природных фенолов: спец. 02.00.04 «Физическая химия (химические науки)» : дис. док. хим. наук / Белая Наталья Ивановна. – Ростов-на-Дону, 2021. – 323 с.
16. Курс методов оптимизации: учеб. пособие / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Физматлит, 2011. – 384 с.
17. Thermodynamic and kinetic analysis of thereaction between biological catecholamines andchlorinated methylperoxy radicals / D.S. Dimić, D.A. Milenković, J.M. Dimitrić Marković, et al. // Mol. Phys. – 2018. – Vol. 116, No 9. – P. 1166–1178.
18. Hydrogen atom transfer versus proton coupled electron transfer mechanism of gallic acid with different peroxyradicals / D. Milenković, J. Đorović, V. Petrović, et al. // Reac. Kinet. Mech. Cat. – 2018. – Vol. 123. – P. 215–230.
19. Abraham M. H. Hydrogen Bonding. Part 10.t A Scale of Solute Hydrogen-bond Basicity using log K Values for Complexation in Tetrachloromethane / M.H. Abraham // Journal of the Chemical Society. – 1990. – Trans 2, No 4. – P. 521–529.

Поступила в редакцию 12.05.2025 г.

THE KINETICS OF REACTION OF HYDROXYCINNAMIC ACIDS WITH LIPO- AND HYDROPHILIC PEROXY RADICALS

A.V. Belyi, N.V. Mikhaylova, N.I. Belaya, V.A. Konailenko

Using the chemiluminescence method, it was found that hydroxycinnamic acids showed different antiradical activity in reaction with peroxyradicals generated during the decomposition of lipophilic and hydrophilic azo compounds. In fat-like media (benzene), their activity is low, which is due to the influence of a nonpolar medium - benzene, where phenolic compounds react with peroxyradicals at a low rate by the mechanism of hydrogen atom detachment. In aqueous medium (phosphate buffer with pH=7.34) the reactivity of compounds increases many times due to the realization in aqueous media of a fast electron transfer mechanism from the formed phenolate ions of hydroxycinnamic acids. The dependence of the reactivity of acids on the pH of the medium is a reliable criterion for the realization of the electron transfer mechanism in aqueous media. The established differences indicate the need to develop different approaches to evaluating the antiradical activity of phenolic acids depending on the nature of the stabilized substrate.

Key words: hydroxycinnamic acids, antiradical activity, chemiluminescence, peroxyradical.

Белый Александр Владимирович
кандидат химических наук, доцент;
доцент кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, Россия.
E-mail: belyj@donnu.ru
ORCID: 0000-0001-6837-9211
AuthorID: 958567

Belyi Alexandr Vladimirovich
Candidate of Chemical Sciences, Docent;
Associate Professor at the Department of
Physical Chemistry, Donetsk
State University, Donetsk, DPR, Russia.

Михайлова Наталья Вадимовна

инженер кафедры физической химии,
магистр ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, Россия.
E-mail: natasha.mikhaylova.2001@mail.ru
ORCID: 0009-0002-9793-6341
AuthorID: 1249085

Mikhaylova Nataliya Vadimovna

Engineer of the Department of Physical
Chemistry, Master's Degree student,
Donetsk State University,
Donetsk, Russia.

Белая Наталья Ивановна

доктор химических наук, доцент;
профессор кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, Россия.
E-mail: n.iv.belaya@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3359-3239
AuthorID: 886435

Belaya Natalya Ivanovna

Doctor of Chemical Sciences, Docent;
Professor at the Department of
Physical Chemistry, Donetsk
State University, Donetsk, Russia.

Конайленко Владислав Артемович

лаборант кафедры физической химии,
студент ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, Россия.
E-mail: vlad.konaylenko@gmail.com
ORCID: 0009-0007-2444-7877
AuthorID: 1270501

Konailenko Vladislav Artemovich

laboratory assistant at the Department of
Physical Chemistry, student,
Donetsk State University,
Donetsk, Russia.

IN SILICO ДИЗАЙН НОВЫХ АТФ-КОНКУРЕНТНЫХ ИНГИБИТОРОВ ЯНУС-КИНАЗЫ JAK2

© 2025. С. Г. Кострюков, А. В. Алмазова, Д. В. Мишкин

Ингибиторы янус-киназ являются новым классом пероральных препаратов, противодействующих активации JAK. Ингибиторы янус-киназ (якинибы) воздействуют на внутриклеточные сигнальные пути, что приводит к снижению воспалительного процесса. Это позволяет более точно воздействовать на патогенетические мишени заболеваний. Разработка ингибиторов янус-киназ стала важным достижением в ревматологии XXI века, особенно для лечения ревматоидного артрита, который затрагивает людей всех возрастов, но чаще всего встречается у людей трудоспособного возраста. Для поиска новых ингибиторов использовали *in silico* методы, в результате были сгенерированы молекулы, из которых отобраны пять соединений-лидеров, имеющих более низкие значения свободной энергии связывания, чем барицитиниб. Проведенный анализ фармакокинетических свойств и физико-химических параметров ADME (абсорбция, распределение, метаболизм, экскреция) свидетельствует о высоком фармацевтическом потенциале соединений-лидеров, что позволяет рассматривать их в качестве перспективных кандидатов в лекарственные препараты.

Ключевые слова: янус-киназы; ингибиторы янус-киназ; ревматоидный артрит; докинг; BREED, физико-химические параметры ADME.

Введение. Янус-киназы представляют собой семейство внутриклеточных тирозинкиназ, которые играют ключевую роль в регуляции передачи сигналов от цитокинов через сигнальный путь JAK/STAT, нарушение регуляции которого ведет к патогенезу многочисленных иммуноопосредованных заболеваний, например, псориатическому артриту, псориазу, ревматоидному артриту, острому лимфоцитарному лейкозу, воспалительному заболеванию кишечника, первичному миелофиброзу и к некоторым другим патологиям [1]. В семейство янус-киназ входит 4 киназы: JAK1, JAK2, JAK3 и TYK2. Важно отметить, что киназы JAK1, JAK2 и TYK2 экспрессируются повсеместно у млекопитающих, а JAK3 в первую очередь экспрессируется в кровеносных клетках [2].

Новый класс пероральных препаратов, противодействующих активации JAK, представляют малые молекулы, которые встраиваются в протеиновые молекулы, ингибируя тем самым активность янус-киназ. Из-за их центральной роли в иммунном ответе и их связи с несколькими цитокиновыми рецепторами ингибирование JAK оказалось перспективной стратегией при аутоиммунных заболеваниях. Более того, ингибиторы янус-киназ представляют собой эффективные и относительно безопасные средства для лечения многих патологий. Вдобавок ко всему, увеличение числа соединений, ингибирующих янус-киназы, заслуживает особого внимания, так как производство низкомолекулярных соединений, которыми являются якинибы, значительно проще и дешевле производства биологических препаратов [3].

По всему миру проводятся исследования различных лекарственных средств, которые проявляют активность в отношении JAK. В России в настоящее время зарегистрированы и применяются в клинической практике четыре ингибитора JAK: руксолитиниб, тофацитиниб, барицитиниб и упадацитиниб [4] (рис. 1).

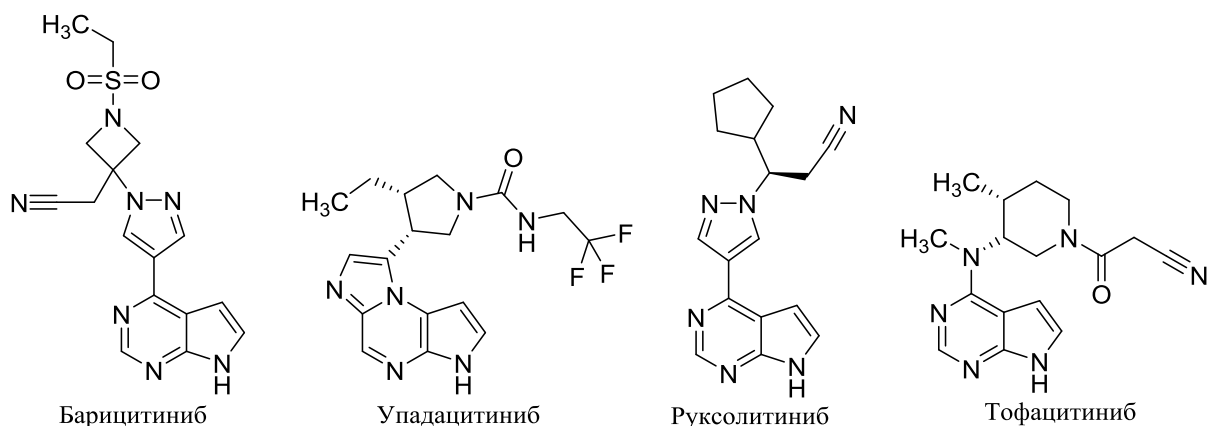


Рис. 1. Структурные формулы зарегистрированных ингибиторов JAK

Постановка задачи. Одним из значительных достижений в области ревматологии в XXI века стала разработка новой группы лекарственных средств, которые ингибируют янус-киназы. Особое внимание отводится ревматоидному артриту, поскольку это заболевание характеризуется высокой распространенностью, серьезностью течения и высокой вероятностью возникновения инвалидности [5].

Ревматоидный артрит (РА) – воспалительное заболевание, характеризующееся симметричным поражением суставов и воспалением внутренних органов. Это заболевание затрагивает все возрастные группы, включая как детей, так и пожилых людей. Тем не менее, наибольшее число случаев наблюдается среди людей трудоспособного возраста [6].

Современная стратегия лечения ревматоидного артрита (РА) акцентирует внимание на ранней диагностике. Это позволяет начать активную терапию для достижения ремиссии (концепция лечения до достижения цели). Данную концепцию разработали эксперты EULAR [7]. Она включает использование традиционных базисных болезнь-модифицирующих препаратов, генно-инженерных биологических препаратов (ГИБП) и таргетных синтетических препаратов, таких как ингибиторы янус-киназ. Хотя ГИБП значительно улучшают качество жизни пациентов и предотвращают структурные повреждения суставов, около 36% пациентов не достигают желаемого эффекта из-за вторичной резистентности и необходимости парентерального введения. Поэтому перспективным направлением считается использование пероральных препаратов с низкой молекулярной массой, блокирующих внутриклеточные сигнальные пути, что снижает продукцию провоспалительных медиаторов [7].

В качестве прототипа для разработки новых ингибиторов был использован барицитиниб. Барицитиниб (2-[1-Этилсульфонил-3-[4-(7H-пирроло[2,3-d]пиримидин-4-ил)пиразол-1-ил]азетидин-3-ил]ацетонитрил) является селективным и обратимым ингибитором янус-киназы 1 и 2 (JAK1 и JAK2) [8]. Он ингибирует ферментативную активность JAK1/2 со значениями IC_{50} 5,9 и 5,7 нМ соответственно. В 2017 г. барицитиниб получил первое глобальное одобрение в ЕС в качестве монотерапии или в комбинации с метотрексатом для лечения активного ревматоидного артрита средней и тяжелой степени у взрослых пациентов [9].

Метод решения. Целью данной работы была разработка новых ингибиторов янус-киназы JAK2 и оценка их ингибирующей активности *in silico* методами. Для расчетов была использована трехмерная структура JAK2 в комплексе с барицитинибом

(код 6VN8 в PDB [10]). В качестве контроля в расчетах использовали молекулу барицитиниба. Моделирование трехмерных структур и оценка потенциала ингибиторной активности осуществляли с помощью программного пакета Schrödinger, программа Maestro 13.8 [11]. Расчет выполняли с использованием ноутбука (HUAWEI MateBook D 15, Китай). Операционная система Windows 10 Домашняя для одного языка, версия 22H2, сборка ОС 19045.4170, процессор AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.10 GHz, оперативная память 8,00 ГБ, 64-разрядная операционная система, процессор x64.

Анализ результатов. Для разработки потенциальных ингибиторов янус-киназы JAK2 был использован метод BREED [12].

Метод BREED, реализованный в программном пакете Schrödinger (Maestro 13.8), представляет собой мощный инструмент для генерации новых потенциальных ингибиторов на основе известных структур. В нашем случае он был применён для разработки ингибиторов янус-киназы JAK2. Метод BREED использует алгоритм сопоставления связей и обмена фрагментами между молекулами, но не просто создаёт гибриды двух каркасов, а: анализирует 3D-структуры известных ингибиторов (например, из кристаллографии или докинга), выравнивает молекулы по ключевым фармакофорным элементам, производит обмен фрагментами (например, заменяет боковую цепь одного ингибитора на фрагмент другого), генерирует новые соединения, с учетом ключевых взаимодействий с мишенью. В качестве исходных данных для метода BREED послужили 26 известных ингибиторов JAK2: руксолитиниб, тофациитиниб, барицитиниб, упадацитиниб, гандотиниб, лестауртиниб, момелотиниб, AZD1480, AT 9283, WP1066, TG101209, AZ 960, CEP 33779, XL 019, солцитиниб, BMS 911543, FLLL 32, децернотиниб, TG 89, NVP-BSK805, брепоцитиниб, ропсациитиниб, SAR-20347, WHI-P154, деукравацитиниб, ритлецитиниб. Структуры этих соединений были импортированы в программный комплекс Maestro через коды SMILES, которые были заимствованы с сайта medchemexpress.com [13]. Поскольку при импорте соединений из кодов SMILES получаются двухмерные структуры их необходимо конвертировать в трёхмерное пространство с генерацией оптимальной геометрии молекул (инструмент Ligand Preparation). В результате трех генераций из исходных 26 молекул было получено 3820 новых соединений.

Сгенерированные структуры были подвергнуты молекулярному докингу (инструмент Ligand Docking) с протеиновой мишенью 6VN8 тремя последовательными режимами. Первоначально в режиме высокопроизводительного виртуального скрининга (HTVS) из всех структур было отобрано 200 молекул с наилучшими параметрами связывания (Docking score), затем отобранные молекулы были рассчитаны в режиме стандартной точности (SP-docking), в результате чего было отобрано 30 молекул. На заключительном этапе эти молекулы были рассчитаны в режиме высокой точности (XP-docking). Такая последовательность действий была обусловлена тем, что режим XP-docking требует больше машинного времени и на стандартных компьютерах с низкой и средней производительностью может продолжаться слишком долго, перезагрузить систему и привести к её зависанию. В результате проведенных расчётов было отобрано 5 соединений-лидеров (рис. 2), которые демонстрируют более эффективное, чем барицитиниб, связывание с янус-киназой JAK2.

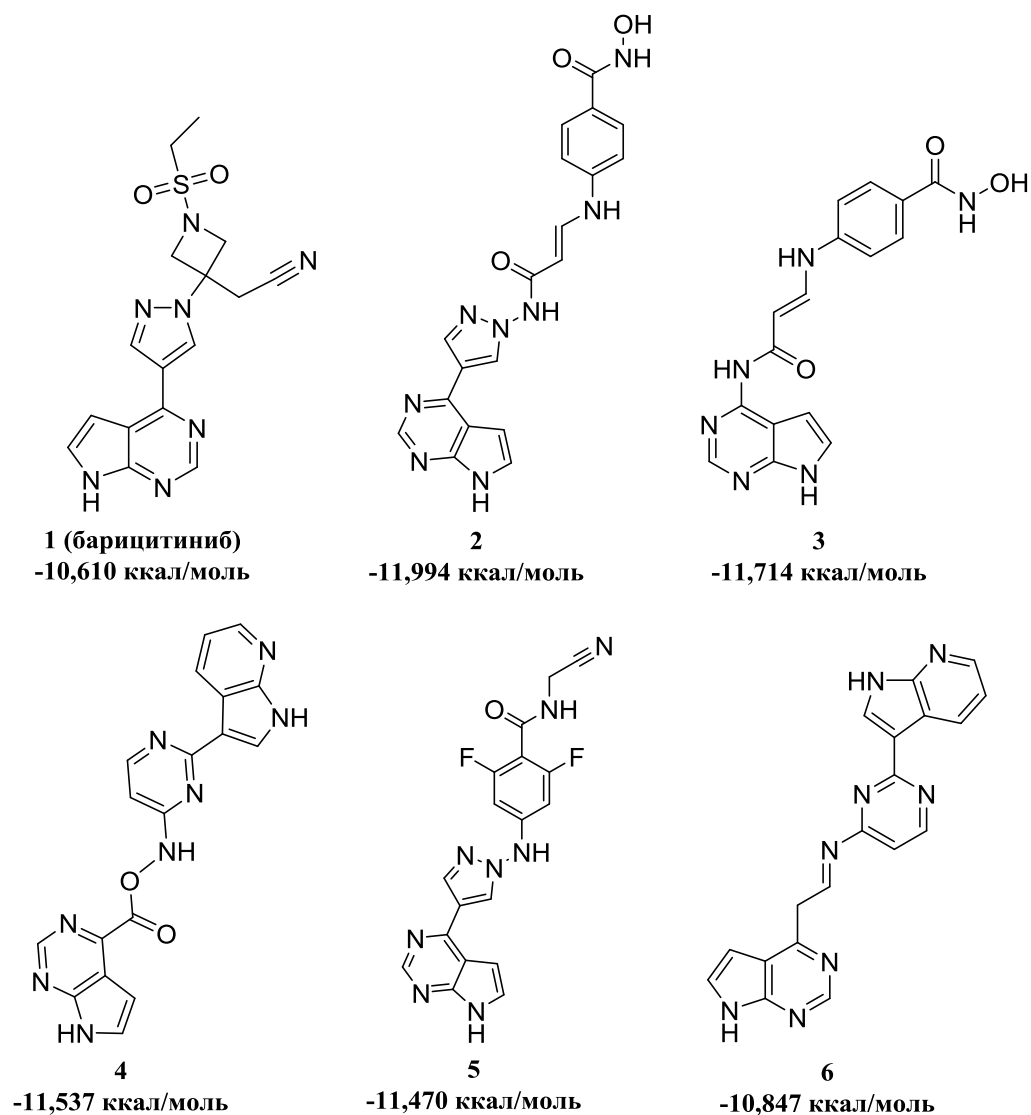


Рис.2. Структурная формула барицитиниба 1 и соединений-лидеров 2-6 со значениями свободной энергией связывания (Docking score) с янус-киназой JAK2

В режиме XP-docking были посчитаны вклады отдельных параметров в общую энергию связывания с белковой мишенью, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Дескрипторы оценочной функции Glide

№ соединения	1	2	3	4	5	6
DockScore	-10.6	-11.6	-11.4	-11.5	-11.1	-10.8
GScore	-10.6	-11.6	-11.4	-11.5	-11.1	-11.3
LipophilicEvdW	-4.6	-4.0	-3.7	-4.2	-4.2	-4.5
PhobEn	-0.3	-0.3	0.0	-0.3	-0.3	-0.3
PhobEnPairHB	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9
HBond	-1.6	-3.0	-3.1	-2.9	-2.5	-2.1
Electro	-1.2	-1.5	-1.5	-1.1	-1.4	-0.9
Sitemap	-0.8	-1.0	-1.1	-1.1	-0.8	-1.3
LowMW	-0.3	-0.1	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
RotPenal	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1

Из представленных в таблице 1 результатов, можно видеть, что для эффективной аффинности соединений-лидеров к белку важны такие вклады как LipophilicEvdW («reward» за наличие гидрофобного потенциала на гидрофобных атомах лиганда) и HBond («reward» за наличие водородных связей), а также ключевую роль играет «penalty» за вращение лиганда (RotPenal). Вклады с нулевыми значениями в таблице не приведены.

В качестве примеров на рис. 3 показаны ключевые взаимодействия протеиновой мишени с барицитинибом и соединением 2. При взаимодействии янус-киназы JAK2 с барицитинибом образуются водородные связи с аминокислотами Leu-932, Glu-930 и двумя молекулами воды. В случае соединения 2 водородные связи образуются с Leu-932, Glu-930, Glu-1015 и тремя молекулами воды.

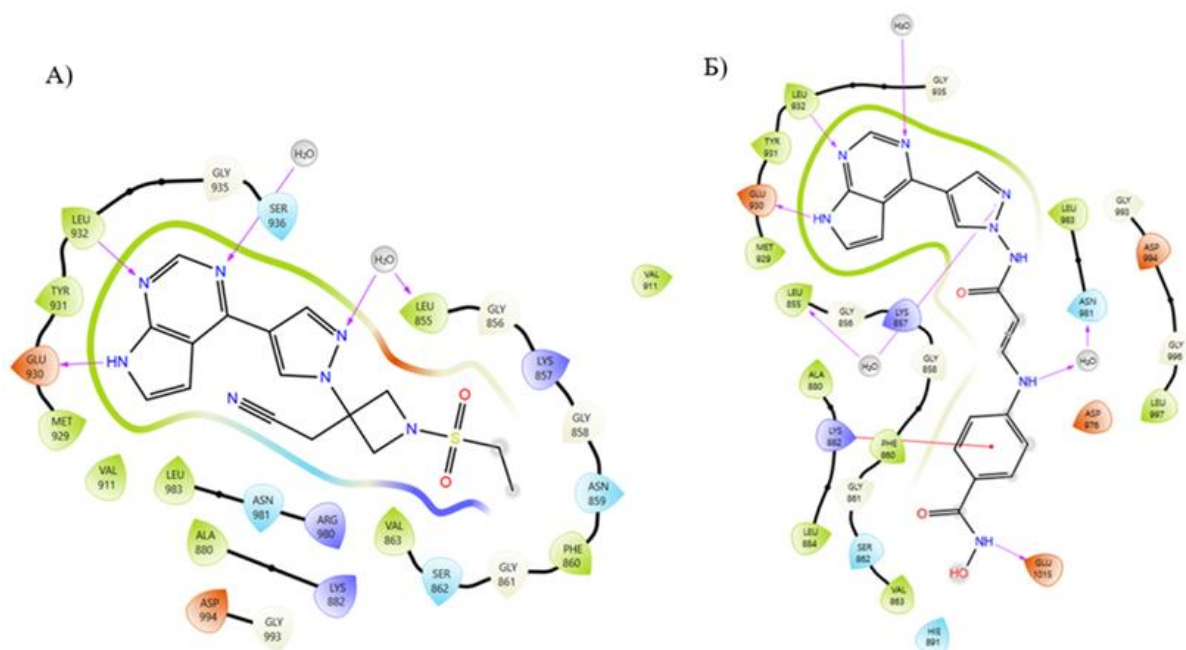


Рис. 3. 2D-диаграммы взаимодействия барицитиниба (А) и соединения 2 (Б) с протеиновой мишенью

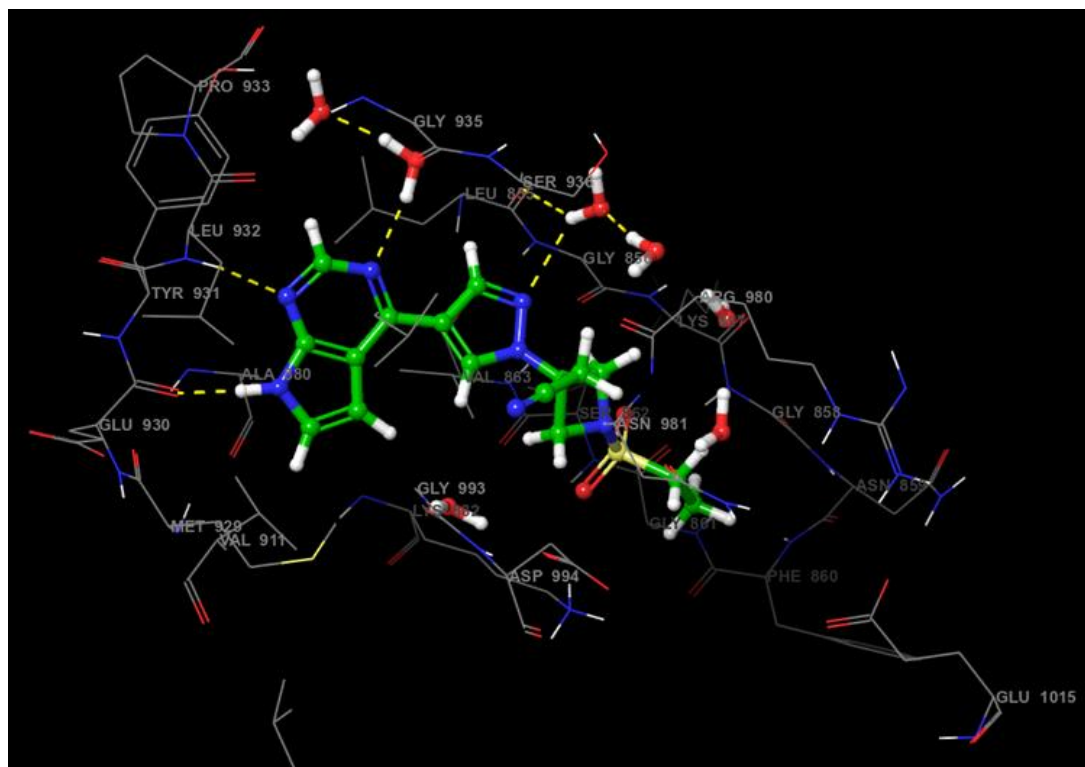
На рисунке 4 отражены основные взаимодействия барицитиниба и соединения 2 с 6VN8 (протеиновой мишенью) в 3D проекции.

Не менее важным этапом в исследовании является оценка физико-химических параметров ADME [14], которые играют ключевую роль в определении свойств лекарственных средств, данные параметры представлены в таблице 2.

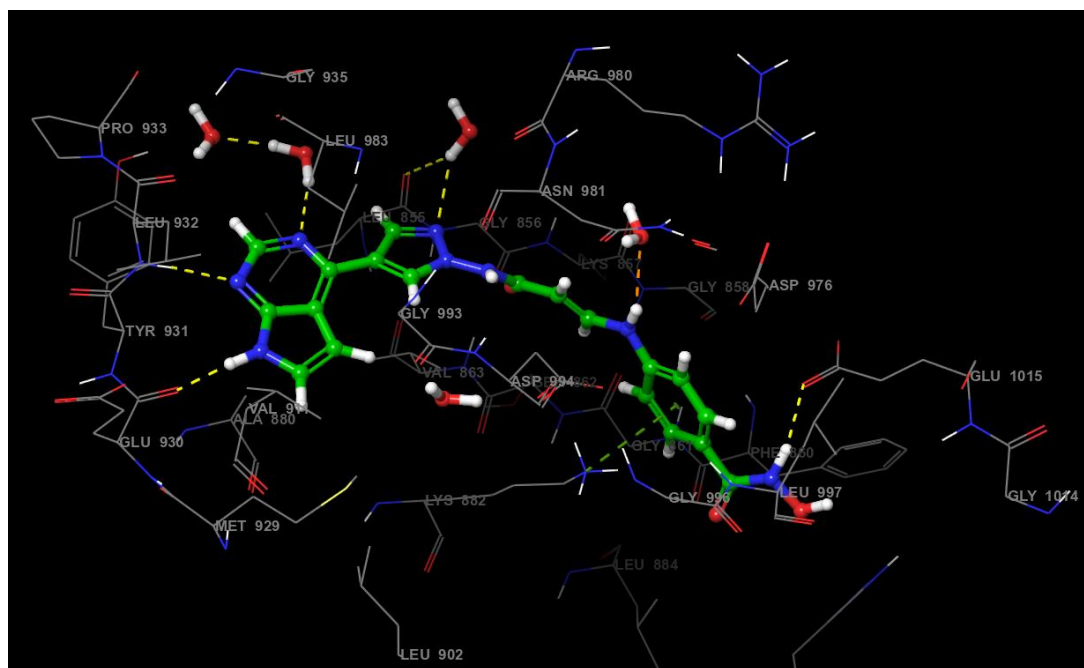
Таблица 2

Физико-химические параметры ADME

№	Формула	М	LogP	N доноров Н-связи	N акцепторов Н-связи	Прогнозирование всасываемости	
						ЖКТ	ГЭБ
1	$C_{16}H_{17}N_7O_2S$	371.42	0.55	1	7	+	-
2	$C_{19}H_{16}N_8O_3$	404.38	0.90	5	6	-	-
3	$C_{16}H_{14}N_6O_3$	338.32	0.98	5	5	+	-
4	$C_{18}H_{12}N_8O_2$	372.34	1.77	3	7	+	-
5	$C_{18}H_{12}F_2N_8O$	394.34	2.04	3	7	+	-
6	$C_{19}H_{14}N_8$	354.37	2.42	2	6	+	-



А



Б

Рис. 4. Взаимодействие барицитиниба (А) и соединения 2 (Б) с протеиновой мишенью

Затем с помощью метода BOILED-Egg (Brain Or IntestinaL EstimateD permeation method) [15] была проведена оценка проницаемости вещества через гематоэнцефалический барьер (ГЭБ) – обозначается как «желток» (если вещество попадает в желток, значит, оно способно проникать в мозг); всасываемости в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) – обозначается как «белок» (если вещество попадает в белок, значит, оно хорошо абсорбируется в кишечнике); выведение из ЦНС

с помощью Р-гликопротеина (P-gr): синяя точка – вещество является субстратом P-gr (активно выводится из мозга), красная точка – вещество не является субстратом P-gr (может накапливаться в ЦНС).

Полученные по методу «BOILED-Egg» параметры всасываемости соединений **1–6** приведены на рис. 6, на котором можно увидеть способно ли вещество проникать через ГЭБ («желток») и ЖКТ («белок»), а также увидеть способно ли вещество выводиться из ЦНС Р-гликопротеином (синяя точка) или нет (красная точка).

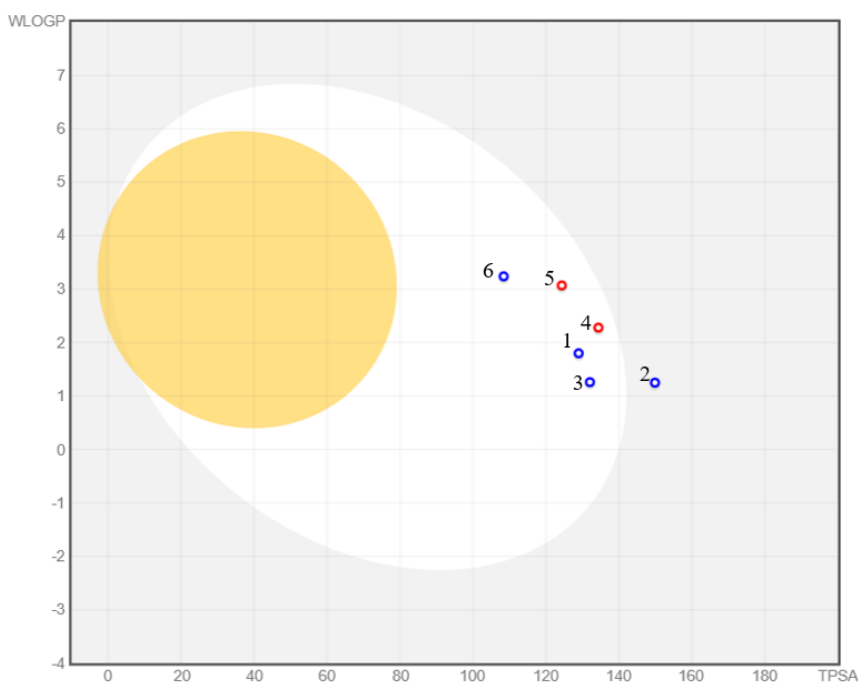


Рис. 6. Прогноз всасываемости соединений через ЖКТ и ГЭБ

Изучение результатов, которые представлены в таблице 2, показывают, что соединения **2–6** имеют суммарно не более 10 атомов-акцепторов водородной связи, за исключением соединения **2**, для которого не выполняется одно правило из пяти правил Липински. Но остальные правила выполняются для всех соединений без исключений: менее 5 атомов-доноров водородной связи, липофильность менее 5 и имеют молекулярную массу менее 500 Да. Более того, соединения **3–6** демонстрируют хорошую всасываемость через ЖКТ.

Затем соединения **2–6** были проанализированы на предмет токсичности, поскольку при разработке лекарственных средств важно учитывать не только физико-химические параметры ADME, но и потенциальную токсичность. Полученные результаты сравнили с данными для барицитиниба **1**, чтобы оценить, будут ли соединения **2–6** менее или более токсичными, чем референсный препарат.

В таблице 3 представлена вероятность токсичности барицитиниба **1** и соединений-лидеров **2–6** в диапазоне от 0 до 1, где результаты 0–0.3 низкая токсичность (зеленый цвет), 0.3–0.7 средняя (оранжевый цвет) и 0.7–1.0 высокая (красный цвет).

Анализ данных, представленных в таблице 3, свидетельствует о том, что барицитиниб **1** обладает выраженной токсичностью по большинству исследованных параметров. Соединения **2–6** также демонстрируют высокий токсический потенциал, однако среди них соединения **4** и **6** выделяются меньшим числом параметров с критически высокими значениями по сравнению как с барицитинибом, так и с остальными производными.

Таблица 3

Оценка токсичности

№ соединения	1 (барицитиниб)	2	3	4	5	6
hERG Blockers	0.066	0.335	0.409	0.083	0.269	0.086
hERG Blockers (10um)	0.285	0.074	0.073	0.331	0.373	0.394
DILI	0.993	1.0	1.0	0.996	0.997	0.998
AMES Toxicity	0.553	0.996	0.993	0.864	0.83	0.375
Rat Oral Acute Toxicity	0.788	0.343	0.262	0.75	0.742	0.879
FDAMDD	0.726	0.42	0.379	0.702	0.47	0.813
Skin Sensitization	0.016	0.902	0.932	0.658	0.117	0.139
Carcinogenicity	0.699	0.88	0.816	0.875	0.229	0.644
Eye Corrosion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Eye Irritation	0.172	0.089	0.312	0.621	0.903	0.576
Respiratory	0.984	0.715	0.698	0.558	0.978	0.984
Human Hepatotoxicity	0.904	0.952	0.961	0.64	0.937	0.929
Drug-induced Nephrotoxicity	0.817	0.984	0.977	0.932	0.977	0.975
Drug-induced Neurotoxicity	0.805	0.438	0.43	0.973	0.985	0.965
Ototoxicity	0.707	0.45	0.288	0.454	0.83	0.528
Hematotoxicity	0.392	0.924	0.841	0.374	0.469	0.399
Genotoxicity	0.999	1.0	1.0	0.992	1.0	1.0
RPMI-8226 Immunitoxicity	0.13	0.416	0.436	0.193	0.155	0.19
A549 Cytotoxicity	0.027	0.018	0.029	0.085	0.087	0.057
Hek293 Cytotoxicity	0.214	0.874	0.903	0.246	0.188	0.322
BCF	0.169	0.333	0.338	0.66	0.704	1.442
IGC50	2.729	3.326	3.272	3.304	3.29	3.75
LC50DM	4.098	5.195	5.132	4.273	4.707	4.599
LC50FM	3.218	4.354	4.262	3.928	4.059	4.352

Анализ токсикологических профилей соединений показывает следующее: низкий риск кардиотоксичности (параметры hERG Blockers и hERG Blockers (10 µM)) наблюдается как у барицитиниба **1**, так и у соединений **2–6**; высокий риск токсичности (вероятность 0.817–1.0) выявлен для следующих параметров: DILI (лекарственное поражение печени), Drug-induced nephrotoxicity (лекарственная нефротоксичность), Genotoxicity (генотоксичность); минимальный риск (значения 0.0–0.087) зафиксирован для: Eye corrosion (поражение глаз), A549 cytotoxicity (цитотоксичность в клеточной линии A549). По остальным параметрам токсичности барицитиниб **1** и соединения **2–6** демонстрируют схожие результаты.

Значимыми фармакокинетическими параметрами являются плазменный клиренс и период полувыведения лекарственного средства, теоретические результаты которых представлены в таблице 4 для соединений **2–6** и барицитиниба **1**.

Таблица 4

Выделение

№ соединения	1 (барицитиниб)	2	3	4	5	6
CL _{plasma} , мл/мин/кг	5.316	3.597	3.764	3.364	2.385	4.258
T _{1/2} , час	1.391	1.153	1.256	1.05	1.458	1.052

Плазменный клиренс (CL_{plasma}) характеризует скорость элиминации вещества из организма: низкие значения (<5 мл/мин/кг) указывают на пролонгированное действие, что потенциально повышает терапевтическую эффективность. В отличие от

барицитиниба ($CL_{plasma} = 5\text{--}15$ мл/мин/кг), соединения **2–6** показали значительно меньший клиренс, что предполагает их более длительную циркуляцию в системном кровотоке.

К сожалению, как соединения **2–6**, так и барицитиниб характеризуются коротким периодом полувыведения ($T_{1/2} = 1\text{--}4$ ч), что может потребовать частого перорального приема для поддержания терапевтической концентрации. Для предсказания теоретической вероятности токсичности и фармакокинетических параметров был использован бесплатный веб-инструмент ADMETlab 3.0 [16, 17].

Выводы. *In silico* методами разработаны новые АТФ-конкурентные ингибиторы янус-киназы JAK2, идентифицировано 5 перспективных соединений-лидеров, демонстрирующих, согласно расчетным данным, более высокую ингибирующую активность по сравнению с барицитинибом. Проведенный анализ фармакокинетических характеристик и физико-химических параметров ADME подтверждает потенциал соединений-лидеров для использования в качестве эффективных лекарственных препаратов. Полученные результаты свидетельствуют, что соединения **2–6** представляют собой перспективные ингибиторы JAK2 и заслуживают дальнейшего изучения в рамках экспериментальных и теоретических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tzeng, H.-T. Targeting the JAK-STAT pathway in autoimmune diseases and cancers: A focus on molecular mechanisms and therapeutic potential / H.-T. Tzeng, I.-T. Chyuan, J.-H. Lai // *Biochemical Pharmacology*. – 2021. – Vol. 193. – ID 114760. – DOI 10.1016/j.bcp.2021.114760.
2. Ghoreschi, K. Janus kinases in immune cell signaling / K. Ghoreschi, A. Laurence, J. J. O'Shea // *Immunological reviews*. – 2009. – Vol. 228, Issue 1. – P. 273–287. – DOI 10.1111/j.1600-065X.2008.00754.x.
3. JAK-Inhibitors for the Treatment of Rheumatoid Arthritis: A Focus on the Present and an Outlook on the Future / J. Angelini, R. Talotta, R. Roncato et al. // *Biomolecules*. – 2020. – Vol. 10, Issue 7. – P. 1002. – DOI 10.3390/biom10071002.
4. Ингибиторы JAK: клиническая фармакология и перспективы применения / С.А. Докторова, В.В. Рафальский, Ю.Ю. Грабовецкая, С.В. Корнев // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 421–434. – DOI 10.17816/RCF204421-434
5. Новиков, П. И. Ингибиторы янус-киназ в лечении ревматоидного артрита / П. И. Новиков, С. В. Моисеев // *Клиническая фармакология и терапия*. – 2017. – Т. 26, № 4. – С. 26–32.
6. Мазуров В. И. Клиническая значимость ингибиторов Янус-киназ в терапии ревматоидного артрита: достижения и перспективы / В. И. Мазуров, И. Б. Беляева // *Современная ревматология*. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 116–123. – DOI 10.14412/1996-7012-2019-4-116-123.
7. Мазуров В. И. Достижения и перспективы применения малых молекул в терапии ревматоидного артрита / В. И. Мазуров, И. Б. Беляева // *Эффективная фармакотерапия*. – 2021. – Т. 7. – С. 24–31. – DOI 10.33978/2307-3586-2021-17-7-24-31.
8. Барицитиниб в лечении пациентов с COVID-19: обзор международных данных и анализ результатов опыта клинического применения в российской популяции / А.И. Загребнева, Е.А. Барях, Е.И. Желнова и др. // *Антибиотики и химиотерапия*. – 2021. – Т. 66, № 1–2. – С. 47–56. – DOI: 10.24411/0235-2990-2021-66-1-2-47-56.
9. Markham A. Baricitinib: First Global Approval / A. Markham // *Drugs*. – 2017. – Vol. 77, Issue 6. – P. 697–704. – DOI: 10.1007/s40265-017-0723-3.
10. Structural Insights into JAK2 Inhibition by Ruxolitinib, Fedratinib, and Derivatives Thereof / R.R. Davis, B. Li, S.Y. Yun et al. // *J. Med. Chem.* – 2021. – Vol. 64, Issue 4. – P. 2228–2241. – DOI: 10.1021/acs.jmedchem.0c01952.
11. Maestro Version 13.8.132, MMshare Version 6.4.132, Release 2023-4, <https://www.schrodinger.com/products/maestro/> (дата обращения: 21.02.2025).
12. Pierce A.C. BREED: Generating Novel Inhibitors through Hybridization of Known Ligands. Application to CDK2, P38, and HIV Protease / A.C. Pierce, G. Rao, G.W. Bemis // *J. Med. Chem.* – 2004. – Vol. 47, Issue 11. – P. 2768–2775. – DOI: 10.1021/jm030543u

13. <https://www.medchemexpress.com/> (дата обращения: 21.04.2025).
14. Daina A. SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules / A. Daina, O. Michielin, V. Zoete // Sci. Rep. – 2017. – No 7. – ID 42717. – DOI: 10.1038/srep42717
15. Daina A. A BOILED-Egg To Predict Gastrointestinal Absorption and Brain Penetration of Small Molecules / A. Daina, V. Zoete // ChemMedChem. – 2016. – Vol. 11, Issue 11. – P. 1117-1121. – DOI: 10.1002/cmdc.201600182.
16. ADMETlab: a platform for systematic ADMET evaluation based on a comprehensively collected ADMET database / J. Dong, N.-N. Wang, Z.-J. Yao et al. // J. Cheminform. – 2018. – No 10. – ID 29. – DOI: 10.1186/s13321-018-0283-x.
17. URL: <https://admetlab3.scbdd.com/>

Поступила в редакцию 07.05.2025 г.

IN SILICO DESIGN OF NEW ATP-COMPETITIVE JAK2 JANUS KINASE INHIBITORS

S. G. Kostryukov, A. V. Almazova, D. V. Mishkin

Janus kinase inhibitors (jakinibs) represent a novel class of oral medications that counteract JAK activation. These inhibitors target intracellular signaling pathways, resulting in reduced inflammatory responses. This mechanism enables more precise targeting of disease pathogenesis. The development of JAK inhibitors stands as a major breakthrough in 21st century rheumatology, particularly for treating rheumatoid arthritis – a condition affecting individuals of all ages, though most prevalent among the working-age population. Using in silico approaches for novel inhibitor discovery, we generated molecular structures and identified five lead compounds demonstrating lower binding free energy values than baricitinib. Comprehensive analysis of pharmacokinetic properties and ADME (absorption, distribution, metabolism, excretion) physicochemical parameters indicates high pharmaceutical potential for these lead compounds, establishing them as promising drug candidates.

Keywords: Janus kinases; JAK inhibitors; rheumatoid arthritis; molecular docking; BREED; ADME physicochemical parameters.

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

Kostryukov Sergey G.

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

Алмазова Анастасия Васильевна

студентка магистратуры,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия.
E-mail: aba08062002@mail.ru

Almazova Anastasia V.

Master's student;
National Research Ogarev Mordovia State University;
Saransk, Russia.
E-mail: aba08062002@mail.ru

Мишкин Дмитрий Викторович

аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия.
E-mail: dimami94@yandex.ru

Mishkin Dmitry V.

Postgraduate;
National Research Ogarev Mordovia State University;
Saransk, Russia.
E-mail: dimami94@yandex.ru

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 577.3.34; 577.3.35

DOI: 10.5281/zenodo.15583319

EDN: IQYBOE

МОНИТОРИНГ ЮЖНОЙ ЧАСТИ РУСЛА РЕКИ КАЛЬМИУС С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА БИОТЕСТИРОВАНИЯ

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

Исследование посвящено изучению состояния поверхностных вод южной части русла реки Кальмиус, включая Павлопольское водохранилище, правый приток реки Кальчик и Старокрымское водохранилище с применением метода биотестирования на лабораторной тест-культуре клеток *Chlorella sorokiniana*. В методику биотестирования включен флуориметрический анализ фотосинтетической активности тест-объекта, основанный на регистрации кривых индукции флуоресценции хлорофилла. Было выявлено острое токсическое действие проб воды из притока реки Кальмиус и Павлопольского водохранилища, а также хроническое токсическое действие для проб из реки Кальчик и участка русла реки Кальмиус на территории города Мариуполя. Пробы воды из Старокрымского водохранилища оказывали угнетающее действие на фотосинтетическую активность клеток *Chlorella sorokiniana*.

Ключевые слова: биотестирование, флуоресценция хлорофилла, *Chlorella sorokiniana*, река Кальмиус, река Кальчик, Павлопольское водохранилище, Старокрымское водохранилище.

Введение. Водные ресурсы играют важную роль в жизнеобеспечении Донецкого региона. Значительный вред водным экосистемам наносят промышленные, шахтные и сельскохозяйственные стоки, специфичные для данного региона по своему составу загрязнителей. Наиболее часто такими загрязнителями выступают нитраты, хлориды, соли аммония, железа, сульфаты и нефтепродукты [1]. Водообеспечение региона частично осуществляется за счет внутренних водохранилищ, входящих в состав бассейнов рек Кальмиус и Крынка. В состав русла реки Кальмиус входит четыре водохранилища: Верхнекальмиусское, Нижнекальмиусское, Старобешевское и Павлопольское. Также в системе реки Кальчик, которая является правым притоком реки Кальмиус, находится Старокрымское водохранилище. Все эти водные объекты имеют важное значение для водообеспечения региона. Река Кальмиус находится под интенсивным воздействием антропогенной нагрузки, связанной со сбросом сточных вод. По отдельным показателям наблюдается превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) в несколько раз. Например, содержание марганца в поверхностных водах реки может превышать ПДК в 9 раз, меди – в 5,7 раза, цинка – в 7,8 раза, сульфатов и хлоридов – в 2 раза, нефтепродуктов – в 6 раз [2, 3]. Таким образом, воды реки Кальмиус относятся к категории грязные или очень грязные [2]. В связи со сложившейся экологической обстановкой, возникает необходимость в проведении мониторинга поверхностных вод реки Кальмиус.

Одним из методов мониторинга водной среды является биотестирование, которое представляет собой процесс установления токсического действия отобранных проб на живой тест-объект. В качестве таких тест-объектов могут выступать различные организмы: бактерии (*Escherichia coli*, *Nitrosomonas*), одноклеточные водоросли (*Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella vulgaris*), мелкие рачки (*Daphnia magna*,

Ceriodaphnia affinis), рыбы (*Danio rerio*, *Poecilia reticulata*) [4]. Данный метод обладает рядом преимуществ: простотой и доступностью приемов их постановки, высокой чувствительностью тест-организмов к минимальным концентрациям токсических агентов, быстротой, отсутствием потребности в дорогостоящих реактивах и оборудовании [5]. Проведение биотестирования на культурах одноклеточных водорослей позволяет использовать флуориметрические методы оценки содержания хлорофилла и фотосинтетической активности тест-объектов [6, 7]. Состояние фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона оценивается по кривым индукции флуоресценции, которые отражают особенности протекания фотосинтетических реакций на уровне фотосистемы II [8, 9]. Большинство методик биотестирования основано на определении показателей прироста количества клеток и содержания хлорофилла в исследуемой тест-культуре [10]. Флуориметрический метод даёт возможность более детальной оценки состояния живого организма, поскольку отражает качественные изменения в функционировании фотосинтетического аппарата клеток водорослей [10–12].

Целью данной работы являлась оценка состояния поверхностных вод южного участка реки Кальмиус, включая устье, с применением метода биотестирования и флуориметрического анализа.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования был выбран южный участок русла реки Кальмиус, от Павлопольского водохранилища до устья реки с учетом правого притока – реки Кальчик и Старокрымского водохранилища (рис. 1).

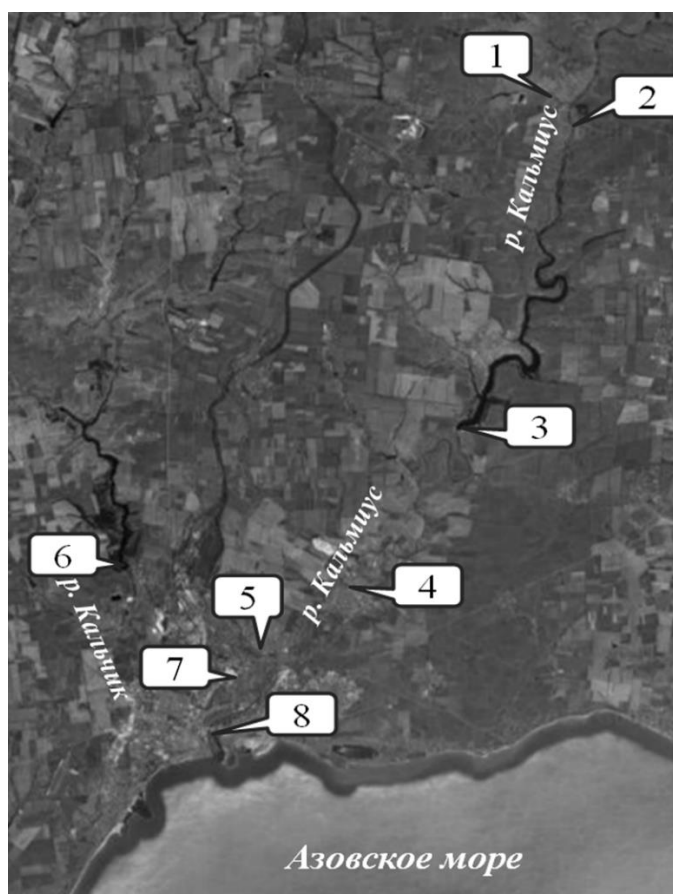


Рис. 1. Мониторинговые точки южного участка реки Кальмиус в окрестностях г. Мариуполя и Павлопольского водохранилища

Точки отбора проб выбирались таким образом, чтобы наиболее полно оценить степень антропогенной нагрузки. Всего было выделено 8 мониторинговых точек, расположение которых приведено на рисунке 1. Мониторинговые точки 1 и 2 расположены неподалеку н.п. Гранитное. Точка 2 расположена в русле р. Кальмиус, точка 1 соответствует притоку родниковых вод. Мониторинговые точки 3 и 6 относятся к Павлопольскому и Старокрымскому водохранилищам. Точка 4 расположена в окрестностях н.п. Сартана и является промежуточной между Павлопольским водохранилищем и точками русла р. Кальмиус на территории г. Мариуполя. В городе отбор проб осуществлялся до впадения р. Кальчик в р. Кальмиус (точка 5), в самом притоке (точка 7) и в устье р. Кальмиус, после впадения правого притока (точка 8). Поверхностный сток с территории города Мариуполя служит источником загрязнения и засорения реки, которая является основной для региона и используется для забора воды и нужд промышленности, коммунального и сельского хозяйств.

При оценке токсичности проб воды за основу были взяты рекомендации Росгидромета по биотестированию [13], которое проводили на культуре клеток *Chlorella sorokiniana*, выращенных на 50 %-ой среде Тамия со световым режимом 12–12 часов при постоянном перемешивании и температуре. Пробы воды предварительно фильтровали через ацетилцеллюлозные мембранные фильтры с диаметром пор 0,6 мкм с помощью насоса Комовского с целью удаления зоопланктона и клеток природного фитопланктона. Для исследуемых проб выполняли флуориметрическое определение содержания хлорофилла *a* и регистрировали кривые индукции флуоресценции хлорофилла с помощью флуориметра ФС-2, разработанного на базе Донецкого государственного университета. Острую и хроническую токсичность проб устанавливали в ходе биотестирования в зависимости от времени проявления токсического эффекта. В случае выявления негативного воздействия на тест-культуру водорослей острое токсическое действие (ОТД) устанавливали после 24 часов экспозиции, хроническое токсическое действие (ХТД) – после 96 часов. Концентрацию хлорофилла *a* в исследуемых пробах определяли по уровню минимальной флуоресценции (F_0). Кривые индукции флуоресценции анализировали с помощью программы ruPhotoSyn [14], определяя параметры JIP-теста согласно [10–12].

Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием W-критерия Вилкоксона [15].

Таким образом, биотестирование включало два параллельных этапа измерений. Первый этап включал учет прироста концентрации хлорофилла *a* тест-культуры *Ch. sorokiniana*, на втором этапе оценивали качественные изменения в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата водорослей путем регистрации кривых индукции флуоресценции.

Результаты исследования. При биотестировании, согласно количественным показателям прироста тест-культуры, выявлено острое и хроническое токсическое действие отдельных проб воды. В таблице 1 представлены результаты измерений прироста концентрации хлорофилла при биотестировании на клетках тест-культуры *Ch. sorokiniana*. В таблице серым цветом выделены пробы, для которых нельзя установить токсическое действие, так как данные достоверно не отличались от контрольной группы. Полужирным начертанием выделены пробы, для которых было получено достоверное отклонение от контрольных значений.

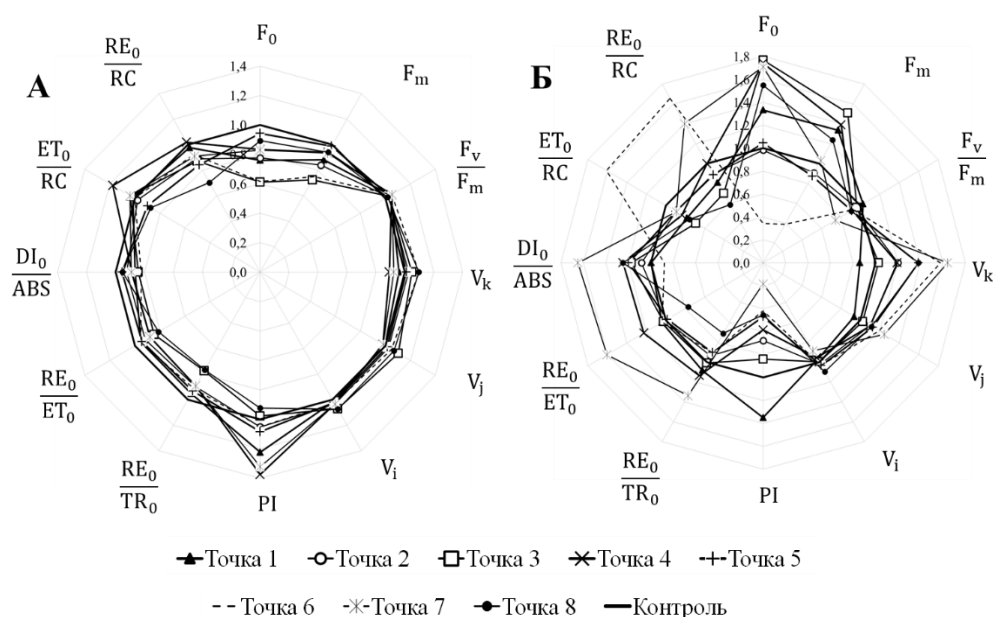
По результатам измерений было выявлено угнетающее острое токсическое действие для притока около н.п. Гранитное и Павлопольского водохранилища. Стимулирующее хроническое токсическое действие оказывал фильтрат из р. Кальмиус

(точки 4 и 8) и р. Кальчик. Для точек 5 и 2 токсического действия не обнаружено. Достоверных отличий от контроля для проб из Старокрымского водохранилища также не получено.

Таблица 1
Результаты биотестирования токсичности проб воды из низовья бассейна р. Кальмиус

Исследуемые пробы	24 ч		96 ч	
	Концентрация хлорофилла а, отклонение от контроля, %	Токсическое действие	Концентрация хлорофилла а, отклонение от контроля, %	Токсическое действие
Контроль	–	–	–	–
Точка 1	-50,2	ОТД	–	–
Точка 2	-46,8	Нет ОТД	-2,9	Нет ХТД
Точка 3	-81,3	ОТД	–	–
Точка 4	-34,9	Нет ОТД	124,8	ХТД
Точка 5	-11,9	Нет ОТД	7,6	Нет ХТД
Точка 6	-80,3	Нет ОТД	-110,5	Нет ХТД
Точка 7	-35,6	Нет ОТД	119,3	ХТД
Точка 8	-22,3	Нет ОТД	92,3	ХТД

Изменение параметров кривых индукции флуоресценции согласуются с результатами биотестирования. На рисунке 2 приведены диаграммы с параметрами ОЖР-теста кривых индукции флуоресценции клеток культуры *Chlorella sorokiniana*.



После 24 часов экспозиции для проб из точек 1, 4 и 7 было выявлено повышение индекса фотосинтетической активности, для точек 3 и 6 наблюдалось снижение интенсивности флуоресценции. Показатели функционирования фотосинтетического аппарата тест-культуры для всех проб не отличался. Также, для точки 1 было выявлено острое токсическое действие.

После 96 часов экспозиции для большинства проб наблюдалось изменение фотосинтетического состояния аппарата клеток тест-культуры. Для пробы из точки 3 было характерно повышение индекса PI относительно контроля. Значения квантового выхода, уровни минимальной (F_0) и максимальной (F_m) флуоресценции также отличались и были выше контроля. Для пробы из точки 5 наблюдалось увеличение выделения тепловой энергии в антеннах фотосистемы II, а также снижение эффективности квантового выхода. Значение индекса PI и параметра Φ_{E0} принимали наименьшие значения в сравнении с контролем и другими мониторинговыми точками. Пробы воды из точки 6 вызвали снижение общей фотосинтетической активности клеток тест-культуры.

Заключение. Пробы воды из Старокрымского водохранилища и р. Кальчик вызвали снижение общей фотосинтетической активности клеток *Chlorella sorokiniana*, что проявлялось в значительном уменьшении параметров фотосинтетической активности и квантового выхода флуоресценции. Пробы из Павлопольского водохранилища не оказывали какого-либо значимого действия на фотосинтетическую активность клеток *Chlorella sorokiniana* и приводили к увеличению скорости прироста хлорофилла. Результаты флуориметрических методик дают возможность получить более полное представление о состоянии тест-объекта, описывая изменения в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата и эффективности его функционирования. и являются эффективным методом для оценки состояния поверхностных вод.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубков, В.А. Оценка экологического состояния реки Кальмиус города Донецка / В.А. Зубков, С.А. Игнатенко // Инновационные перспективы Донбасса. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 160–163.
2. Чудаева, Г. В. Экологическое состояние реки Кальмиус и качество воды / Г. В. Чудаева, Н. С. Подгородецкий, Е. В. Бабенко // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Керчь, 26 сентября – 01 2017 года. – Керчь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2017. – С. 184-188. – EDN ZHQMPJ.
3. Кудкоцев, Н. С. Влияние шахтных вод на состояние загрязнения поверхностных вод Донецкой Народной Республики / Н. С. Кудкоцев // Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы III Международной научной конференции, Донецк, 25 октября 2018 года / Под общей редакцией С.В. Беспаловой. Том 2. – Донецк: Донецкий национальный университет, 2018. – С. 190-193. – EDN YPAMST.
4. Нурлыгаянова, Э. Н. Загрязнения водной среды и ее тестирование / Э. Н. Нурлыгаянова, А. И. Фазлутдинова // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. – 2020. – № S1(54). – С. 68-73. – EDN TONVLZ.
5. Александрова, В. В. Определение качества природных вод методом биотестирования в полевых условиях / В. В. Александрова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 3-3. – С. 897-899. – EDN RXEAGT.
6. Маторин, Д. Н. Флуоресцентный метод оценки обилия фитопланктона в природных водоемах / Д. Н. Маторин // Вода: химия и экология. – 2012. – № 12(54). – С. 95-97. – EDN PJHJOF.
7. Сидоренко, В. М. Экспрессные флуориметрические методы мониторинга водных экологических систем / В. М. Сидоренко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6(95). – С. 156-164. – EDN KVBNLX.
8. 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.

9. Использование замедленной флуоресценции хлорофилла водорослей для биотестирования загрязнений / Д. Н. Маторин, О. В. Яковлева, Д. А. Тодоренко [и др.] // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2022. – Т. 7, № 2. – С. 339-342. – DOI 10.29039/rusjbpc.2022.0525. – EDN GHENDI.
10. Онерхан, Г. Биотестирование загрязненности озера Копя с помощью клеток *Chlorella* sp-3K / Г. Онерхан, Ш. Н. Дурмекбаева, Н. П. Ахметова // Вестник науки и образования. – 2019. – № 18(72). – С. 25-28. – EDN UOESL.
11. Strasser R.J. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples / R.J. Strasser, A. Srivastava, M. Tsimilli-Michael // Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation. – London, 2000. – P. 445–483.
12. 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. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 220 с
13. Р 52.24.808-2014. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла а. – Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2014. – 23 с.
14. 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/pp1.12693.
15. Новиков, Д. А. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте (типовые случаи) / Д. А. Новиков, В. В. Новочадов. – Волгоград: Волгоградский государственный медицинский университет, 2005. – 84 с.

Поступила в редакцию 20.05.2025 г.

MONITORING OF THE SOUTHERN PART OF THE KALMIUS RIVERBED USING THE BIOTESTING METHOD

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

The research is devoted to studying the state of surface waters in the southern part of the Kalmius riverbed, including the Pavlopol reservoir, the right tributary – the Kalchik River and the Starokrym reservoir using the biotesting method on a laboratory test culture of *Chlorella sorokiniana* cells. The biotesting method includes a fluorimetric analysis of the photosynthetic activity of the test object based on the registration of chlorophyll fluorescence induction curves. Acute toxic effects of water samples from a tributary of the Kalmius River and the Pavlopol reservoir, as well as chronic toxic effects for samples from the Kalchik River and a part of the Kalmius riverbed in the city of Mariupol were revealed. Water samples from the Starokrym reservoir had a depressing effect on the photosynthetic activity of *Chlorella sorokiniana* cells.

Keywords: biotesting, chlorophyll fluorescence, *Chlorella sorokiniana*, Kalmius River, Kalchik River, Pavlopol reservoir, Starokrym reservoir.

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.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА У ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ КАК МЕТОД БИОИНДИКАЦИИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

© 2025. Л. П. Антропова, С. В. Чуфицкий

В работе представлены результаты по оценке влияния антропогенной нагрузки на фотосинтетическую активность *U. pumila*, *T. cordata*, *A. pseudoplatanus*, *S. intermedia* и *P. acerifolia* в условиях урбанизированной среды города Донецка. Оценка осуществлялась путем регистрации световых кривых флуоресценции хлорофилла и измерения параметров кинетики флуоресценции. Результаты выявили значительные межвидовые различия: у *U. pumila* была высокая фотосинтетическая активность. *A. pseudoplatanus* оказался наиболее чувствительным к стрессу, с минимальными значениями эффективного фотохимического квантового выхода ($Y(II)$) и скорости электронного транспорта (ETR). *T. cordata* отличалась максимальным содержанием хлорофилла *a* в листовых пластинках, но сниженной эффективностью фотосинтеза, что свидетельствует об ухудшении функционирования фотосинтетического аппарата. Для деревьев видов *S. intermedia* и *P. acerifolia* отмечали увеличение рассеивания избытка световой энергии на фоне антропогенного воздействия. Полученные данные подтверждают важность комплексного анализа физиологических и морфологических показателей для выбора устойчивых видов-биоиндикаторов, пригодных для озеленения и мониторинга городских экосистем в условиях антропогенного воздействия.

Ключевые слова: фотосинтез, флуоресценция хлорофилла, антропогенная нагрузка, адаптация видов, городская среда.

Введение. Антропогенное воздействие, связанное с интенсивным развитием городской среды, индустриализацией и транспортной деятельностью, оказывает значительное влияние на состояние растительности, в том числе на древесные растения [1–3]. В условиях урбанизированных территорий растения подвергаются воздействию широкого спектра загрязнителей, включая тяжёлые металлы, оксиды азота и серы, а также мелкодисперсные частицы [4]. Древесные растения, благодаря своей долговечности, устойчивости к сезонным изменениям и способности накапливать загрязнители, являются эффективными биоиндикаторами состояния окружающей среды [5–6].

В условиях сложившейся в течение нескольких десятилетий экологической обстановки на территории Донецкого региона, характеризующейся высоким уровнем загрязнения почвы, воды и воздуха [7–10], крайне важно выявлять виды растений, способных не только выживать, но и полноценно функционировать, выполняя озеленяющие, санитарно-гигиенические и индикаторные функции. При изучении характера негативного воздействия на древесные растения немаловажную роль играет видовая принадлежность, поскольку различные виды деревьев устойчивы к отдельным факторам среды и загрязнителям. Сравнительный анализ различных видов позволяет выявить наиболее устойчивые и перспективные для использования в озеленении и мониторинге городской среды растения-индикаторы [11].

Для уточнения видовой специфики устойчивости и индикаторных свойств целесообразно анализировать деревья, уже широко используемые в насаждениях урбанизированных территорий. Для зеленых насаждений города Донецка характерен определенный набор пород деревьев, отличающихся своей территориальной распространенностью и устойчивостью к антропогенному загрязнению. Так, например,

липа устойчива к неблагоприятным условиям среды, включая загазованность и пыль, что делает её типичным представителем озеленения улиц, скверов и парков [12]. Рябина встречается в городских насаждениях реже, чем липа, но её всё чаще используют из-за декоративности и умеренной устойчивости к условиям мегаполиса. Её чувствительность к загрязнению выше, чем у липы: листья могут демонстрировать признаки некроза и хлороза при высоком уровне загрязнителей, что делает её умеренно информативной в качестве индикатора. Присутствует, как правило, в аллеях посадках и озеленении дворов [13]. Вяз часто используется в озеленении городов из-за хорошей устойчивости к засухе, загазованности и другим стрессовым факторам. Данный вид является типичным компонентом городского фитоценоза и служит моделью для изучения долгосрочного стресса [14]. Явор широко распространённый инвазивный вид, часто встречающийся в городах благодаря своей высокой скорости роста и устойчивости к различным условиям среды, имеет плотную листовую пластинку способной накапливать токсины, что отражается на флуоресценции хлорофилла [15]. Платан сравнительно редко встречается в насаждениях средней полосы России, чувствителен к загрязнению воздуха, особенно к соединениям серы и тяжёлым металлам, что делает его хорошим биоиндикатором. При этом платан обладает выраженной способностью к самоочищению, сбрасывая листья, что также может служить сигналом неблагоприятной экологической обстановки [16].

Одним из ключевых физиологических процессов, чувствительных к изменению экологических условий, является фотосинтез [17]. Определить изменения в протекании первичных фотосинтетических процессов можно с помощью методов регистрации флуоресценции хлорофилла, отличающихся высокой чувствительностью, информативностью и неинвазивным подходом к измерениям [18]. Параметры флуоресценции хлорофилла позволяют судить о функциональном состоянии фотосистемы II и общем физиологическом статусе растения, что особенно актуально при исследовании влияния стрессовых факторов антропогенного происхождения [19]. Исследования флуоресценции хлорофилла также позволяют оценивать адаптационный потенциал древесной флоры города и вырабатывать научно обоснованные рекомендации по формированию устойчивых и экологически эффективных насаждений.

Цель исследования. Оценить влияние антропогенной нагрузки на параметры флуоресценции хлорофилла у *Ulmus pumila* L., *Tilia cordata* L., *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers., *Acer pseudoplatanus* L., *Platanus acerifolia* (Aiton) Willd., произрастающих в условиях урбанизированной среды города Донецка, с целью выявления наиболее устойчивых и чувствительных к загрязнению видов-индикаторов.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись древесные растения, произрастающие на территориях с разной степенью техногенной нагрузки: территория с высоким загрязнением выхлопными газами от автомобильного транспорта – ул. Университетская и относительно экологически чистая территория центрального парка культуры и отдыха имени А.С. Щербакова в Ворошиловском районе. На рисунке 1 приведено расположение мониторинговых участков исследования, где красным цветом и символом «У» выделены все участки по ул. Университетской, зеленым и символом «П» – участки парковой зоны.

Изучаемыми видами являлись Вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), Липа мелколистная (*Tilia cordata* L.) и Рябина промежуточная (*Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.). Также на ул. Университетской изучался вид деревьев Клён белый или Явор (*Acer pseudoplatanus* L.), а на территории парка им. А.С. Щербакова – Платан клёнолистный, или гибридный (*Platanus acerifolia* (Aiton) Willd.). На рисунке 1 обозначены участки

произрастания каждого из видов: *U. pumila* L. – участки П1 и У3, *T. cordata* L. – участки П4 и У1, *S. intermedia* – П2 и У4, *P. acerifolia* – П3, *A. pseudoplatanus* – У2.

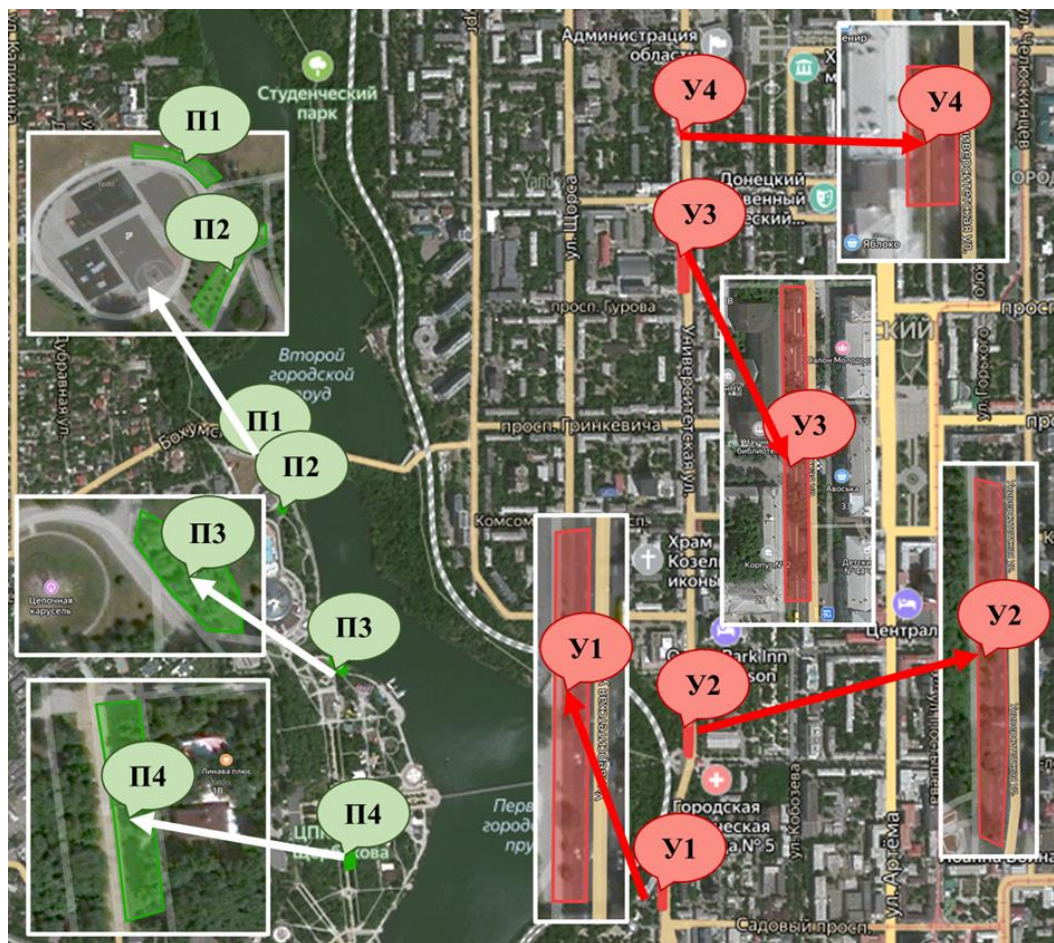


Рис. 1. Места сбора листовых пластинок: ул. Университетская: У1 – *T. cordata*, У2 – *A. pseudoplatanus*, У3 – *U. pumila*, У4 – *S. intermedia*; парк им. А.С. Щербакова: П1 – *U. pumila*, П2 – *S. intermedia*, П3 – *P. acerifolia*, П4 – *T. cordata*

Исследования были проведены летом 2024 года, в период физиологической и вегетативной активности объектов. На каждой пробной площади были выбраны визуально схожие растения, находящиеся в одинаковых условиях увлажнения и освещенности. Сбор листьев производился в утренние часы (с 09:00 до 11:00), поскольку в это время суточные колебания физиологических параметров минимальны. Для исследования были отобраны зрелые листовые пластинки, собранные в нижней, хорошо освещенной части кроны деревьев, на побегах, находящиеся в активном метаболическом состоянии. Все образцы предварительно выдерживались в темноте перед проведением замеров в течение 10–15 мин. Количество образцов составляло не менее 15 шт.

Возраст исследуемых деревьев, произрастающих на ул. Университетской составлял: *U. pumila* – 45–50 лет, *T. cordata* – 10–15 лет, *S. intermedia* – 10–15 лет, *A. pseudoplatanus* – 15–20 лет. Для растений, произрастающих в парке им. А.С. Щербакова возраст составлял для *U. pumila* – 5–10 лет, *S. intermedia* – 10–15 лет, *T. cordata* – 20–25 лет, *P. acerifolia* – 20–25 лет. Включение в исследование деревьев разного возраста дает возможность получить более полную картину адаптационных способностей видов в условиях городской среды.

Измерение параметров флуоресценции проводилось на импульсном флуориметре с функцией имаджинга «HEXAGON-IMAGING-PAM» (Heinz Walz, Германия). Протокол регистрации кинетики изменений амплитуды флуоресценции хлорофилла включал серию из 15 последовательных насыщающих световых импульсов ($4000 \text{ мкмоль} \cdot \text{квант} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ каждый). Интервал между насыщающими импульсами составлял 40 с, в течение которых образец освещался слабым измерительным светом интенсивностью $21 \text{ мкмоль} \cdot \text{фотонов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Протокол измерения световых кривых флуоресценции состоял из 13 последовательных этапов увеличения интенсивности измерительного света от 0 до $701 \text{ мкмоль} \cdot \text{фотонов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Регистрация параметров световых кривых осуществлялся в конце каждого из этапов измерения. Длительность одного этапа составляла 20 с. Параметры флуоресценции, определяемые при регистрации световых кривых и кинетики индукции флуоресценции хлорофилла, приведены в таблице 1.

Количество хлорофилла a в листьях оценивали по значению параметра F_0' .

Таблица 1

Параметры флуоресценции хлорофилла листовых пластинок

F	выход флуоресценции
F_m'	максимальная флуоресценция хлорофилла a в адаптированных к свету объектах
$F_0' = \frac{F_0}{\frac{F_v}{F_m} + \frac{F_0}{F_m'}}$	минимальная флуоресценция хлорофилла a в адаптированных к свету объектах
$Y(II) = \frac{F_m' - F}{F_m'}$	операционная эффективность фотосистемы II (эффективный фотохимический квантовый выход фотосистемы II)
$Y(NPQ) = 1 - Y(II) - \frac{1}{NPQ + 1 + qL \left(\frac{F_m}{F_0} - 1 \right)}$	квантовый выход регулируемой диссипации энергии в фотосистеме II
$Y(NO) = \frac{1}{NPQ + 1 + qL \left(\frac{F_m}{F_0} - 1 \right)}$	квантовый выход нерегулируемого рассеяния энергии в фотосистеме II
$NPQ = \frac{F_m}{F_m'} - 1$	уровень нефотохимического тушения флуоресценции по Штерну-Волмеру
$qN = 1 - \frac{F_m' - F_0'}{F_m - F_0} = 1 - \frac{F_v'}{F_v}$	коэффициент нефотохимического тушения
$qP = \frac{F_m' - F}{F_m' - F_0'}$	коэффициент фотохимического тушения
$qL = \frac{F_m' - F}{F_m' - F_0'} \cdot \frac{F_0'}{F} = qP \cdot \frac{F_0'}{F}$	коэффициент фотохимического тушения, являющийся показателем доли открытых реакционных центров фотосистемы II
$ETR = 0.50 \cdot Y(II) \cdot PAR \cdot 0.84 \left[\text{мкэкв.м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \right]$	скорость линейного переноса электронов

Вычислялось среднее арифметическое значение для всех исследуемых параметров, также определялось стандартное отклонение по выборке значений.

Результаты исследования.

Фитопатологические повреждения древесных растений в условиях урбанизированной среды. В ходе исследования, проведённого на улице Университетской и в парке им. А.С. Щербакова, были выявлены фитопатологические повреждения листового аппарата древесных растений (рис. 2), свидетельствующие о воздействии факторов окружающей среды, таких как высокая температура и недостаток влаги.

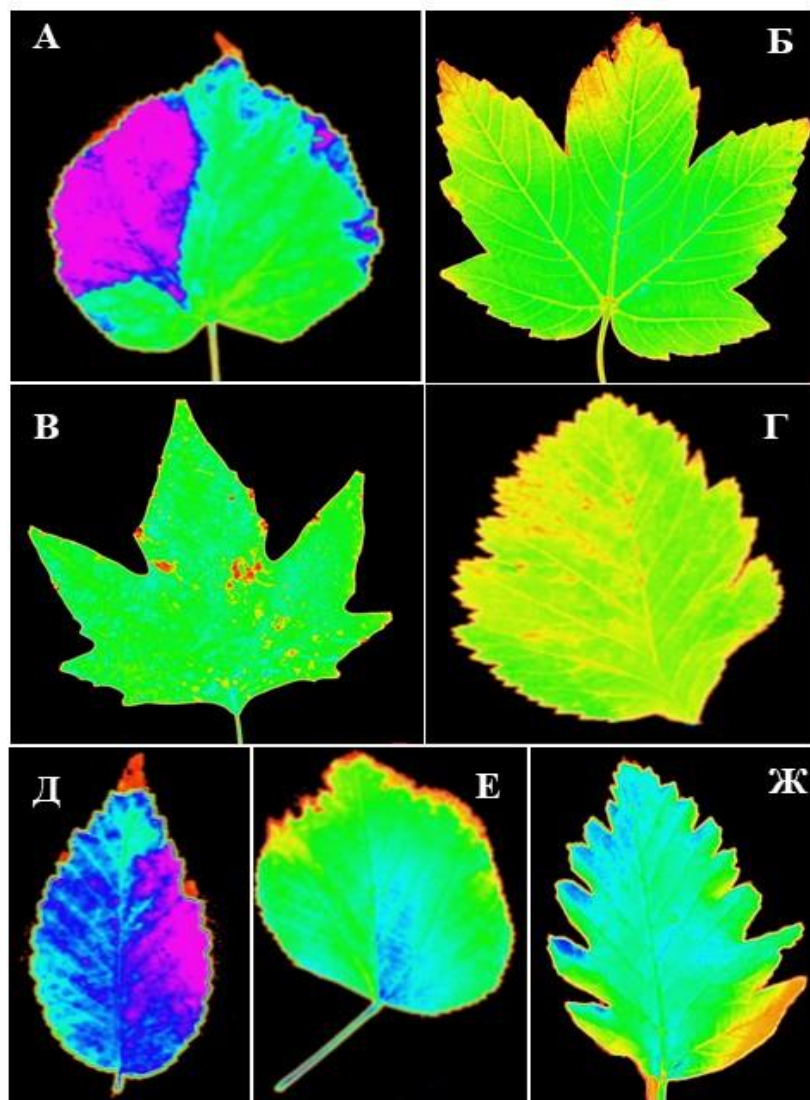


Рис. 2. Виды повреждений древесных растений на ул. Университетской и парке им. А.С. Щербакова:

А – деградация и локализация пигментов, краевой некроз *T. cordata* (П4), Б – краевой некроз *A. pseudoplatanus* (Y2), В – некротические повреждения *P. acerifolia* (П3), Г – асимметрия листа *S. intermedia* (Y4), Д – краевой некроз *U. pumila* (Y3), Е – асимметрия листа и краевой некроз *T. cordata* (Y1), Ж – асимметрия листа *S. intermedia* (П2)

На ул. Университетской, характеризующейся высокой интенсивностью автомобильного движения, у *U. pumila*, *T. cordata* и *A. pseudoplatanus* наблюдался краевой некроз листьев (рис. 2, Б, Д, Е). Вероятной причиной данного явления является

кумулятивное воздействие загрязняющих веществ, поступающих с выбросами автотранспорта, в сочетании с высокими температурами воздуха в летний период, что могло привести к нарушению водного баланса и повреждению тканей. Кроме того, у липы и рябины, произрастающих на данной территории, была зафиксирована асимметрия листовой пластинки (рис. 2, Г, Е). В парке им. А.С. Щербакова, отличающемся более благоприятными экологическими условиями, *U. pumila* не имел видимых внешних повреждений. В то же время, у *P. acerifolia* и *T. cordata* были обнаружены некротические поражения, а у *S. intermedia* – асимметрия листьев (рис. 2, А, В, Ж). Особое внимание было уделено липе, у которой, помимо некрозов, наблюдалась деградация и локализация фотопигментов (рис. 2, А), что может указывать на нарушение фотосинтетической активности и снижение общей жизнеспособности растения.

Параметры кинетики индукции флуоресценции древесных растений. На основании результатов проведённого исследования кинетики индукции флуоресценции в растениях, произрастающих на территории парка им. А. С. Щербакова, были выявлены различия в содержании хлорофилла *a* и показателях фотосинтетической активности у исследуемых видов деревьев. Установлено, что наибольшее содержание хлорофилла *a* наблюдалось у *T. cordata*, что, предположительно, может быть обусловлено адаптивными механизмами растения. Это подтверждается выявленными признаками деградации и локализации пигментов в листовых пластинках, а также наличием краевого некроза, что свидетельствует о стрессовых условиях произрастания и возможной компенсаторной активации синтеза пигментов. В то же время у *U. pumila*, *P. acerifolia* и *S. intermedia* содержание хлорофилла *a* находилось на сходном уровне (рис. 3), что может указывать на более стабильное физиологическое состояние этих видов в данных условиях.

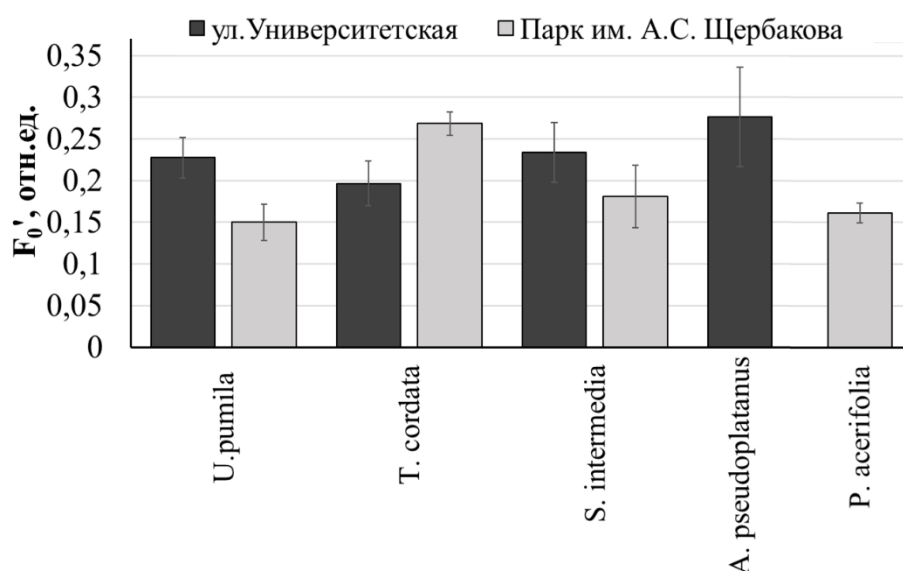


Рис. 3. Изменения уровня минимальной флуоресценции (F_0) древесных растений, произрастающих на ул. Университетской и в парке им. А.С. Щербакова

Несмотря на повышенное содержание хлорофилла *a* у липы, её общая фотосинтетическая активность оказалась наименьшей среди исследованных видов. Следом по снижению фотосинтетической активности шла рябина, тогда как у вяза и платана данный показатель соответствовал нормативным значениям. Сходную

тенденцию продемонстрировал параметр скорости передачи электронов в фотосинтетическом аппарате: наименьшие значения были зафиксированы у липы и рябины, в то время как у вяза и платана данный параметр оставался на стабильном уровне, отражающем нормальное функционирование фотосистем. Полученные данные свидетельствуют о том, что несмотря на количественное увеличение хлорофилла *a* у липы, эффективность его функционирования в процессе фотосинтеза снижена, что, вероятно, связано с физиологическим стрессом или нарушением структуры фотосинтетического аппарата.

Результаты измерений параметров световых кривых флуоресценции хлорофилла, проведённых в парке им. А. С. Щербакова, выявили выраженные межвидовые различия в фотосинтетической активности древесных растений, а также позволили установить связь между физиологическими характеристиками и морфологическими признаками стрессовых повреждений. У *T. cordata* наблюдались наибольшие значения максимального уровня флуоресценции и содержания хлорофилла *a*, однако при этом регистрировалась наиболее низкая эффективная квантовая продуктивность фотосистемы II ($Y(II)$), а также минимальные значения фотохимического тушения и скорости электронного транспорта. Эти параметры, в совокупности с высокой долей нерегулируемой диссипации энергии ($Y(NO)$) и низкими значениями NPQ и qN , свидетельствуют о деградации фотосинтетического аппарата липы и нарушениях механизмов защиты от избытка света. Эти данные хорошо согласуются с морфологическими проявлениями негативного воздействия в виде краевого некроза и неравномерного распределения фотопигментов в листовых пластинках. У *S. intermedia* отмечена высокая активность регулируемой диссипации энергии ($Y(NPQ)$), а также повышенные значения NPQ и qN по сравнению с другими видами, что указывает на функционирование эффективных защитных механизмов, компенсирующих снижение фотохимической активности. При этом эффективность фотосинтеза ($Y(II)$) и скорость электронного транспорта у рябины были выше, чем у липы, но ниже, чем у вяза и платана. Выраженная асимметрия листовой пластинки, зафиксированная у рябины, может быть связана с направленным действием стресс-факторов, что, в свою очередь, активизирует защитные физиологические реакции. У *U. pumila* и *P. acerifolia* показатели флуоресценции демонстрировали схожие между собой значения: средний уровень содержания хлорофилла *a*, высокая фотохимическая активность, высокая скорость электронного транспорта, а также высокие коэффициенты фотохимического тушения и значения параметров регулируемой диссипации. Это указывает на сохранение стабильного функционального состояния фотосистемы II и сбалансированную работу фотозащитных механизмов. Тем не менее, у платана были зафиксированы некротические повреждения листьев, что может указывать на локальные или периодические стрессовые воздействия, частично компенсируемые сохранённой фотосинтетической активностью (рис. 4).

Таким образом, выявленные различия в параметрах флуоресценции отражают степень физиологического стресса у изучаемых видов. У липы, несмотря на высокое содержание пигментов, наблюдается снижение фотосинтетической активности фотосистемы II. У рябины наблюдается активация фотозащитных механизмов на фоне умеренного снижения эффективности фотосинтеза. Несмотря на выявление краевого некроза и других некротических повреждений, вяз и платан продемонстрировали высокую фотосинтетическую активность в условиях городской среды, что свидетельствует об их относительной устойчивости к воздействию стрессовых факторов.

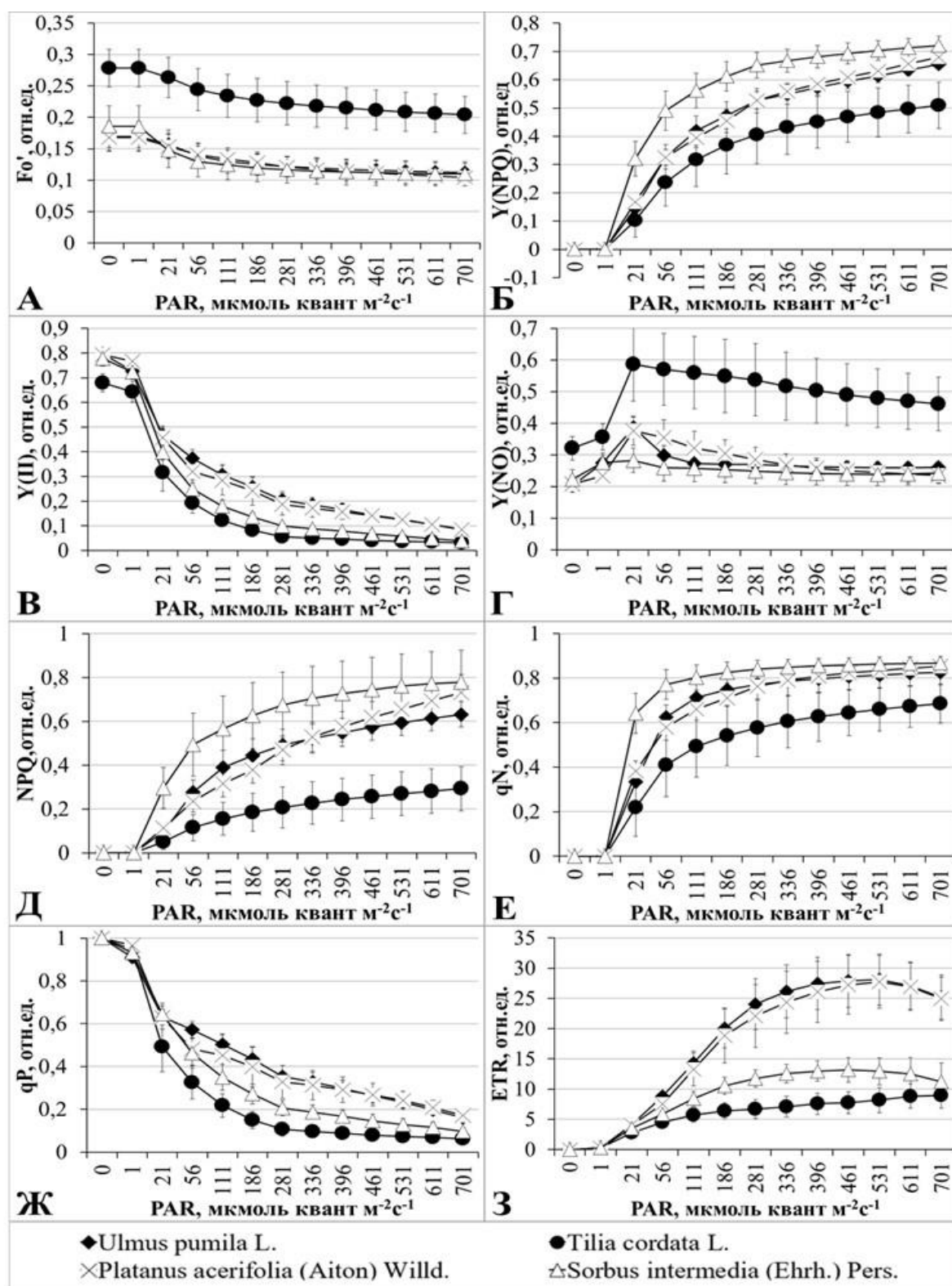


Рис. 4. Изменения параметров световых кривых флуоресценции древесных растений в парке им. А.С. Щербакова: А – уровень минимальной флуоресценции (F_0'), Б – квантовый выход регулируемой диссипации энергии в фотосистеме II ($Y(NPQ)$), В – эффективный фотохимический квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$), Г – квантовый выход нерегулируемого рассеяния энергии в фотосистеме II ($Y(NO)$), Д – уровень нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ), Е – коэффициент нефотохимического тушения (qN), Ж – коэффициент фотохимического тушения (qP), З – скорость фотосинтетического электронного транспорта (ETR)

Результаты исследования параметров световых кривых у древесных пород, произрастающих на ул. Университетской, выявили выраженные межвидовые различия, связанные как с физиологическим состоянием растений, так и с фитоповреждениями. Наибольшее содержание хлорофилла *a* было зарегистрировано у *U. pumila*, что может свидетельствовать о высокой фотосинтетической активности данного вида, несмотря на наличие краевого некроза листьев. У *A. pseudoplatanus*, *S. intermedia* и *T. cordata* содержание хлорофилла *a* оказалось ниже и находилось примерно на одном уровне, причём у липы – минимальное значение среди исследуемых видов (рис. 5, А).

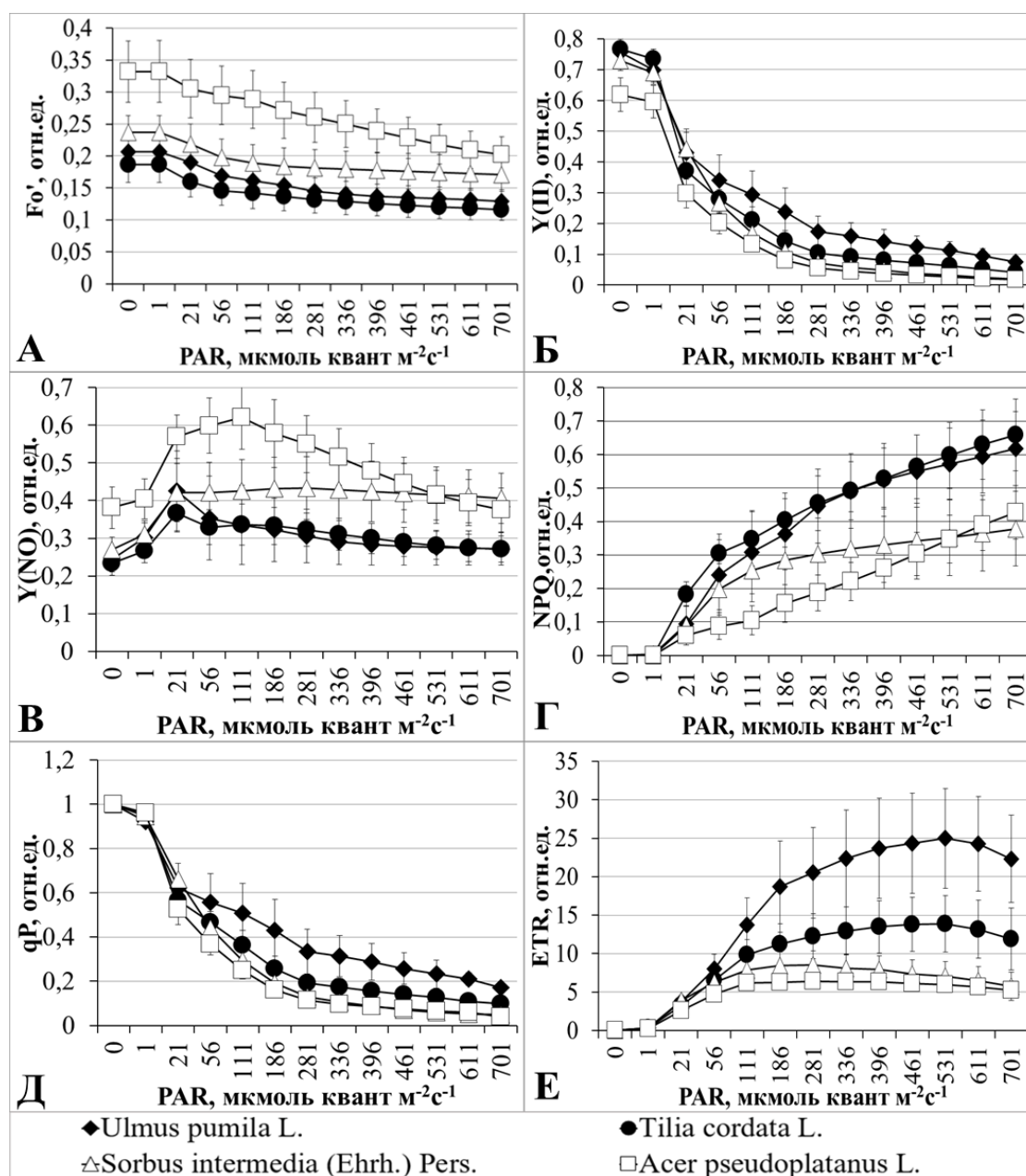


Рис. 5. Изменения параметров световых кривых флуоресценции древесных растений на ул. Университетской: А – уровень минимальной флуоресценции (F_o'), Б – эффективный фотохимический квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$), В – квантовый выход нерегулируемого рассеяния энергии в фотосистеме II ($Y(NO)$), Г – уровень нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ), Д – коэффициент фотохимического тушения (qP), Е – скорость фотосинтетического электронного транспорта (ETR)

Эффективный квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$) также был наибольшим у вяза, что согласуется с данными о высоком содержании хлорофилла a и, вероятно, указывает на сохранение функциональной активности фотосинтетического аппарата даже при наличии краевого некроза. У липы и рябины значения $Y(II)$ были несколько ниже, но сопоставимы между собой, несмотря на наличие у обоих видов асимметрии листа, а у липы также – краевого некроза. У явора эффективный квантовый выход оказался наименьшим (рис. 5, Б), что, в сочетании с высоким уровнем неконтролируемого рассеивания энергии ($Y(NO)$), может свидетельствовать о снижении способности фотосистемы к фотохимическому использованию поглощённой энергии, на неэффективность защитных механизмов диссипации и может быть следствием выраженного краевого некроза. Для рябины параметр $Y(NO)$ принимал промежуточное значение между клёном и липой. Для липы и вяза получено наименьшее значение, что указывает на устойчивость этих видов к стрессовым воздействиям (рис. 5, В). Параметр NPQ , отражающий способность рассеивать избыточную световую энергию, изменялся в зависимости от вида растений. *A. pseudoplatanus* демонстрировал наименьшие значения NPQ , в то время как рябина, липа и вяз показывали последовательное увеличение этого параметра, что предполагает более адаптированную к условиям произрастания систему фотозащиты (рис. 5, Г). Коэффициент фотохимического тушения (qP) был максимальным у вяза, что согласуется с его высокой фотохимической активностью. У остальных видов этот показатель был ниже и примерно одинаков, что указывает на менее активную работу фотосистемы II (рис. 5, Д). Скорость электронного транспорта (ETR) также достигала максимальных значений у вяза, что подтверждает его высокую фотосинтетическую продуктивность. У *T. cordata* ETR был ниже, затем следовала рябина, а у явора наблюдалось наименьшее значение (рис. 5, Е), что совпадает с другими признаками снижения эффективности фотосинтеза и высокой степенью повреждения листьев. Установленные взаимосвязи между физиологическими параметрами и визуальными признаками повреждений позволяют сделать вывод о различной степени устойчивости исследуемых видов к стрессовым условиям среды. Наибольшей устойчивостью к негативным условиям произрастания обладает вяз, тогда как явор являлся менее устойчив.

Заключение. В ходе исследования было выявлено, что наиболее устойчивым видом в условиях городской среды оказался *U. pumila*, демонстрирующий высокую фотосинтетическую активность, стабильную работу фотосистемы II и эффективные фотозащитные механизмы даже при наличии внешних признаков повреждений листовых пластин. *A. pseudoplatanus* проявил наименьшую устойчивость: были зафиксированы минимальные значения фотохимической активности, высокий уровень нерегулируемого рассеивания энергии и выраженные морфологические повреждения листьев в виде краевого некроза. *T. cordata* отличалась низкой фотосинтетической активностью, однако листовые пластины деревьев данного вида содержали наибольшее количество хлорофилла a . Фотосинтетическая активность *S. intermedia* на исследуемой территориях была выше, чем у *T. cordata*, однако не превосходила *U. pumila*. В условиях парковой территории *P. acerifolia* сохранял высокую фотосинтетическую активность при наличии локальных повреждений, что указывает на адаптацию к окружающей среде. Выявленные различия подчёркивают значимость комплексной оценки физиологических и морфологических показателей при выборе древесных видов для городского озеленения в условиях антропогенного воздействия. *U. pumila* демонстрирует высокую экологическую пластичность, сохраняя стабильную физиологическую активность независимо от возраста, что подтверждает его перспективность для массового использования в городском озеленении, включая зоны с интенсивным антропогенным воздействием. *S. intermedia* может быть рекомендована к

высадке преимущественно в рекреационных и парковых зонах, где уровень загрязнения атмосферы ниже. Вблизи автомагистралей у данного вида наблюдается значительное угнетение фотосинтетических процессов, что снижает его адаптационный потенциал в подобных условиях. *T. cordata* оказалась наименее устойчивой среди исследуемых видов и не рекомендуется для посадок в районах с интенсивным загрязнением. *P. acerifolia* демонстрирует высокую фотосинтетическую активность в парковых условиях, что делает его перспективным для использования в зонах отдыха. *A. pseudoplatanus*, напротив, демонстрирует низкую физиологическую устойчивость в условиях транспортного загрязнения, что исключает его использование вблизи магистралей.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, В. Д. Исследование факторов, мешающих росту деревьев в городской среде (на примере улицы 1-й Безымянный переулок г. Самара) / В. Д. Андреева, Т. Н. Балабанова. – Текст: непосредственный // Юный ученый. – 2020. – Т. 1, № 2 (32). – С. 2-4.
2. Влияние антропогенных факторов на состояние древесных растений г. Волгограда / Т. В. Терещенко, Г. А. Срослова, М. В. Постнова [и др.] // Природные системы и ресурсы. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 5-11. – DOI 10.15688/nsr.jvolsu.2021.1.1.
3. Кунина, В. А. Состояние фотосинтетических пигментов листьев древесных растений в условиях городской среды / В. А. Кунина, О. Г. Белоус // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2020. – Т. 6 (72), № 2. – С. 108-118. – DOI 10.37279/2413-1725-2020-6-2-108-118.
4. Федорова, Д. Г. Аккумуляция тяжелых металлов в листьях *Sorbus aucuparia* L. в условиях городской среды (на примере Г. Оренбурга) / Д. Г. Федорова // Вестник Нижневартковского государственного университета. – 2020. – № 1. – С. 55-60. – DOI 10.36906/2311-4444/20-1/09.
5. Демиденко, Г. А. Интенсивность загрязнения листьев древесных растений города Красноярск / Г. А. Демиденко // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2021. – № 4(65). – С. 123-130. – DOI 10.34655/bgsha.2021.65.4.017.
6. Соболева, С. В. Оценка загрязнения экосистемы города Красноярск биоиндикационным методом / С. В. Соболева, О. А. Есякова, И. С. Почкутов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 12-2. – С. 175-181. – DOI 10.17513/mjpf.12975.
7. Сафонов, А. И. Экологический фитомониторинг антропогенных трансформаций / А. И. Сафонов. – Донецк: Издательский дом «ЭДИТ», 2024. – 289 с. – ISBN 978-5-605-24266-6.
8. Корниенко, В. О. Деревья *POPULUS* L. в условиях урбанизированной среды Донецка / В. О. Корниенко, В. В. Реуцкая // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 24-34. – DOI 10.5281/zenodo.15005606.
9. Мирненко, Э. И. Диатомовый анализ водохранилищ, расположенных на р. Кальмиус / Э. И. Мирненко // Самарский научный вестник. – 2023. – Т. 12, № 1. – С. 82-86. – DOI 10.55355/snv2023121112.
10. Анализ состояния воздушного бассейна города Донецка и степень воздействия загрязнения атмосферного воздуха на состояние здоровья местного населения за период 2014-2022 гг. / Р. Н. Андреев, В. И. Толстюк, А. А. Бобров [и др.] // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2023. – № 1(50). – С. 85-94. – DOI 10.24412/2227-1384-2023-150-85-94.
11. Ковальчук, П. А. Исследования устойчивости деревьев г. Саратова к промышленным загрязнителям атмосферного воздуха / П. А. Ковальчук // Бюллетень медицинских интернет-конференций. – 2016. – Т. 6, № 5. – С. 657.
12. Шаяхметов, И. Ф. Механизмы природной адаптации липы мелколистной к техногенным факторам / И. Ф. Шаяхметов, Р. А. Сейдафаров // Международный научный журнал. – 2016. – № 3. – С. 46-58. – EDN WMOUQP.
13. Čaňová, I. Changes in stomatal characteristics and photochemical efficiency during leaf development in six species of *Sorbus* / I. Čaňová, J. Ďurkovič, D. Hladká, I. Lukáčik. // Photosynthetica. – 2012. – Vol. 50, No 4. – P. 635-640

14. Лепеско, В. В. Особенности роста вяза приземистого на бурых почвах Астраханской полупустыни / В. В. Лепеско, Л. П. Рыбашлыкова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 119-129.
15. Чернявская, И. В. Влияние городской среды на концентрацию фотосинтетических пигментов и интенсивность фотосинтеза растений рода Клён / И. В. Чернявская, Н. А. Домрачева, Т. Н. Толстикова. – Текст: непосредственный // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – № 1 (276). – С. 26-32.
16. Using plane tree leaves for biomonitoring of dust borne heavy metals: A case study from Isfahan, Central Iran / S. Norouzi, H. Khademi, A. F. Cano, J. A. Acosta. // Ecological Indicators. – 2015. – Vol. 57. – P. 64-73.
17. Сарсацкая, А. С. Содержание фотосинтетических пигментов у древесных пород городских насаждений / А. С. Сарсацкая // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. – 2017. – № 4(4). – С. 9-14. – DOI 10.21603/2542-2448-2017-4-9-14.
18. Использование переменной флуоресценции хлорофилла для оценки физиологического состояния фотосинтетического аппарата растений / В. Н. Гольцев, Х. М. Каладжи, М. Паунов [и др.] // Физиология растений. – 2016. – Т. 63, № 6. – С. 881-907. – DOI 10.7868/S0015330316050055.
19. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки / М. Ю. Алиева, А. Т. Маммаев, М. Х. М. Магомедова, Е. В. Пиняскина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1-3. – С. 701-704.

Поступила в редакцию 20.05.2025 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHLOROPHYLL FLUORESCENCE IN WOODY PLANTS AS A METHOD OF BIOINDICATION OF THE URBAN ENVIRONMENT

L. P. Antropova, S. V. Chufitsky

The paper presents the results of an assessment of the impact of anthropogenic stress on the photosynthetic activity of *U. pumila*, *T. cordata*, *A. pseudoplatanus*, *S. intermedia* and *P. Acerifolia* in the urbanized environment of Donetsk. The assessment was carried out by recording the light curves of chlorophyll fluorescence and measuring the parameters of fluorescence kinetics. The results revealed significant interspecific differences: *U. pumila* had high photosynthetic activity. *pseudoplatanus* turned out to be the most sensitive to stress, with minimal values of effective photochemical quantum yield (Y(II)) and electron transport rate (ETR). *T. cordata* was characterized by a maximum content of chlorophyll a in leaf blades, but reduced photosynthetic efficiency, which indicates a deterioration in the functioning of the photosynthetic apparatus. For trees of the *S. intermedia* and *P. acerifolia* species, an increase in the dispersion of excess light energy was noted against the background of anthropogenic impact. The data obtained confirm the importance of a comprehensive analysis of physiological and morphological indicators for the selection of sustainable bioindicator species suitable for landscaping and monitoring urban ecosystems under anthropogenic influence.

Key words: photosynthesis, chlorophyll fluorescence, anthropogenic load, species adaptation, urban environment.

Антропова Лилия Павловна

лаборант молодежной научно-исследовательской лаборатории мониторинга и прогнозирования экосистем Донбасса, студентка магистратуры ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: antropowalilya@yandex.ru
ORCID:0009-0000-3632-5438
AuthorID: 1250860

Antropova Liliya Pavlovna

Laboratory assistant at the Youth Research Laboratory for Monitoring and Forecasting Ecosystems in Donbass, graduate student, 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.

НОВЫЕ МАРКЕРЫ АНЕМИЧЕСКОГО СИНДРОМА У ЛИЦ, ПЕРЕНЕСШИХ COVID-19

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

В настоящее время определение понимания является ли анемия следствием COVID-19 или каких-либо других заболеваний, поиск адекватных биохимических маркеров становится актуальным. Целью исследования была проверка гипотезы, что биохимические показатели сыворотки крови, количество эритроцитов, расчет «соотношения показателей» могут служить маркерами для отличия анемического синдрома после COVID-19 от анемического синдрома другого происхождения. Концентрации S-Fer, Hb, SI, CRP и ER сравнивались между группами пациентов с анемическим синдромом после COVID-19, Influenza A, после перенесенных невирусных заболеваний. Сравнения проводились для латентной и манифестной стадий синдрома. S-Fer и CRP были определены маркерами. Для латентной стадии соотношения S-Fer/CRP, для манифестной стадии – S-Fer и CRP оказались ключевыми в определении анемических состояний после COVID-19.

Ключевые слова: ферритин, С-реактивный белок, латентная форма анемии, манифестная форма анемии, COVID-19, Influenza A.

Введение. Проблемы со здоровьем после COVID-19 сегодня находятся в центре внимания медицинской общественности [1]. Одной из наиболее распространенных является анемический синдром после COVID-19, который в настоящее время рассматривается как неинфекционная пандемия.

Анемический синдром, возникший после вирусного заболевания, может быть обусловлен изменениями обмена железа [2], которые могут сохраняться даже в постинфекционном периоде. Так, дефицит железа после COVID-19 может стать причиной хронической гипоксии или даже развития трофических нарушений в нескольких органах [3]. Более того, латентная стадия анемического синдрома наблюдалась у пациентов, проходивших реабилитацию после тяжелой COVID-19 (сопровождавшейся пневмонией третьей степени [4]). Эта стадия была выявлена у многочисленных пациентов после COVID-19 с жалобами на повышенную утомляемость и дефицит железа, в то время как клинически подтвержденного анемического синдрома еще не было [3]. В то же время обычно назначаемая терапия против анемического синдрома менее эффективна или вообще не работает, если предшествующим вирусным заболеванием был COVID-19 [5]. Логично предположить, что анемический синдром после COVID-19 может иметь иные механизмы, чем синдром невирусного происхождения, а значит, для выбора эффективной терапии необходимо учитывать основную причину анемического синдрома [6]. Это же предположение можно применить и к анемическому синдрому после Influenza A, поскольку COVID-19 и Influenza A также отличаются по течению заболевания. Потому определение происхождения анемии и подбор эффективных и несложных в проведении исследования маркеров анемии является важной проблемой.

Целью данного пилотного клинического обсервационного кросс-секционного исследования было определение показателей сыворотки крови и количество эритроцитов, расчет «соотношения показателей», которые могут служить маркерами для отличия анемического синдрома после COVID-19 от синдрома другого происхождения. В центре внимания оказались пять сывороточных рутинных

показателей, которые ассоциируются как с острыми вирусными заболеваниями, так и с анемическим синдромом: ферритин [7], гемоглобин, сывороточное железо, С-реактивный белок и эритроциты [8]. Значения показателей сравнивали между группами пациентов, перенесших анемический синдром после COVID-19, Influenza A или невирусных заболеваний, вызывающих анемию. Сравнение проводили отдельно для латентной и манифестной стадий синдрома.

Материал и методы. Исследование проведено на основании данных общего анализа крови биохимического анализа крови 77 пациентов с диагнозом латентной или манифестной стадии анемического синдрома, обратившихся за медицинской помощью в Общество с ограниченной ответственностью «Современные диагностические лаборатории», г. Краснодар в 2020–2022 гг.

Критерии включения образцов крови в исследование были следующими: пациенты в возрасте 35–65 лет (возраст наибольшей восприимчивости к заболеванию COVID-19 по классификации ВОЗ [9]; пациенты обращались за медицинской помощью через 6–7 месяцев после перенесенного заболевания COVID-19 или Influenza A аналогичной тяжести (что сопровождается пневмонией третьей степени: поражение легких 50–75 %, подтвержденное показаниями КТ), или других заболеваний, вызванных невирусной анемией; у пациентов диагностированы латентная (характеризующаяся отсутствием внешних клинических проявлений и понижением в крови уровня сывороточного железа при сохранении в пределах референсных значений уровня гемоглобина и количества эритроцитов) или манифестная (характеризующаяся появлением головокружения, одышки, синдромом хронической усталости, а также связанная с более глубокими изменениями в показателях сыворотки крови: как правило, понижение гемоглобина и сопутствующие изменения в количестве эритроцитов) стадии анемического синдрома [10]; у пациентов не было сопутствующих заболеваний, патологический процесс которых мог бы повлиять на показатели сыворотки крови; у пациентов не было вирусных инфекционных заболеваний на момент исследования; исследование крови проводилось в соответствии с порядком госпитализации или обращения пациента и до начала терапии.

Образцы крови пациентов при поступлении в стационар были получены в соответствии с порядком, установленным в больнице. Анализ крови проводился в сертифицированной аналитической лаборатории ООО «Современные диагностические лаборатории» спектрофотометрическим методом на анализаторах Sysmex-1000 (Sysmex Europe GmbH, Япония), ImmuLife-2000 (Siemens Healthcare Diagnostics Inc., США), Beckman Coulter AU480, Beckman Coulter AU5800 (Beckman Coulter, Inc., США) с использованием наборов и реагентов производителей.

Данные анализов крови выбирались из общего потока пациентов с помощью персонала в соответствии с критериями. Затем отобранные данные передавались в Кубанский государственный университет для проведения статистического анализа. Передача данных осуществлялась таким образом, что персональные данные пациента, такие как имя, идентификационный номер, пол, социальный статус и место жительства, были скрыты.

Значения биохимических показателей сравнивались между тремя группами – COVID-19, Influenza A и nVACD (невирусные заболевания, вызывающие анемию), анемический синдром которых соответствовал ранее перенесенным заболеваниям (COVID-19, Influenza A или другие невирусные заболевания, вызывающие анемию). Группа nVACD использовалась в качестве положительного контроля для групп COVID-19 и Influenza A.

Протокол №286 дизайна исследования одобрен локальным этическим комитетом Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова от 25.03.2024 г.

Описательная статистика значений показателей сыворотки крови (ферритин (S-Fer), гемоглобин (Hb), сывороточное железо (SI), С-реактивный белок (CRP) и количество эритроцитов (ER) крови), а также их соотношения для каждой экспериментальной группы (COVID-19, Influenza A и nVACD) на латентной и манифестной стадии анемического синдрома представлена в табл. 1 и табл. 2, соответственно.

Таблица 1

Описательная статистика показателей сыворотки крови и доля их соответствия референсным значениям по группам при латентной и манифестной стадии анемического синдрома

Заболевания	Формы заболеваний	Группы	N	Индикатор	S-Fer (мкмоль/л)	Hb (г/л)	SI (мкмоль/л)	CRP (г/л)	ER (п*10*9)
COVID-19	Латентная форма	1А	11	M [Q1;Q3]	73.30 [67.20; 143.50]	132 [127;135.1]	10.6 [10.2; 10.8]	0.4 [0.3; 0.6]	4.73 [4.7; 4.9]
				noNorm (n; %)	0; 0	0; 0	10; 90.9	0; 0	1; 9.1
				Norm (n; %)	11; 100	11;100	1; 9.1	11; 100	10; 90.9
COVID-19	Манифестная форма	1В	14	M [Q1;Q3]	308.8 [67.6; 374.4]	100 [91; 108]	[Q1;Q3]	[Q1;Q3]	[Q1;Q3]
				noNorm (n; %)	6; 54.5	14;100	7; 63.6	9; 75.0	3; 23.1
				Norm (n; %)	5; 45,5	0; 0	4; 36.4	3; 25.0	10; 76,9
Influenza A	Латентная форма	2А	14	M [Q1;Q3]	65.6 [55.2; 87.2]	123.35 [119.3; 128]	17.05 [11.7; 18.5]	2.24 [1.34; 3.63]	4.5 [4.2; 4.7]
				noNorm (n; %)	0, 0	4; 28,6	4; 28,6	0, 0	1; 7,1
				Norm (n; %)	14;100	10; 71,4	10; 71,4	14;100	13, 92,9
Influenza A	Манифестная форма	2В	11	M [Q1;Q3]	62.3 [58.2; 101]	111 [95.7; 120]	8.8 [5.9; 10.3]	3.25 [1; 3.6]	4.1 [3.5; 4.3]
				noNorm (n; %)	0; 0	8; 72,7	11; 100	0; 0	5; 45,5
				Norm (n; %)	11; 100	3; 27,3	0; 0	10; 100	6; 54,5
nVACD	Латентная форма	3А	10	M [Q1;Q3]	45.09 [31.5; 50.6]	120.4 [113;127]	8.7 [5.8; 11.4]	1.28 [0.87; 1.76]	4.82 [4.68; 5.1]
				noNorm (n;%)	0; 0	5; 50	8; 80	0; 0	0; 0
				Norm (n;%)	10; 100	5; 50	2; 20	10; 100	10; 100
nVACD	Манифестная форма	3В	17	M [Q1;Q3]	18.5 [15; 20.7]	97 [91;104]	3.6 [3.1; 10.3]	1.83 [1.1; 2.6]	1.83 [4.2; 4.7]
				noNorm (n; %)	9; 69.2	17; 100	11; 100	1; 5.9	4; 25.0
				Norm (n; %)	4; 30,8	0; 0	0; 0	16; 94.1	12; 75.0

Примечание: N, n – количество образцов; M – медиана; Q1 и Q3 – квартили 1 и 3; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – С-реактивный белок, ER – эритроциты; Norm – количество значений, соответствующих референсному диапазону; noNorm – количество значений за пределами референсного диапазона.

Таблица 2

Описательная статистика расчета «соотношения показателей» сыворотки крови и количества эритроцитов в группах для латентной и манифестной стадии анемического синдрома

Формы анемического синдрома	Соотношение показателей	COVID-19		Influenza_A		nVACD	
		N	M [Q1;Q3]	N	M [Q1;Q3]	N	M [Q1;Q3]
Латентная форма	ER/S-Fer	11	0.067 [0.033; 0.076]	14	0.072 [0.049; 0.077]	10	0.109 [0.092; 0.152]
	ER/Hb	11	0.036 [0.035; 0.039]	14	0.037 [0.035; 0.038]	10	0.039 [0.037; 0.046]
	ER/SI	11	0.454 [0.425; 0.471]	14	0.284 [0.224; 0.376]	10	0.567 [0.447; 0.834]
	ER/CRP	11	11.8 [8; 15.767]	14	2.065 [1.157; 3.383]	10	3.687 [2.727; 5.23]
	S-Fer/Hb	11	0.59 [0.511; 1.055]	14	0.55 [0.435; 0.715]	10	0.378 [0.26; 0.451]
	S-Fer/SI	11	9.645 [6.23; 14.069]	14	5.032 [3; 6.228]	10	4.954 [4.494; 5.616]
	S-Fer/CRP	11	233.667 [176; 273]	14	30.101 [23.739; 42.612]	10	35.746 [25.4; 55.632]
	Hb/SI	11	12.5 [11.704; 13.333]	14	7.03 [6.132; 10.496]	10	13.942 [10.482; 21.379]
	Hb/CRP	11	322 [225.167; 443.333]	14	53.112 [33.609; 89.699]	10	84.954 [68.92; 131.034]
Манифестная форма	SI/CRP	11	27 [17.286; 34]	14	8.207 [4.286; 9.786]	10	6.948 [4.943; 14.194]
	ER/S-Fer	14	0.015 [0.011; 0.068]	11	0.063 [0.037; 0.074]	17	0.249 [0.206; 0.294]
	ER/Hb	14	0.041 [0.039; 0.042]	11	0.036 [0.034; 0.039]	17	0.044 [0.04; 0.05]
	ER/SI	14	0.426 [0.299; 0.804]	11	0.453 [0.39; 0.705]	17	0.964 [0.456; 1.481]
	ER/CRP	14	0.507 [0.349; 0.978]	11	1.304 [1.138; 3.9]	17	2.389 [1.67; 5.143]
	S-Fer/Hb	14	3.113 [0.578; 3.707]	11	0.686 [0.475; 0.988]	17	0.19 [0.153; 0.209]
	S-Fer/SI	14	15.711 [7.808; 38.598]	11	9.906 [7.647; 11.553]	17	3.479 [2.99; 4.839]
	S-Fer/CRP	14	27.13 [10.588; 33.646]	11	32.178 [17.194; 47.561]	17	10.075 [6.913; 18.154]
	Hb/SI	14	10.412 [7.348; 21.569]	11	13.614 [10.777; 18.765]	17	25.484 [10.388; 31.29]
	Hb/CRP	14	11.092 [8.46; 24.49]	11	35.521 [31.946; 100.4]	17	50.556 [39.63; 88.182]
	SI/CRP	14	1.353 [0.849; 2.085]	11	2.89 [2.588; 6.1]	17	2.687 [1.409; 5.077]

Примечание: N – количество образцов; M – медиана; Q1 и Q3 – квартили 1 и 3; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты.

Графическая иллюстрация распределения результатов показателей сыворотки крови представлена на совмещенных диаграммах рассеяния на рис. 1

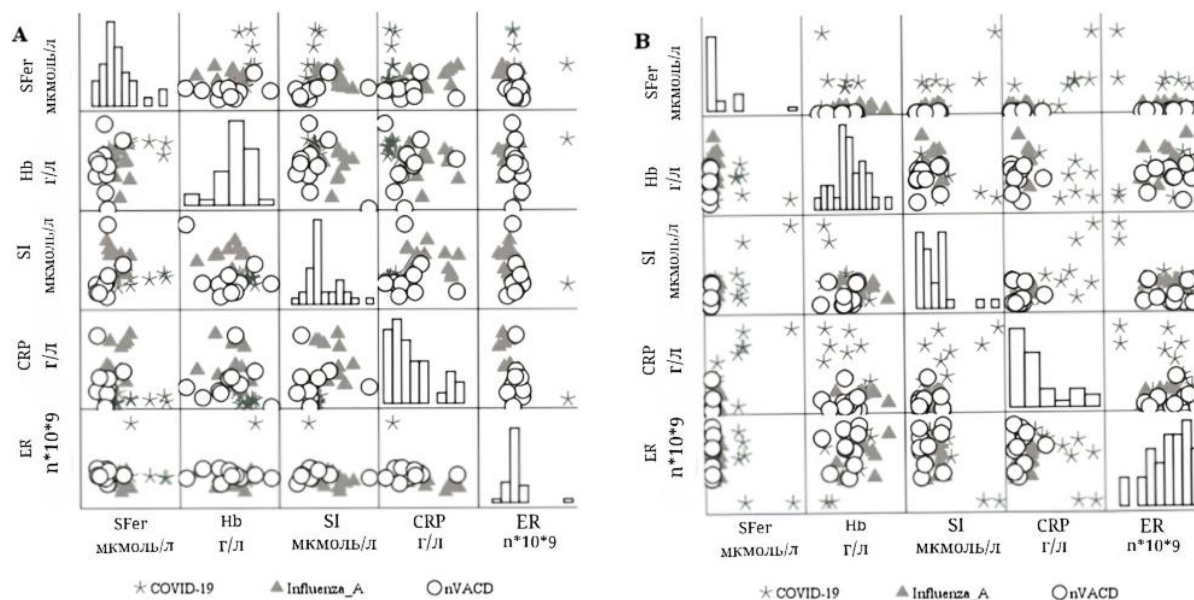


Рис. 1. Распределения значений показателей сыворотки крови и эритроцитов в группах больных COVID-19, Influenza A и nVACD, А – латентная стадия анемического синдрома, Б – манифестная стадия анемического синдрома

Для иллюстрации типа распределения данных представлены общие гистограммы каждого показателя сыворотки крови.

Статистический анализ проводился с помощью валидной статистической программы IBM SPSS Statistic v.26, дополненной для некоторых расчетов бесплатной программой WinPepi.

Линейные переменные (значения индексов) проверялись на нормальность распределения с помощью теста Шапиро-Уилка (для выборок менее 100 испытуемых) для выбора соответствующих методов параметрических или непараметрических сравнений групп. Гипотеза о том, что данные имеют нормальное распределение, была отвергнута результатами теста Шапиро-Уилка ($p < 0,05$; см. табл. 1). Таким образом, ненормальное распределение при умеренном объеме выборки обусловило использование непараметрических статистических тестов.

Для сравнения значений показателей сыворотки крови и количества эритроцитов больных между экспериментальными группами (COVID-19, Influenza A и nVACD) в латентной или манифестной стадиях анемического синдрома использовали непараметрический тест Крускала-Уоллиса. Поправка Бонферрони для множественных сравнений применялась к парным сравнениям, если нулевая гипотеза отвергалась ($p < 0,05$).

Количественные переменные показателей переводились в качественные – норма (кодировалась как 1) и ненорма (кодировалась как 0) – в соответствии с референсным диапазоном показателя. Количество значений «норма / не норма» сравнивали между группами COVID-19, Influenza A и nVACD на латентной или манифестной стадиях анемического синдрома с помощью теста χ^2 Пирсона или точного теста Фишера.

Для определения того, какой из сывороточных показателей может быть надежным маркером для распознавания генеза анемического синдрома (пост-COVID-19, Influenza A или nVACD), применялся тест «Дерево классификации» (метод CRT).

Результаты и обсуждение. Результаты сравнения экспериментальных групп по значениям показателей крови, количеству нереференсных (noNormal; вне диапазона референсных значений) значений показателей и соотношению показателей представлены в таблицах 3–5 соответственно.

Для латентной стадии концентрации S-Fer и Hb после перенесенного COVID-19 были значительно выше, чем после Influenza A или nVACD, а значения SI и CRP после Influenza A были выше, чем после COVID-19 или nVACD. Количество ER в крови пациентов после перенесенного Influenza A было ниже, чем после COVID-19 или больных с диагнозом nVACD. Таким образом, все значения показателей сыворотки крови и количество эритроцитов больных после COVID-19 или Influenza A отличались друг от друга. Значимость различий была отмечена при анализе результатов всех показателей (кроме значения ER) у больных после вирусных заболеваний, COVID-19 или Influenza A, а также определена закономерность в различии показателей.

На манифестной стадии развития анемии были отмечены следующие тенденции: значения показателей крови S-Fer, Hb, SI и CRP в группе больных после nVACD были ниже референсных значений, чем в крови больных после COVID-19 или Influenza A, а значение концентрации CRP после COVID-19 было выше, чем после Influenza A ($p < 0,05$). Показатель количества ER был одинаковым в крови всех групп пациентов.

Таблица 3

Сравнение значений показателей сыворотки крови и эритроцитов между экспериментальными группами в латентной и манифестной стадиях анемического синдрома с использованием непараметрического теста Kruskal-Wallis

Формы анемического синдрома	Показатель	N	KW тест	df	KW p	Попарные сравнения (PwC)	PwC p
Латентная форма	S-Fer (мкмоль/л)	35	16.863	2	< 0.001	Influenza_A<COVID-19	0.011
						nVACD<COVID-19	< 0.001
	Hb (г/л)	35	9.695	2	0.008	Influenza_A < COVID-19	0.018
						nVACD <COVID-19	0.022
	SI (мкмоль/л)	35	11.827	2	0.003	COVID-19<Influenza_A	0.029
						nVACD <Influenza_A	0.005
	CRP (г/л)	35	20.562	2	< 0.001	COVID-19<Influenza_A	< 0.001
						nVACD <Influenza_A	0.033
Манифестная форма	S-Fer (мкмоль/л)	35	24.793	2	< 0.001	Influenza_A < COVID-19	0.033
						Influenza_A < nVACD	0.029
	Hb (г/л)	42	6.876	2	0.032	nVACD <COVID-19	< 0.001
						nVACD <Influenza_A	0.001
	SI (мкмоль/л)	33	6.553	2	0.038	nVACD <COVID-19	0.042
						Influenza_A<COVID-19	0.011
	CRP (г/л)	39	16.821	2	< 0.001	nVACD <COVID-19	< 0.001
						ns	

Примечание: N – количество образцов; KW – непараметрический тест Крускала-Уоллиса; df – степень свободы; ns – незначимо, если значимость теста более 0,05 ($p>0,05$) и попарные сравнения недоступны; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты

Таблица 4

Взаимосвязи между нереперентными (noNorm) значениями сыворотки крови и эритроцитов между экспериментальными группами в латентной и манифестной стадиях анемического синдрома в зависимости от частоты их встречаемости с использованием теста Хи-квадрат Пирсона

Формы анемического синдрома	Показатель	N	χ^2	df	$(\chi^2) p$	Попарные сравнения поNorm по точному критерию Фишера	PwC p
Латентная форма	S-Fer (мкмоль/л)	35	Not applicable: all data is Norm				
	Hb (г/л)	35	6.955	2	0.031	COVID-19 < nVACD	0.012
	SI (мкмоль/л)	35	12.015	2	0.012	Influenza_A < COVID-19	0.004
						Influenza_A < nVACD	0.036
	CRP (г/л)	35	Not applicable: all data is Norm				
	ER (n*10*9)	35	0.892	2	0.640	ns	
Манифестная форма	S-Fer (мкмоль/л)	35	12.556	2	0.002	Influenza_A<COVID-19	0.012
						Influenza_A < nVACD	0.001
	Hb (г/л)	42	9.105	2	0.011	No pairwise differences*	
	SI (мкмоль/л)	33	9.103	2	0.011	No pairwise differences*	
	CRP (г/л)	39	22.263	2	< 0.001	Influenza_A<COVID-19	< 0.001
						nVACD <COVID-19	< 0.001
	ER (n*10*9)	40	3.620	2	0.419	ns	

Примечание: χ^2 – тест Хи-квадрат Пирсона; df – степень свободы; ns – несущественно, если значимость теста превышала 0,05 ($p>0,05$) и парные сравнения недоступны; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты; * – отсутствие значимых различий между экспериментальными группами с поправкой Бонферрони из-за малого объема выборки; Norm – количество значений, соответствующих референсному диапазону; noNorm – количество значений за пределами референсного диапазона

Для латентной стадии течения анемичного синдрома значения S-Fer и CRP всегда находились в пределах референсных значений, в то время как количество неререференсных значений концентрации SI в сыворотке пациентов, перенесших Influenza A встречалось реже, чем у пациентов после COVID-19 или после nVACD. Неререференсные значения концентрации Hb к крови пациентов после COVID-19 встречались реже, чем после nVACD, в то же время значение было одинаковым при сравнении показателей пациентов после COVID-19 или после Influenza A.

Для манифестной стадии течения анемичного синдрома неререференсные значения показателя CRP в крови пациентов после COVID-19 встречались чаще, чем после Influenza A или после nVACD. Неререференсные значения при анализе показателей S-Fe в сыворотке крови после COVID-19 встречались чаще, чем в группе больных после Influenza A.

Таблица 5

Сравнение значений соотношений показателей сыворотки крови и эритроцитов между экспериментальными группами в латентной и манифестной стадиях анемического синдрома с использованием непараметрического теста Крускала-Уоллиса

Формы анемического синдрома	Соотношение показателей	N	KW тест	df	KW p	Попарные сравнения (PwC)	PwC p
Латентная форма	ER/S-Fer	35	15.942	2	< 0.001	Influenza_A < nVACD	0.004
						COVID-19 < nVACD	< 0.001
	ER/Hb	35	4.182	2	0.124	ns	
	ER/SI	35	14.171	2	0.001	Influenza_A < COVID-19	0.011
						Influenza_A < nVACD	0.002
	ER/CRP	35	21.528	2	< 0.001	Influenza_A < COVID-19	< 0.001
	S-Fer/Hb	35	11.313	2	0.003	nVACD < Influenza_A	0.040
						nVACD < COVID-19	0.003
	S-Fer/SI	35	13.402	2	0.001	nVACD < COVID-19	0.003
						Influenza_A < COVID-19	0.006
	S-Fer/CRP	35	19.312	2	< 0.001	nVACD < COVID-19	0.004
						Influenza_A < COVID-19	< 0.001
	Hb/SI	35	13.225	2	0.001	Influenza_A < COVID-19	0.006
						Influenza_A < nVACD	0.007
Манифестная форма	ER/S-Fer	34	23.476	2	< 0.001	Influenza_A < nVACD	0.001
						COVID-19 < nVACD	< 0.001
	ER/Hb	39	12.859	2	0.002	Influenza_A < nVACD	0.001
	ER/SI	33	7.775	2	0.020	COVID-19 < nVACD	0.046
						Influenza_A < nVACD	0.049
	ER/CRP	37	16.170	2	< 0.001	COVID-19 < nVACD	< 0.001
						COVID-19 < Influenza_A	0.013
	S-Fer/Hb	35	24.211	2	< 0.001	nVACD < COVID-19	< 0.001
						nVACD < Influenza_A	0.001
	S-Fer/SI	32	18.969	2	< 0.001	nVACD < COVID-19	< 0.001
						nVACD < Influenza_A	0.003
	S-Fer/CRP	34	10.027	2	0.007	nVACD < Influenza_A	0.006
	Hb/SI	32	5.894	2	0.052	ns	
	Hb/CRP	39	16.209	2	< 0.001	COVID-19 < nVACD	< 0.001
						COVID-19 < Influenza_A	0.006
	SI/CRP	32	10.222	2	0.006	COVID-19 < Influenza_A	0.006

Примечание: KW – непараметрический тест Крускала-Уоллиса; df – степень свободы; ns – незначительно, если значимость теста более 0,05 ($p > 0,05$) и попарные сравнения недоступны; S-Fer – ферритин, Hb – гемоглобин, SI – сывороточное железо, CRP – реактивный белок, ER – эритроциты

Нереференсные значения ER встречались одинаково часто во всех группах на латентной и манифестной стадиях.

Все значения «соотношения показателей» различались между группами, за исключением значения ER/Hb на латентной стадии и Hb/SI на манифестной стадии: их значения не были группоспецифичными.

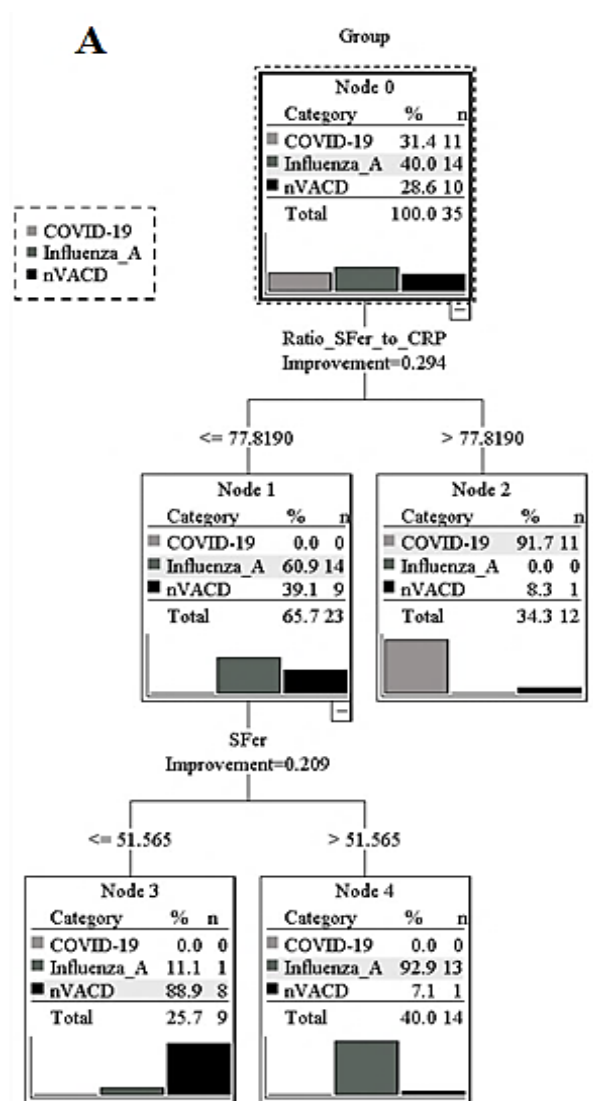
У пациентов имеющих диагноз анемичный синдром в латентной стадии все «соотношения показателей» CRP в знаменателе (ER/CRP, S-Fe/CRP, Hb/CRP и SI/CRP) были ниже результатов «соотношения» больных после Influenza A, чем после перенесения COVID-19. Аналогичная картина «соотношения показателей» наблюдалась при исследовании результатов крови у пациентов перенесших COVID-19 и Influenza A, если в качестве знаменателя в соотношениях ER/SI, S-Fe/SI и Hb/SI выступал SI.

У пациентов имеющих диагноз анемичный синдром в манифестной стадии при расчете «соотношения показателей» отмечалась следующая картина: если в качестве знаменателя выступал CRP (ER/CRP, Hb/CRP и SI/CRP), то значения «соотношения» были, в отличие от латентной стадии, ниже у пациентов после COVID-19, чем после Influenza A. Различия «соотношения» между результатами пациентов после COVID-19 и Influenza A не встречались, если в качестве знаменателя выступал SI (ER/SI, S-Fe/SI и Hb/SI).

Построение дерева решений с использованием CRT-метода классификации, проведенное с целью поиска «соотношения показателей»-маркера, способного распознать происхождение анемического синдрома, представлено на рис. 2 и рис. 3.

Для латентной стадии «правило» распознавания основано на «соотношении» S-Fer/CRP: если значение S-Fer/CRP больше 77,82, то анемический синдром развивается после перенесения COVID-19 в 91,7 % всех случаев; если значение «соотношения» меньше 77,82, а значение индекса S-Fe при этом больше 51,57, то развитие анемического синдрома стало следствием перенесенного Influenza A в 92,9 % всех случаев (рис. 2, А). Таким образом, успешное распознавание анемического синдрома пост-COVID-19 наблюдалось в 91,4 % случаев с риском в 8,6 % случаев (рис. 2, Б).

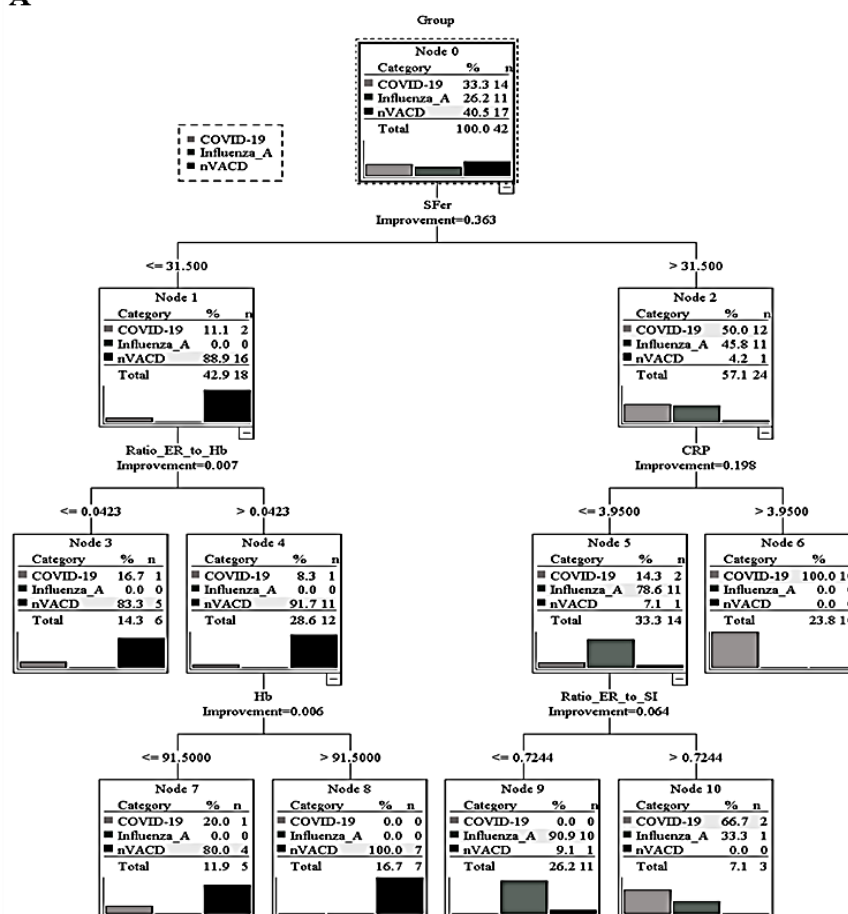
Для манифестной стадии «правило» распознавания происхождения анемического синдрома основано на значении S-Fer: если число больше 31,5, то анемический синдром вызван вирусными заболеваниями, COVID-19 или Influenza A, в 95,8 % случаев; если значение CRP для «вирусных случаев» одновременно больше 31,5, то анемический синдром вызван COVID-19 в 100 % случаев (рис. 3, А). Таким образом, успешное распознавание происхождения анемического синдрома наблюдалось в 90,5 % случаев с риском ошибки в 9,5 % (рис. 3, Б).

**Б**

Классификация				
Заболевания	COVID-19	Influenza A	nVACD	Percent correct
COVID-19	11	0	0	100 %
Influenza A	0	13	1	92.9 %
nVACD	1	1	5	80.0 %
Overall percentage	34.3 %	40.0 %	25.7 %	91.4 %

Рис. 2. Дерево решений методом CRT для определения показателей сыворотки крови, которые могут быть полезны для распознавания происхождения анемического синдрома (COVID-19, Influenza A или nVACD) в латентной стадии. А – график DT, В – результирующая таблица мощности классификации

А



Б

Классификация				
Заболевания	COVID-19	Influenza A	nVACD	Percent Correct
COVID-19	12	0	2	85.7 %
Influenza A	1	10	0	90.9 %
nVACD	0	1	16	94.1 %
Overall Percentage	31.0 %	26.2 %	42.9 %	90.5 %

Рис. 3. Дерево решений методом CRT для определения показателей сыворотки крови, которые могут быть полезны для распознавания происхождения анемического синдрома (COVID-19, Influenza A или nVACD) в манифестной стадии. А – график ДР, Б – результирующая таблица мощности классификации

Выводы. Полученные результаты исследования продемонстрировали, что состояния анемического синдрома после COVID-19, Influenza A или невирусных заболеваний (nVACD) различаются по значениям показателей крови. Это позволяет предположить, что показатели крови могут отражать информацию о происхождении синдрома.

Для течения латентной стадии анемического синдрома может быть характерно: значения показателей крови пациентов значимо различаются при сравнении постневирусного (nVACD) и поствирусного (COVID-19 или Influenza A) состояниями, а также между поствирусным состоянием, вызванным COVID-19 и поствирусным состоянием, вызванным Influenza A. Количество нерелевантных значений показателей в

крови пациентов после COVID-19 и Influenza A показало, что группы различались только по одному показателю SI; в то же время количество нереперенсных значений Hb в группе пациентов после COVID-19 было ниже, чем в группе nVACD; различий по концентрации Hb в группах пациентов после COVID-19 и Influenza A не наблюдалось. Значения «соотношения показателей» были ниже после Influenza A, чем после COVID-19, если в качестве знаменателей выступали концентрации значений CRP и SI. Именно «соотношение» концентраций S-Fe и CRP, а не значение Hb, позволяет успешно выявлять анемический синдром после COVID-19. Поэтому целесообразно рассчитывать значение S-Fe/CRP по данным анализов крови для определения латентной стадии анемического синдрома после COVID-19.

Для течения манифестной стадии анемического синдрома может быть характерно: результаты показателей сыворотки крови больных в группах после COVID-19 и Influenza A отличались только по показателю CRP, значение которого было выше в сыворотке крови больных после COVID-19. В то же время нереперенсные значения S-Fe и CRP встречались чаще в крови группы после COVID-19, чем после Influenza A. Эти показатели, S-Fe и CRP, используемые как индикаторы дефицита железа [8], а также как индикаторы воспаления, вызванные инфекцией [7], оказались ключевыми для распознавания анемического синдрома после COVID-19. Кроме того, различия между анемическим состоянием после анемии, вызванной вирусом COVID-19, и анемическим состоянием после Influenza A выявляются при использовании показателя CRP в качестве знаменателя «соотношения показателей»; если показатель S-Fe позволял определить вирусное или невирусное происхождение анемического синдрома, то показатель CRP выступал в качестве классификатора, позволяющего определить, какое вирусное заболевание (COVID-19 или Influenza A) явилось причиной анемического синдрома. Следует отметить, что определяемые значения как S-Fe, так и CRP находились в пределах референсных значений. Таким образом, для определения происхождения анемического синдрома в манифестной стадии COVID-19 следует учитывать показатели крови S-Fe и CRP.

Основными показателями, позволяющими отличить происхождение анемического синдрома после COVID-19 от анемических синдромов иной этиологии, оказались S-Fe и CRP. Это справедливо как для латентной, так и для манифестной стадии анемического синдрома.

Ограничения. Данное обсервационное кросс-секционное исследование проводилось на умеренном объеме выборки, что не позволяет проверить полученные результаты на случайной выборке как производной от экспериментальной. Кроме того, выборка ограничена одним южным регионом (Краснодарский край), что снижает прогностическую ценность результатов. Новая когорта необходима для проверки точных определяющих значений показателей, в связи с классификационными значениями которых было установлено происхождение постболезненного анемического синдрома, находящихся в пределах референсных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асфандиярова Н.С. Постковидный Синдром // Клиническая медицина. – 2022. – Т. 99. – С. 429–435. – DOI: 10.30629/0023-2149-2021-99-7-8-429-435
2. Ozdemir B. Correlation of C-Reactive Protein and Serum Iron Levels with Syntax Score // Arch. Razi Inst. – 2020. – Т. 75. – С. 413–418. – DOI: 10.22092/ari.2020.128122.1404
3. Амиров Н.Б., Давлетшина Е.И., Васильева А.Г., Фатыхов Р.Г. Постковидный синдром: мультисистемные «дефициты» // Вестн. Совр. Клин. Мед. – 2021. – Т. 14. – С. 94-104. – DOI: 10.20969/VSKM.2021.14(6).94-104

4. Бразгина Я., Бикбулатова В., Попова Н. (2022) Железодефицитная анемия на фоне COVID-19. // Клинический Случай. Актуальные исследования. – 2022. – Т. 49. – С. 66–68.
5. Garcia-Casal M.N., Pasricha S.R., Martinez R.X., Lopez-Perez L., Peña-Rosas J.P. Serum or Plasma Ferritin Concentration as an Index of Iron Deficiency and Overload // Cochrane Database Syst. Rev. – 2021. – Т. 21. – С. 114–123. - DOI: 10.1002/14651858.CD011817.pub2
6. Mei Z., Addo O.Y., Jefferds M.E., Sharma A.J., Flores-Ayala R.C., Brittenham G.M. 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 // Lancet Haematol. – 2021. – Т. 8. – С. 572–582. – DOI: 10.1016/S2352-3026(21)00168-X
7. Горенков Д.В., Хатмирова Л.М., Шевцов В.А., Рукавишников А.В., Меркулов В.А., Олефир Ю.В. Вспышка нового инфекционного заболевания COVID-19: β-коронавирусы как угроза глобальному здравоохранению // БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. – 2020. – Т. 20. – С. 6–20. – DOI: 10.30895/2221-996X-2020-20-1-6-20
8. Громова О.А., Торшин И.Ю., Шаповалова Ю.О., Курцер М.А., Чучалин А.Г. COVID-19 и железодефицитная анемия: взаимосвязь патогенеза и терапии // Акушерство. Гинекология. – 2020. – Т. 14. – С. 644–655. – DOI: 10.17749/2313-7347/OB.GYN.REP.2020.179
9. Гайдабура Е.А., Золотавина М.Л., Братова А.В. Манифестный характер биохимических показателей, участвующих в метаболизме патологического процесса при COVID-19, с учетом тяжести поражения легких // Современные проблемы науки и образования. – 2022. – Т. 13. – С. 58–58. – DOI: 10.17513/SPNO.32049
10. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Клинические рекомендации "Железодефицитная анемия". – М.: 2023. – 45 с

Поступила в редакцию 06.03.2025 г.

THE NEW MARKERS OF ANEMIA SYNDROME IN PEOPLE WHO HAVE HAD COVID-19

M. L. Zolotavina, O. Yu. Vekovishcheva, E. A. Gaidabura, T. A. Kovaleva, A. V. Bratova, O. V. Chernyavskaya

Currently, determining whether anemia is a consequence of COVID-19 or some other diseases, and the search for adequate biochemical markers is becoming relevant. The study aimed to test the hypothesis that blood serum indicators and the number of red blood cells and the calculation of the "ratio of indicators" can serve as reliable markers to distinguish post-COVID-19 anemic syndrome from a syndrome of another origin. The concentrations of S-Fer, Hb, SI, CRP, and ER were compared between groups of patients with anemic syndrome after COVID-19, influenza A or after non-viral diseases causing anemia. Comparisons were made for the latent and manifest stages of the syndrome. S-Fer and CRP were identified by markers. For the latent stage, the S-Fer/CRP ratios, for the manifest stage, S-Fer and CRP proved to be key in determining anemia conditions after COVID-19

Keywords: ferritin; C-reactive protein; latent anemia; manifest anemia; COVID-19; Influenza A

Золотавина Мария Леонидовна

кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры генетики, микробиологии и
биохимии ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный университет», г. Краснодар, РФ.
E-mail: zolotavina_m@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7835-5408,
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, RF

Вековищева Ольга Юрьевна

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Первый
Санкт-Петербургский государственный
медицинский университет им. И.П. Павлова»,
г. Санкт-Петербург, РФ
E-mail: olga.vekovischeva@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-4078-5212, AuthorID: 86226

Vekovischeva Olga Yu.

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

Гайдабура Елена Александровна

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

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

ORCID: 0000-0002-2331-1595

Gaidabura Elena A.

Master of Biological sciences, NPF Helix LLC,
Krasnodar, RF.

Ковалева Татьяна Александровна

заведующая клинико-диагностической
лабораторией ООО "Современные
диагностические технологии", г. Краснодар, РФ.

E-mail: tatyanapametova@mail.ru,

ORCID: 0009-0003-8777-3208

Kovaleva Tatyana A.

head of the Clinical diagnostic laboratory, LLC
“Modern diagnostic technologies”, Krasnodar, RF.

Братова Алла Витальевна

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

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, RF.

Чернявская Оксана Витальевна

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

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, RF.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ *TRAGOPOGON MAJOR* JACQ. КАК ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДОНБАССА

© 2025. А. В. Калинина

В работе представлены результаты исследования изменчивости морфометрических параметров особей в ценопопуляциях *Tragopogon major* Jacq., сформированных на антропогенно трансформированных экотопах г. Макеевки. Установлено, что большинству изученных признаков свойственна высокая структурная вариативность и слабая взаимная корреляция, что способствует проявлению адаптивной способности вида. В ценопопуляции (ЦП) 1, произрастающей около породного отвала, и ЦП 2 на прилегающей к МКХЗ территории зафиксировано наибольшее количество тератоморфных проявлений, что может свидетельствовать о наличии токсических компонентов в местообитаниях растений. На основании изменчивости выделены 3 группы признаков-индикаторов: экологические, эколого-биологические и таксономические. 7 из 10 признаков относятся к экологическим: высота, количество листьев, ширина верхнего листа, длина и ширина среднего листа, количество соцветий, диаметр корня. Таксономическим признаком была определена длина семянки. В качестве эколого-биологических признаков рассмотрены длина верхней листовой пластинки и длина корня. Выявленные группы признаков свидетельствуют об индикаторной чувствительности вида к внешним факторам, что подтверждает информационную значимость *T. major* для диагностики антропогенных трансформаций на территории Донбасса.

Ключевые слова: ценопопуляция, морфологические признаки, изменчивость, корреляционные связи, тератологические проявления, антропогенно трансформированная среда, *Tragopogon major* Jacq., г. Макеевка.

Введение. Диагностика состояния современных экосистем является первостепенной задачей, решение которой необходимо для обеспечения экологической безопасности человека [1–3].

Состояние биологических объектов является ответной реакцией воздействия на условия среды обитания. Растения чувствительны к изменениям как естественных, так и антропогенных факторов среды, что позволяет использовать их в качестве индикаторов изменений условий обитания [1, 3, 4]. Критерием для фитодиагностики антропогенно измененных экосистем являются специфические реакции особей на воздействие неблагоприятных факторов, проявляющиеся в виде изменений биометрических параметров особей [2, 3–6].

Изучение изменчивости морфометрических признаков и корреляционных зависимостей между ними позволяют выявить закономерности негативного влияния на растительный организм, определить особенности внутри- и межпопуляционных взаимосвязей признаков [7, 9]. Такие исследования являются перспективными и имеют практическую значимость, – они необходимы для диагностики устойчивости ценопопуляций (ЦП) в экосистемах, своевременного обнаружения изменений в окружающей среде, проведения регулярной оценки её качества, а также для принятия своевременных мер по её оптимизации [1, 6, 8, 9]. Помимо этого, важными показателями экологической нестабильности и деградации среды являются наличие у растений морфологических аномалий [9].

Tragopogon major Jacq. широко распространен в антропогенно нарушенных экотопах Донбасса. По данным предыдущих исследований вид чувствителен к

изменениям среды, ранее был изучен в качестве фитоиндикатора состояния трансформированных территорий Донецкого региона [1, 2]. Исследование направленно на подтверждение эффективного применения *T. major* для фитодиагностики качества среды и выявления антропогенного воздействия на экосистемы.

Цель работы – определить специфику изменчивости морфометрических признаков особей ценопопуляций *Tragopogon major* Jacq, сформированных в условиях антропогенно трансформированной среды Донбасса, выявить информативные признаки-индикаторы вида для целей фитомониторинга нарушенных экосистем.

Материалы и методы. Исследование ценопопуляций *Tragopogon major* Jacq. проводили в локальных антропогенно нарушенных экотопах г. Макеевки (2023–2024 гг.). ЦП изучали на следующих мониторинговых точках г. Макеевки: ЦП 1 сформирована около подножья породного отвала с южной стороны, Советский район; ЦП 2 выявлена на территории, прилегающей к Макеевскому коксохимическому заводу, Центрально-Городской район; ЦП 3 произрастает на территории частного сектора, Горняцкий район; ЦП 4 расположена в зоне жилой застройки, Центрально-Городской район, на расстоянии 2 км от Ясиновского коксохимического завода.

В ходе осуществления фитомониторинга в пределах каждой ценопопуляции были выделены пробные площадки (ПП) размером от 50 до 100 м², в зависимости от величины ЦП. Составлены геоботанические описания каждой пробной площадки, проведена фиксация морфометрических параметров 25–30 особей [9]. Выбраны 10 морфометрических признаков особей: высота (H), количество листьев (N_L), длина верхней листовой пластинки (L_{1fol}), ширина верхней листовой пластинки (W_{1fol}), длина средней листовой пластинки (L_{3fol}), ширина средней листовой пластинки (W_{3fol}), количество соцветий (N_{leaf}), длина семян (N_{Fr}), длина корня (L_{Rd}), диаметр корня (D_{Rd}).

Для определения изменчивости признаков использовали коэффициент вариации (CV, %), уровень изменчивости оценивали по шкале, разработанной С. А. Мамаевым. Для каждой ценопопуляции вычисляли матрицу корреляций, которая характеризует связь 10 морфометрических признаков особей. Анализ изменчивости признаков и структуру их связей проводили по методу, предложенному Н.С. Ростовской [11]. На основании сопоставления общей (коэффициент вариации, CV, %) и согласованной изменчивости (коэффициент детерминации, R²_{ch}) определяли принадлежность признаков к группам системных признаков-индикаторов. Идентификацию морфологических аномалий осуществляли по региональным тератологическим сводкам [1, 9].

Результаты и обсуждение. В ходе фитоценотического анализа выявлены особенности растительных сообществ пробных площадок:

ЦП 1 расположена около подножья породного отвала с южного склона. Общее проективное покрытие (ОПП) составило 85 %, высота травостоя до 35 см. Видовое богатство сообщества равно 29 видам. На участке доминирует *Festuca valesiaca* Gaudin, частное проективное покрытие (ЧПП) которого около 20 %. Содоминантом выделен *Medicago romanica* Prodan, ЧПП – 12 %. Довольно часто встречаются *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub (ЧПП – 7 %) и *T. major* (ЧПП – 5 %), остальные виды малочисленны, проективное покрытие в пределах 1%, а также единично.

ЦП 2 сформирована на территории, прилегающей к заводу, – в 20 метрах от ограждения. ОПП пробной площадки – 80 %, высота травостоя варьировала от 20 до 45 см. Видовое разнообразие – 23 вида. В сообществе доминирует *Elytrigia repens* (L.) Nevski, который составил около 27 % от общего проективного покрытия,

содоминантом является *T. major* с частным проективным покрытием 12 %. Многочисленны такие виды, как *Linaria vulgaris* Mill. (ЧПП – 7 %), *Achillea submillefolium* Klokov & Krytzka, p.p. (ЧПП – 7 %), *Cichorium intybus* L. – 5 %, доля остальных видов не превышает 3 %.

ЦП 3 выявлена на дворовой территории жилого квартала. Общее проективное покрытие ПП 80 %, высота травостоя неоднородна варьирует от 15 до 70 см. Видовое богатство составило 20 видов. На пробной площадке преобладает *E. repens*, с ЧПП около 35 %, содоминант – *Poa angustifolia* L., ЧПП – 8 %. Доля участия оставшихся видов не превышает 3 %. *T. major* произрастает на участках с невысоким травянистым покровом и в малочисленных группировках, ЧПП – 3 %.

ЦП 4 сформирована на придорожной территории в частном секторе. Пробная площадка характеризуется высоким общим проективным покрытием – 100 %. Высота травянистого покрова 55–60 см, видовое богатство – 15 видов. В фитоценозе доминирует *E. repens* 35 %, содоминируют *B. inermis* (ЧПП – 20 %), *P. angustifolia* (ЧПП – 10 %). *T. major* произрастает в значительном количестве – 7 %.

Особь ЦП 1 характеризуются наименьшими размерами, характеризуются низкими значениями морфометрических параметров (табл. 1). Уровень изменчивости признаков колеблется от низкого до повышенного. Внутрипопуляционные различия особей (CV–22,37 %) ниже межпопуляционных (CV–28,92 %).

Таблица 1

Морфометрические параметры особей *Tragopogon major* Jacq. в условиях антропогенно трансформированной среды Донбасса

Наименование признака	Значение признаков особей ценопопуляции $\bar{x} \pm S_x / CV, \%^*$			
	ЦП 1	ЦП 2	ЦП 3	ЦП 4
Высота Н, см	$\frac{53,4 \pm 3,37}{24,42}$	$\frac{70,0 \pm 3,5}{24,85}$	$\frac{51,8 \pm 2,19}{21,18}$	$\frac{65,2 \pm 5,3}{40,80}$
Количество листьев N_L , шт.	$\frac{17,0 \pm 0,3}{11,79}$	$\frac{23,7 \pm 1,0}{22,01}$	$\frac{27,7 \pm 1,39}{25,02}$	$\frac{21,7 \pm 1,54}{35,42}$
Длина верхней листовой пластинки L_{fol} , см	$\frac{5,5 \pm 0,19}{14,09}$	$\frac{7,6 \pm 0,52}{34,59}$	$\frac{11,6 \pm 1,16}{50,00}$	$\frac{9,9 \pm 0,85}{42,70}$
Ширина верхней листовой пластинки $W1_{fol}$, см	$\frac{0,7 \pm 0,02}{13,53}$	$\frac{0,8 \pm 0,05}{29,91}$	$\frac{0,4 \pm 0,02}{28,03}$	$\frac{0,7 \pm 0,07}{48,92}$
Длина средней листовой пластинки $L1_{fol}$, см	$\frac{21,7 \pm 2,37}{28,96}$	$\frac{26,7 \pm 1,28}{18,56}$	$\frac{21,63 \pm 1,31}{30,33}$	$\frac{23,7 \pm 1,78}{37,37}$
Ширина средней листовой пластинки $W3_{fol}$, см	$\frac{0,5 \pm 0,03}{15,21}$	$\frac{1,0 \pm 0,09}{34,99}$	$\frac{0,4 \pm 0,02}{23,04}$	$\frac{0,9 \pm 0,08}{46,84}$
Количество соцветий N_{leaf} , шт.	$\frac{2,3 \pm 0,27}{46,06}$	$\frac{5,0 \pm 0,55}{55,84}$	$\frac{4,5 \pm 0,36}{39,51}$	$\frac{4,0 \pm 0,43}{53,30}$
Длина семянки N_{Fr} , мм	$\frac{2,6 \pm 0,14}{14,15}$	$\frac{2,9 \pm 0,07}{8,75}$	$\frac{2,6 \pm 0,05}{8,61}$	$\frac{2,9 \pm 0,05}{8,99}$
Длина корня L_{Rd} , см	$\frac{19,1 \pm 1,56}{22,86}$	$\frac{14,9 \pm 1,22}{31,69}$	$\frac{17,8 \pm 0,46}{12,99}$	$\frac{17,2 \pm 0,72}{21,10}$
Диаметра корня D_{Rd} , см	$\frac{0,7 \pm 0,09}{34,66}$	$\frac{1,2 \pm 0,19}{59,47}$	$\frac{1,04 \pm 0,04}{18,61}$	$\frac{0,9 \pm 0,04}{22,46}$

*Примечание – $\bar{x} \pm S_x$ – среднее арифметическое значение и его ошибка; CV – коэффициент вариации, %.

Средняя связь матрицы корреляций признаков ЦП 1 составила $r = 0,14$, что указывает на их слабую скоррелированность. Низкие значения согласованных изменений признаков позволяют растениям по-разному реагировать на внешние факторы среды, что увеличивает адаптационные возможности вида. Следует отметить, что в ЦП 1 выявлена обратная зависимость высоты растений практически со всеми признаками, кроме длины среднего листа. Скорее всего, установленная особенность вызвана негативными факторами, в том числе конкуренцией. Данная ценопопуляция входит в состав наиболее сомкнутого растительного сообщества, в котором доминируют виды природной флоры.

ЦП 2 обладает высокими значениями большинства признаков растений, изменчивость которых варьирует от низкой до очень высокой. Внутрипопуляционная изменчивость ($CV=32,07\%$) превышает межпопуляционные показатели ($CV=28,92\%$). Отмечена повышенная степень корреляции между признаками, которая превышает значения всех опытных ЦП, составила $r = 0,32$.

ЦП 3 характеризуется промежуточными значениями морфометрических параметров относительно данных в вышеуказанных ценопопуляциях. Большинству признаков особей в ценопопуляции свойственна повышенная изменчивость. Внутрипопуляционные вариации признаков особей ($CV=25,53\%$) уступают межпопуляционному значению. Средняя корреляционная связь между признаками очень слабая – $r = 0,049$. В ходе анализа матрицы корреляций были выделены признаки, обладающие отрицательной корреляцией (ширина верхнего листа, ширина и длина среднего листа, длина семянки). Такая зависимость вероятнее всего указывает на адаптационные реакции к неблагоприятным условиям, что может быть связано с фитоценоотическим окружением, т.к. ценопопуляция произрастает в сообществе с явным доминированием *E. repens*, который характеризуется высокой конкурентноспособностью.

ЦП 4 характеризуется средними значениями исследуемых признаков. Выявлено, что 7 из 10 признаков обладают высоким уровнем изменчивости. Для ЦП 4 отмечена наибольшая внутрипопуляционная изменчивость ($CV=35,69\%$), которая преобладает над межпопуляционной. Скоррелированность признаков – $r = 0,21$, превышает величину связи в сравнении с ЦП 1 и ЦП 3.

Во всех популяциях *T. major* выявлена отрицательная корреляция длины семянки с большинством признаков, исключения составили количество соцветий, количество листьев, длиной корня для ЦП 1, для ЦП 2 количество соцветий, количество листьев, для ЦП 3 длина и диаметр корня. Такая зависимость может отражать наличие ограниченности ресурсов и является одним из адаптивных механизмов в антропогенно измененной среде.

По соотношению общей ($CV, \%$) и согласованной (R^2_{ch}) изменчивости выделили 3 группы признаков-индикаторов: экологические, эколого-биологические и таксономические (рис. 1). Таксономическим признаком является длина семянки, которая обладает низкими коэффициентами вариации и детерминации, идентифицируется как стабильный признак. Эколого-биологическими признаками выделены длина верхней листовой пластинки и длина корня. Они отражают скоординированную изменчивость признаков в неоднородной среде, представляют собой индикаторы системной адаптивной изменчивости. Экологическими были определены 7 признаков: высота, количество листьев, ширина верхнего листа, длина и ширина среднего листа, количество соцветий, диаметр корня. Эти признаки в большей степени зависят от влияния внешних факторов, могут быть использованы в фитомониторинге для оценки качества среды.

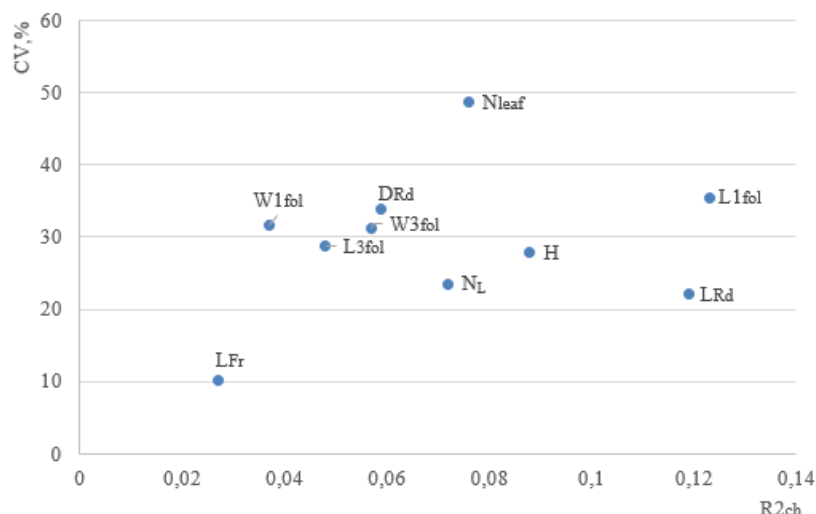


Рис. 1. Общая и согласованная изменчивость морфометрических признаков *Tragopogon major* Jacq: по оси X – согласованная изменчивость (R^2_{ch}), по оси Y – общая изменчивость (CV,%).

H – высота; N_L – количество листьев; $L1_{fol}$ – длина верхней листовой пластинки; $W1_{fol}$ – ширина верхней листовой пластинки; $L3_{fol}$ – длина средней листовой пластинки; $W3_{fol}$ – ширина средней листовой пластинки; N_{leaf} – количество соцветий, N_{Fr} – длина семянков, L_{Rd} – длина корня, D_{Rd} – диаметр корня.

В ходе обследования ценопопуляций выявлены морфологические аномалии растений. В ЦП 1 обнаружены особи с деформаций присоцветной части побега, с данным тератологическим проявлением зафиксировано 6 растений на пробной площадке (рис. 2).

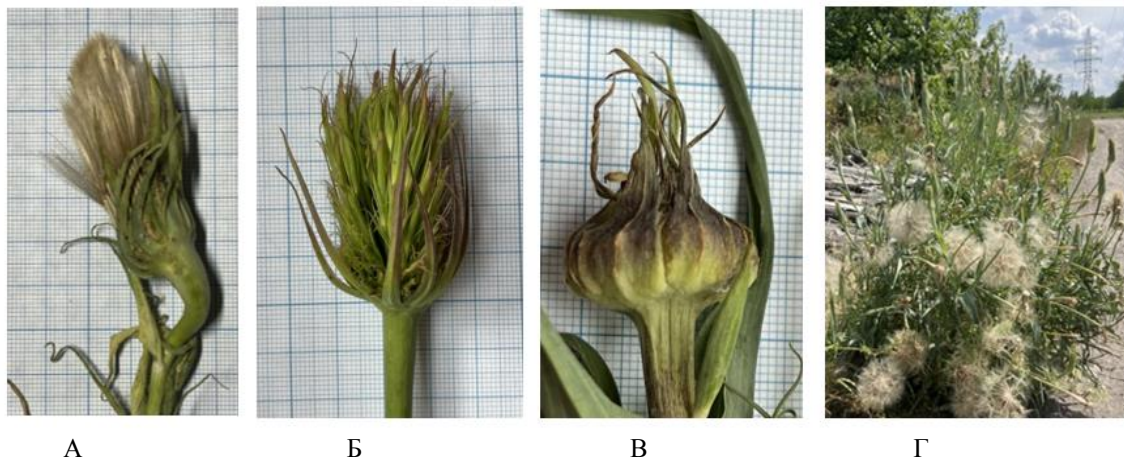


Рис. 2. Признаки тератогенеза особей *Tragopogon major* Jacq, произрастающих на антропогенно нарушенных экотопах г. Макеевки:

А – деформаций присоцветной части побега; Б – дистопия цветков на оси соцветия; В – тератная форма соцветия в результате грибковой инфекции; Г – особь с полимеризацией генеративных побегов.

В ЦП 2 выявлены особи с такими отклонения: дистопия цветков на оси соцветия, с данной тератой зафиксировали 5 особей; тератная форма соцветия в результате грибковой инфекции – 4 растения; 1 особь с полимеризацией генеративных побегов, у которой было отмечено 64 соцветия. В составе ЦП 3 обнаружены растения с усыханием нераскрывшихся бутонов 2 особи, что может быть связано с инфекцией, и

тератная форма соцветия в результате грибковой инфекции – 2 растения. В ЦП 4 тератные формы не были выявлены.

Выводы. В ходе исследования установлено, что большинство изученных признаков особей *T. major* характеризуются высокой и повышенной изменчивостью, однако обладают слабой статистической связью, т.к. коэффициент корреляции не превышает $r = 0,32$. Такая закономерность повышает адаптивные возможности вида, позволяет растениям путем слабоскоординированных структурных преобразований организма приспосабливаться к неблагоприятным факторам среды.

Определили, что ЦП 2 и ЦП 4, которые произрастают на территориях с техногенным воздействием от заводов МКХЗ и ЯКХЗ, отличаются повышением корреляционных связей между признаками, что является индикатором негативного состояния среды.

Наибольшее количество особей с тератоморфными проявлениями выявлено в ЦП 2, которая находится на прилегающей территории к МКХЗ, и ЦП 1, расположенной вблизи отвала, что свидетельствует о присутствии токсичных компонентов в окружающей среде и их зависимости от расстояния до источника загрязнения.

Особь ЦП 1 отличается наименьшими размерами и наименьшей изменчивостью признаков в сравнении с остальными исследованными ценопопуляциями. Наличие терат особей, а также отрицательная корреляционная связь высоты растений с большинством исследованных признаков указывает на негативное воздействие как со стороны фитоценоотического окружения, так и влияния породного отвала.

В результате анализа общей и согласованной изменчивости морфометрических признаков наиболее многочисленной группой установлена группа экологических признаков-индикаторов, к которой отнесли 7 признаков: высота, количество листьев, ширина верхнего листа, длина и ширина среднего листа, количество соцветий, диаметр корня. Эта группа признаков в большей степени зависит от влияния внешних факторов, а признаки могут быть использованы для целей фитомониторинга.

Для выявления постоянных признаков-критериев *T. major*, демонстрирующих воздействие негативных факторов на вид и служащих показателем качества окружающей среды, необходимы дальнейшие исследования изменчивости признаков особей *T. major* в ценопопуляциях, а также структуры ее связи.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ НИОКТР 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов А. И. Экологический фитомониторинг антропогенных трансформаций. – Донецк : Издательский дом «ЭДИТ», 2024. – 289 с.
2. Сафонов А. И. Чек-лист индикаторных признаков сорно-рудеральной фракции урбанofлоры г. Донецка (1998-2018 гг.) // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2018. – № 3–4. – С. 67–72.
3. Калинина А. В. Индикационная фенотипическая пластичность *Plantago major* L. в условиях антропогенной трансформации Донбасса // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 4. – С. 25–32. – DOI 10.5281/zenodo.14543646.
4. Калинина А. В. Изменчивость морфометрических параметров *Oenothera depressa* Greene в ценопопуляциях трансформированных экотопов г. Макеевки // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2022. – № 3-4. – С. 16–20.
5. Тохтарь В. К., Мазур Н. В. Изменчивость корреляционных структур морфологических признаков популяций *Conyza canadensis* // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 9 (104). – Вып. 15/1. – С. 247–251.

6. Тохтарь В. К., Мазур Н. В. Тенденции изменений значений морфологических признаков растений в ценопопуляциях *Conyza canadensis* (L.) Cronq. при усилении антропогенного воздействия на юго-западе среднерусской возвышенности // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2013. – № 7(160). – С. 19–23.
7. Асташенков А. Ю., Годин В. Н., Черемушкина В. А., Таловская Е. Б. Анализ функциональных признаков и структура их связей в ценопопуляциях *Panzerina lanata* (Lamiaceae) // Ботанический журнал. – 2022. – Т. 107, № 6. – С. 544–560. – DOI 10.31857/S0006813622060047.
8. Егорова Н. Н., Кардашевская В. Е. Структура изменчивости морфологических признаков *Agrostis diluta* Kurcz // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2016. – №6 (56). – С. 5–11.
9. Сафонов А. И. Терагогенез растений-индикаторов промышленного Донбасса // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 1(1). – С. 4–16. – DOI 10.22281/2686-9713-2019-1-4-16.
10. Злобин Ю. А. Популяционная экология растений: современное состояние, точки роста : Монография. – Сумы, 2009. – С. 41-43.
11. Ростова Н. С. Корреляции: структура и изменчивость. – СПб, 2002. – 308 с.

Поступила в редакцию 19.05.2025 г.

VARIABILITY OF MORPHOMETRIC TRAITS OF *TRAGOPOGON MAJOR* JACQ. AS AN INDICATOR OF THE STATE OF THE ANTHROPOGENICALLY TRANSFORMED ENVIRONMENT OF DONBASS

A. V. Kalinina

The paper presents the results of a study of the variability of morphometric parameters of individuals in the coenopopulations of *Tragopogon major* Jacq. formed in anthropogenically transformed ecotopes of the city of Makeyevka. It has been established that most of the studied features are characterized by high structural variability and weak mutual correlation, which contributes to the manifestation of the adaptive capacity of the species. In the coenopopulation (CP) 1, growing near the waste dump, and CP 2 in the territory adjacent to the MKHZ, the greatest number of teratomorphic manifestations was recorded, which may indicate the presence of toxic components in the habitats of plants. Based on the variability, 3 groups of indicator features were identified: ecological, ecological-biological and taxonomic. 7 out of 10 features are ecological: height, number of leaves, width of the upper leaf, length and width of the middle leaf, number of inflorescences, root diameter. The length of the achene was determined as a taxonomic feature. The length of the upper leaf blade and the length of the root were considered as ecological and biological characteristics. The identified groups of characteristics indicate the indicator sensitivity of the species to external factors, which confirms the informational significance of *T. major*. for the diagnosis of anthropogenic transformations in the territory of Donbass.

Key words: coenopopulation, morphological characteristics, variability, correlations, teratological manifestations, anthropogenically transformed environment, *Tragopogon major* Jacq., Makeyevka.

Калинина Анжела Викторовна,

зав. лабораторией, ассистент кафедры ботаники и экологии, младший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: kalinina.angela91@mail.ru
ORCID: 0009-0007-0789-5512
AuthorID: 1040324

Kalinina Anzhela Viktorovna

Head of the laboratory, Assistant at the Department of Botany and Ecology, Junior researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russia.

СВОБОДНОРАДИКАЛЬНЫЙ СТАТУС МАТОК ПРЕНАТАЛЬНО СТРЕССИРОВАННЫХ САМОК КРЫС НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭСТРАЛЬНОГО ЦИКЛА

© 2025. *О. Н. Кулешова, А. В. Васильева*

Одним из факторов, нарушающих программу развития плода, является стресс во время беременности. Изучали свободнорадикальный статус маток пренатально стрессированных самок крыс с учетом стадий эстрального цикла. Пренатальный стресс вызвал рост продуктов окислительной модификации белков (ОМБ) на стадии диэструса. Уровень продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) структурных липидов тела матки не претерпевал существенных изменений. В рогах матки на стадии эструса отмечено снижение уровня продуктов ПОЛ, а на стадии диэструса – их увеличение. Уровень первичных продуктов ПОЛ резервных липидов увеличивался, а конечных – снижался. Более существенные изменения уровня ПОЛ характерны для стадии эструса в рогах матки. Активность антиоксидантных ферментов после перенесенного пренатального стресса снижалась. Пренатальный стресс, изменяя базовый уровень редокс-системы, может являться фактором риска возникновения различных нарушений репродуктивной системы потомков женского пола, снижая уровень активности ферментативных антиоксидантов и вызывая карбонильный стресс.

Ключевые слова: пренатальный стресс; самки; матка; окислительная модификация белков; перекисное окисление липидов; эструс; диэструс; ферментативные антиоксиданты.

Рост рисков незачатия, невынашивания, плохой имплантации плода и других тяжелых для репродукции последствий на сегодняшний день является актуальной проблемой. Программа развития плода подвержена влиянию факторов окружающей среды. Стресс – одна из самых распространенных и недооцененных причин возникновения проблем с репродукцией у женщин. Возникновение стресса приводит к адаптивным реакциям через мобилизацию гормональных систем, изменениям в метаболизме, перераспределению ресурсов. Считается, что именно изменения в уровне гормонов стресса и половых стероидных гормонов приводят к пренатальному перепрограммированию плода [1]. Последствия влияния стресса закрепляются на протяжении всего последующего онтогенеза. Так, материнский стресс изменяет половое поведение и экспрессию гипоталамической мРНК, рецептора прогестерона и окситоцина у крысят-самок [2]. Запрограммированные изменения в нейроэндокринных системах, регулирующих репродукцию, могут играть критическую роль в определении фертильности половозрелых потомков стрессированных во время беременности матерей [3]. Несмотря на то, что морфогенез матки происходит в постнатальный период онтогенеза, функциональная способность взрослой матки определяется событиями развития, связанными с «программированием» тканей матки в пренатальный период [4].

Перенесенный пренатальный стресс связывают с изменениями уровня свободнорадикального гомеостаза организма на последующих этапах постнатального онтогенеза [5]. Различные нарушения работы отдельных систем и заболевания ассоциированы с возникновением окислительного стресса, в том числе с патологиями органов репродуктивной системы [6, 7]. Молекулы активных форм кислорода (АФК) способствуют контролю сигнальных путей, а также клеточных и физиологических процессов, однако их избыток может вызывать повреждение молекул, клеток и вызывать нарушения в реализации репродуктивных функций [8], в том числе формирования яйцеклетки, созревания яичника, стероидогенеза, фолликулогенеза и овуляции. Ряд женских репродуктивных заболеваний может быть связан с дисбалансом прооксидантов и

антиоксидантов: синдром поликистозных яичников, эндометриоз и необъяснимые бесплодие, осложнения беременности, например, повторное невынашивание, спонтанный аборт, преэклампсия также может произойти в ответ на окислительный стресс [9]. Таким образом, изменения свободно-радикального баланса могут быть предикторами различных заболеваний репродуктивной системы. В связи с этим актуальным становится изучение эффектов перенесенного пренатального стресса на уровень свободнорадикального гомеостаза матки с учетом разных стадий эстрального цикла.

Целью исследования стало изучение свободнорадикального статуса маток пренатально стрессированных самок крыс с учетом стадий эстрального цикла.

Материалы и методы. Эксперимент проведен на белых неимбредных крысах самках и их потомстве по причине схожести морфологической и функциональной организации репродуктивной системы крыс и человека [10]. Протоколы работы с животными соответствовали требованиям ГОСТ 53434-2009 «Принципы надлежащей лабораторной практики (GLP)», а также Правилам лабораторной практики и директивам Европейской Конвенции по защите позвоночных животных. Протокол исследования утверждён на заседании комиссии по биоэтике ФГБОУ ВО «Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева».

В эксперименте участвовали 16 самок крыс в возрасте 6–8 месяцев со средней массой – $240 \pm 11,4$ г. Животные содержались в стандартных условиях вивария при свободном доступе к пище (специализированный экструдированный корм для лабораторных грызунов) и воде, с освещением 12:12. У самок по соотношению основных типов клеток в мазке определяли стадию эстрального цикла [11], при обнаружении эструса к самке подсаживали самца. Первым днем беременности считали день обнаружения в мазке сперматозоидов. Беременные самки случайным образом были распределены на 2 группы: контрольные животные содержались в обычных условиях вивария; группа стресса подвергалась стрессовому воздействию. В качестве модели стресса была выбрана иммобилизация в пластиковых пеналах, ограничивающих подвижность животных, но не причиняющая им болезненных ощущений. Стрессовому воздействию самки подвергались в период с 16 по 19 дни беременности в утренние часы в течение 3 часов. С 20 дня беременности животные обеих групп и, впоследствии, их потомство негативным воздействиям не подвергались.

Дальнейшая работа проводилась на половозрелых самках – потомках стрессированных во время беременности матерей, у которых в возрасте 4 месяцев определяли стадии эстрального цикла и делили на две группы: эструс и диэструс. Таким образом, были сформированы четыре группы животных: контроль эструс (КЭ) и контроль диэструс (КДЭ), пренатальный стресс эструс (ПСЭ) и пренатальный стресс диэструс (ПСДЭ). Животных всех групп наркотизировали этиналом натрия в дозировке 4 мг / 100 г веса животного, декапетировали, матку выделяли на холоде. Ткань хранили при температуре – 20 °С, все методики по изучению свободнорадикального гомеостаза были проведены не позднее 2 недель с момента выделения ткани, 10 % гомогенаты готовили на 0,1 М фосфатном буфере с ЭДТА. Так как функционально и морфологически матка не однородна [12], уровень свободнорадикального окисления определяли в матках и рогах отдельно.

Для оценки уровня свободнорадикального окисления в ткани матки крыс определяли уровень начальных, промежуточных и конечных продуктов перекисного окисления резервных и структурных липидов (ПОЛ) – кетодиенов и сопряженных триенов, диеновых конъюгатов и оснований Шиффа по методу Волчегорского [13] с дальнейшим расчетом единиц индексов окисления (ЕИО), отражающих относительный уровень первичных (ЕИО232/220), вторичных (ЕИО278/220) и конечных (ЕИО400/220)

продуктов липопероксидации [14]. Уровень продуктов окислительной модификации белковых молекул (ОМБ) определяли по методу Дубининой [15]. Уровень антиокислительной защиты ткани оценивали по уровню активности супероксиддисмутазы – СОД [16] и каталазы [17], уровню глутатиона [18]. Для пересчета активности СОД и модифицированных белков на грамм белка, определяли общий белок методом Бредфорда [19].

Так как объем выборок является недостаточным для оценки характера распределения данных, для определения статистической значимости различий между экспериментальными группами применяли непараметрический U-критерий Манна-Уитни, данные представлены в виде Me [Q1;Q3].

Результаты. Свободнорадикальный гомеостаз в теле матки в норме. На стадии эструса по сравнению с диэструсом отмечено увеличение продуктов ОМБ на стадии элонгации (таблица 1) и снижение концентрации первичных продуктов ПОЛ. Отмечено так же снижение уровня восстановленного глутатиона. **В рогах матки** изменение интенсивности свободнорадикальных процессов носило аналогичный характер: отмечено увеличение продуктов ОМБ на стадии элонгации и снижение продуктов ПОЛ в эструсе (таблица 2). Для активности антиоксидантной ферментативной системы было характерно увеличение активности СОД и снижение уровня активности каталазы. Анализ результатов суммарного ОМБ показал, что различия в уровне ОМБ в матке в зависимости от стадии цикла отсутствуют.

Таблица 1

Свободнорадикальный гомеостаз в теле матки пренатально стрессированных самок крыс на разных стадиях эстрального цикла, Me [Q1;Q3]

		Эструс			Диэструс		
		Контроль n = 8	Пренаталь- ный стресс n = 8	↑↓	Контроль n = 8	↑↓	Пренатальный стресс n = 7
СОД, А у.е/мин*мг белка		0,933 [0,921; 0,958]	0,778 [0,616; 0,982]	–	0,946 [0,883; 0,974]	–	0,926 [0,696; 1,165]
ОМБ, нмоль на мг белка в 1 мл	АКДФГ основного характера	0,107 [0,100; 0,114]	0,171 [0,155; 0,181] *	↑	0,155 [0,133; 0,174] ##	↑	0,155 [0,147; 0,167]
	ААДФГ основного характера	0,636 [0,557; 0,765]	0,649 [0,598; 0,761]	–	0,563 [0,510; 0,608] ##	↓	0,675 [0,665; 0,681] **
	АКДФГ нейтрального характера	1,529 [1,312; 1,855]	1,434 [1,237; 1,669]	–	1,169 [1,083; 1,281] ##	↓	1,448 [1,413; 1,489] **
	ОМБ на стадии элонгации	1,49 [1,250; 1,673]	1,346 [1,178; 1,578]	–	1,143 [1,019; 1,205] ##	↓	1,360 [1,336; 1,384] **
	ОМБ на стадии инициации	1,651 [1,530; 1,869]	2,411 [2,033; 2,567] **	↑	1,789 [1,615; 1,959]	–	2,486 [2,432; 2,554] **
Продукты СРО резервных липидов триацилглицер идов) Гептан	Диеновые Конъюгаты	0,406 [0,401; 0,410]	0,485 [0,481; 0,495] *	↑	0,485 [0,481; 0,495] ##	↑	0,506 [0,494 ; 0,519] **
	Кетотриены и сопр. Триены	0,071 [0,064; 0,077]	0,053 [0,045; 0,065]	–	0,072 [0,068; 0,083]	–	0,065 [0,062; 0,075]
	Основания Шиффа	0,012 [0,009; 0,017]	0,002 [0,001; 0,003] **	↓	0,011 [0,009; 0,013]	–	0,004 [0,003; 0,004] **
Продукты СРО структурных (мембранных) фосфолипидов Изопропанол	Диеновые Конъюгаты	1,778 [1,628; 1,975]	1,083 [1,031; 1,119] **	↓	1,413 [1,212; 1,758]	–	1,793 [1,486; 1,885]
	Кетотриены и сопр. Триены	2,848 [2,526; 3,295]	3,174 [2,155; 3,795]	–	5,834 [3,675; 6,950] ##	↑	4,942 [3,830; 5,450]
	Основания Шиффа	0,208 [0,142; 0,233]	0,239 [0,183; 0,306]	–	0,177 [0,154; 0,262]	–	0,182 [0,163; 0,190]

Продолжение табл. 1

Глутатион,	0,394 [0,327; 0,426]	0,358 [0,341; 0,378]	–	0,541 [0,402; 0,598] #	↑	0,395 [0,363; 0,405] *	↓
Каталаза, мКАТ/л *10 ³	495,5 [491,51; 499,5]	436,61 [397,27; 467,582] *	↓	524,7 [513,3; 550,4]	–	440,8 [415,1; 446,2] **	↓

Примечание: статистически значимые различия между контрольными и опытными животными обозначены для уровней статистической значимости $p < 0.05$ – *, $p < 0.01$ – **, между контрольными самками на разных стадиях цикла – $p < 0.05$ – #, $p < 0.01$ – ## (критерий Манна-Уитни); СРО – свободнорадикальное окисление, АКДФГ – алифатические кетон-динитрофенилгидразоны, ААДФГ – алифатические альдегид-динитрофенилгидразоны

Таблица 2

Свободнорадикальный гомеостаз в рогах матки пренатально стрессированных самок крыс на разных стадиях эстрального цикла, Ме [Q1;Q3]

		Эструс			Диэструс			
		Контроль n = 8	Пренатальный стресс n = 8	↑↓	Контроль n = 8	↑↓	Пренатальный стресс / n = 7	↑↓
СОД, А у.е/мин*мг белка		0,738 [0,544; 0,875]	0,683 [0,526; 0,825]	—	0,936 [0,834; 0,968] #	↑	0,820 [0,794; 0,860]	—
ОМБ, нмоль на мг белка в 1 мл	АКДФГ основного характера	0,116 [0,114; 0,139]	0,195 [0,141; 0,221] *	↑	0,158 [0,123; 0,183] ##	↑	0,183 [0,166; 0,199]	—
	ААДФГ основного характера	0,695 [0,637; 0,739]	0,578 [0,565; 0,606] **	↓	0,524 [0,492; 0,598] #	↓	0,816 [0,768; 0,897] **	↑
	АКДФГ нейтрального характера	1,634 [1,541; 1,725]	1,308 [1,201; 1,388] **	↓	1,150 [1,026; 1,183] #	↓	1,645 [1,515; 1,706] **	↑
	ОМБ на стадии элонгации	1,537 [1,415; 1,639]	1,235 [1,145; 1,312] **	↓	1,069 [0,954; 1,107] ##	↓	1,676 [1,599; 2,014]**	↑
	ОМБ на стадии инициации	8,499 [7,959; 9,541]	11,479 [11,192; 11,667] **	↑	9,554 [8,910; 10,371]	—	13,807 [12,924; 14,288] **	↑
Продукты СРО резервных липидов (триацилгли церидов)	Диеновые Конъюгаты	0,408 [0,401; 0,413]	0,506 [0,500; 0,560] **	↑	0,506 [0,498; 0,526] ##	↑	0,527 [0,510; 0,541]	—
	Кетотриены и сопр. Триены	0,067 [0,062; 0,075]	0,075 [0,072; 0,079]	—	0,104 [0,090; 0,126] ##	↑	0,107 [0,085; 0,137]	—
	Основания Шиффа	0,014 [0,012; 0,016]	0,003 [0,003; 0,005] **	↓	0,018 [0,017; 0,027] #	↑	0,003 [0,003; 0,004] **	↓
Продукты СРО структурных (мембранных) фосфолипидов	Диеновые Конъюгаты	1,730 [1,570; 2,024]	0,893 [0,804; 0,925] **	↓	1,333 [1,133; 1,987]	—	1,127 [0,985; 1,284]	—
	Кетотриены и сопр. Триены	3,206 [2,909; 3,780]	1,855 [1,610; 2,833] *	↓	3,089 [2,431; 3,281] #	↑	2,568 [1,679; 3,257]	—
	Основания Шиффа	0,327 [0,264; 0,400]	0,193 [0,169; 0,221] *	↓	0,250 [0,200; 0,294]	—	0,155 [0,128; 0,189] *	↓
Глутатион,		0,410 [0,404; 0,448]	0,304 [0,286; 0,335] **	↓	0,404 [0,368; 0,480]	—	0,355 [0,332; 0,409]	—
Каталаза, мКАТ/л *10 ³		503,3 [482,8; 528,4]	410,2 [390,2; 432,6] **	↓	416,2 [398,2; 432,9] ##	↓	404,0 [364,3; 446,2]	—

Примечание: статистически значимые различия между контрольными и опытными животными обозначены для уровней статистической значимости $p < 0.05$ – *, $p < 0.01$ – **, между контрольными самками на разных стадиях цикла – $p < 0.05$ – #, $p < 0.01$ – ## (критерий Манна-Уитни); СРО – свободнорадикальное окисление, АКДФГ – алифатические кетон-динитрофенилгидразоны, ААДФГ – алифатические альдегид-динитрофенилгидразоны

Пренатальный стресс повлиял и на уровень продуктов окисления, и на уровень активности антиоксидантов в матках самок крыс. Во время эструса отмечен рост продуктов ОМБ на стадии инициации для тела и рогов матки и снижение на стадии элонгации только в рогах матки. Во время диэструса продукты ОМБ увеличились вне зависимости от отдела матки. Суммарная ОМБ показала, что увеличение уровня продуктов окислительной модификации белковых молекул происходило только на стадии диэструса.

Во время эструса в рогах и теле матки отмечен рост первичных продуктов перекисного окисления резервных липидов и снижение конечных продуктов перекисного окисления резервных липидов (ПОРЛ), снижение уровня первичных продуктов перекисного окисления структурных липидов (ПОСЛ). В рогах матки также отмечено снижение вторичных и конечных продуктов ПОСЛ. В период диэструса отмечено снижение конечных продуктов ПОРЛ в теле и рогах матки и рост ПОРЛ только в теле матки. На стадии диэструса уровень ПОСЛ в теле матки остался неизменным, а в рогах матки отмечено снижение уровня их конечных продуктов.

Изменений в уровне активности СОД под влиянием пренатального стресса не отмечено. Уровень восстановленного глутатиона уменьшился во время эструса в рогах матки и диэструса в теле матки пренатально стрессированных самок крыс. Для активности каталазы характерно уменьшение активности в матках вне зависимости от стадии эстрального цикла, в рогах матки уменьшение активности фермента произошло только на стадии эструса.

Обсуждение. В норме в проэструсе и эструсе отмечаются повышенная пролиферативная активность, цитодифференцировка и высокая секреторная активность покровных и железистых эпителиоцитов матки, в то время, как в диэструсе интенсивность этих процессов снижается. Пролиферация клеток эндометрия реализуется за счет общего действия эстрогенов, прогестерон вызывает их дифференцировку и созревание. Снижение концентрации эстрогенов и прогестерона приводит к массовому апоптозу клеток эндометрия [20]. Рост продуктов ОМБ и как следствие развитие карбонильного стресса может свидетельствовать о более существенном, по сравнению с обычными животными, увеличении метаболического напряжения в матке пренатально стрессированных животных и ее отделах на стадии диэструса. Стадия эструса является функционально более важной, в нашей работе мы отметили, что увеличение альдегид-производных (первичных продуктов) ОМБ сопровождается снижением кетон-производных (конечных продуктов) ОМБ. Снижение уровня ОМБ у пренатально стрессированных самок крыс может быть связано также и со снижением метаболической активности органа, рост которой характерен для матки на этой стадии цикла у животных, развивающихся в нормальных условиях.

Активность протекания свободнорадикальных реакций в женском организме во многом модулируется уровнем гормональной активности. Показано, что уровень половых гормонов пренатально стрессированных самок крыс в сыворотке крови соответствует уровню овариэктомированных животных, формируя гипоестрогенный фон вне зависимости от стадии эстрального цикла [21] на фоне роста гормональной активности гипофиза. Таким образом, одной из возможных причин наблюдаемых изменений метаболической активности органа может являться рассогласование гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси, вызванное пренатальным стрессом.

Уровень ПОЛ структурных липидов тела матки остался без существенных изменений, одновременно, в рогах на стадии эструса отмечено снижение их уровня, а на стадии диэструса – увеличение. Уровень первичных продуктов ПОЛ резервных

липидов увеличивался, а конечных – снижался. Более существенные изменения уровня ПОЛ характерны для стадии эструса в рогах матки. Несмотря на общий план строения рогов и матки крысы, они имеют некоторые морфофункциональные отличия, выражающиеся в большей толщине стенки матки, в рогах матки наибольшую толщину имеет эндометрий, а в шейке матки – миометрий, выявлены отличия и в расположении и морфологии желез эндометрия [22]. Морфологические особенности строения рогов и тела матки определяются их функциональной нагрузкой: тело матки крысы участвует в родовом акте, а маточные рога приспособлены для вынашивания. Известно, что пренатальный стресс оказывает влияние на соотношение мышечного и эндометриального слоев в матке [1].

Изменения уровня свободнорадикальных процессов происходит в соответствии с уровнем активности антиоксидантной системы. Изменение уровня активности СОД не было отмечено ни в одном из рассмотренных отделов матки. Более значительные изменения уровня активности антиоксидантной системы у пренатально стрессированных самок крыс наблюдаются в ткани тела матки по сравнению с рогами. Одним из известных механизмов, оказывающих влияние на уровень экспрессии ферментативных антиоксидантов являются эпигенетические изменения, происходящие под влиянием пренатального стресса. К ним относят молекулярные метки (метилование генов, ацетилирование гистонов), регулирующие активности генов, но не изменяющие первичную структуру ДНК [23].

Заключение. Баланс СРО и антиоксидантная защита (АОЗ) отражает уровень адаптационных возможностей ткани и органов, рисков возникновения и развития метаболических расстройств, уровень активности регуляторных метаболических механизмов. Нами было обнаружено, что метаболическая активность в матке пренатально стрессированных самок крыс претерпевает значительные изменения, особенно на стадии эструса. В большей степени эти изменения затронули белковый обмен, вызвав карбонильный стресс. После перенесенного пренатального стресса отмечены разнонаправленные изменения уровня продуктов ПОЛ в матке самок крыс, с преобладанием снижения уровня продуктов ПОЛ. Рост продуктов ПОЛ характерен для первичных продуктов ПОЛ резервных липидов в теле матки вне зависимости от стадии цикла, в рогах матки – только на стадии эструса, с последующим снижением уровня их конечных продуктов. Для структурных липидов характерно снижение уровня ПОЛ.

Активность антиоксидантных ферментов после перенесенного пренатального стресса снижалась, однако, имела некоторую специфику в зависимости от стадии цикла и отдела матки. Более значительное снижение рассмотренных параметров было характерно для тела матки. Таким образом, пренатальный стресс, вызывая снижение активности антиоксидантной системы и карбонильный стресс в матках, может являться фактором риска возникновения различных нарушений в репродуктивной системе потомков женского пола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменение морфометрических характеристик матки крыс под действием пренатального стресса. [Текст] / С.Г. Пивина, В.В. Ракицкая, Т.С. Шамолина и др. // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2010. – Т. 96, № 6. – С. 621-626.
2. Prenatal undernutrition suppresses sexual behavior in female rats. [Текст] / M. Toshiya, M. Munkhsaikh, I. Takeshi et al. // Gen. Comp. Endocrinol. – 2018. – Vol. 269. – P. 46-52.
3. Neil, P.E. Prenatal programming of neuroendocrine reproductive function. [Text] / P.E. Neil, M. Bellingham, J.E. Robinson // Theriogenology. – 2016. – Vol. 86. – P. 340-348.
4. Uterine glands: development, function and experimental model systems. [Text] / S.C. Paul, E.S. Thomas, F.B. Frank et al. // Mol. Hum. Reprod. – 2013. – Vol. 19, No 9. – P. 547–558.

5. Особенности свободнорадикального гомеостаза ЦНС половозрелых самцов крыс в зависимости от длительности пренатального стресса. [Текст] / О.Н. Кулешова, Д.Л. Теплый, Д.Д. Теплый и др. // Нейрохимия. – 2021. – Т. 38, № 2. – С. 149-153.
6. Гречканев, Г.О. Роль перекисного стресса в патогенезе хронического эндометрита и возможности его коррекции. [Текст] / Г.О. Гречканев, Т.М. Мотовилова, Н.Н. Никишов и др. // Медицинский альманах. – 2018. – Т. 52, № 1. – С. 133–137.
7. Боровкова, Н.В. Апоптоз клеток эндометрия в норме и при пролиферативных заболеваниях матки. [Текст] / Н.В. Боровкова, М.М. Дамиров, О.Н. Олейникова // Журнал им. Н. В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». – 2016. – №2. – С. 48-52.
8. The role of oxidative stress and antioxidant balance in pregnancy. [Text] / T. Hussain, G. Murtaza, E. Metwally at al. // Mediators Inflamm. – 2021. – Vol. 10. – Article ID 9962860 (11 p).
9. Apoptosis, inflammation, and oxidative stress in infertility: A mini review. [Text] / A.O. Oluwafemi, I.N. Pearl, E.R. Damilare at al. // Toxicology Reports. – 2023. – Vol. 10. – P. 448-462.
10. Семенчук, С.Н. Морфофункциональная характеристика внутренних органов репродуктивной системы самок крыс (обзор литературы). [Текст] / С.Н. Семенчук, С.А. Кашенко, А.А. Захаров // Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 104-110.
11. A multi-tissue transcriptomic landscape of female mice in estrus and diestrus provides clues for precision medicine. [Text] / Z. Yiran, Y. Han, L. Wenjun at al. // Front Cell Dev Biol. – 2022. – Vol. 10. – P. 983712. – DOI: 10.3389/fcell.2022.983712.
12. Морфология стенки тела и шейки матки крысы и кролика. [Текст] / Ю.В. Григорьева, Н.В. Ямщиков, С.Н. Чемидронов и др. // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. – 2014. – Т. 4, № 24. – С. 37–41.
13. Сопоставление различных подходов к определению продуктов перекисного окисления липидов в гептан-изопропанольных экстрактах крови. [Текст] / И.А. Волчегорский, А.Г. Налимов, Б.Г. Яровинский и др. // Вопр. мед. химии. – 1989. – Т. 35, № 3. – С. 127-131.
14. Погорелова, Н.А. Интенсивность процессов липопероксидации крови при включении в рацион спинурино содержащего плавленого сырного продукта. [Текст] / Н.А. Погорелова, Т.В. Бойко, Е.А. Молибога // Вестник АПК Ставрополя. Ветеринария. – 2018. – Т 31, № 3. – С. 15-30.
15. Окислительная модификация белков сыворотки крови человека, метод ее определения. [Текст] / Е.Е. Дубинина, С.О. Бурмистров, Д.А. Ходов и др. // Вопр. мед. химии. – 1999. – Т. 45, № 1. – С. 47-54.
16. Сирота, Т.В. Использование нитросинеготетразолия в реакции автоокисления адреналина для определения активности супероксидсмутазы. [Текст] / Т.В. Сирота // Биомедицинская химия. – 2013. – Т. 59, № 4. – С. 399-410.
17. Королюк, М.А. Метод определения активности каталазы. [Текст] / М.А. Королюк, Л.И. Иванова, И.Г. Майорова // Лаб. дело. – 1988. – № 1. – С. 16-19.
18. Ellman, G.L. Tissue sulfhydryl groups. [Text] / G.L. Ellman // Arch. Biochem. Biophys. – 1959. – Vol. 82. – P. 70–81.
19. Bradford, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. [Text] / M.M. Bradford // Anal. Biochem. – 1976. – Vol. 72. – P. 248–254.
20. Боровиков, И.О. Коррекция нарушений цитобиохимических процессов в слизистой шейки матки при цервикальной интраэпителиальной неоплазии. [Текст] / И.О. Боровиков, Е.Э. Герасименко, Х.И. Горринг // РМЖ Мать и дитя. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 108-111.
21. Ордян, Н.Э. Влияние пренатального стресса на активность гипофизарно-овариальной системы у самок крыс. [Текст] / Н.Э. Ордян, Ю.О. Федотова, С.Г. Пивина // Бюл. эксперим. био. и мед. – 2013. – Т. 155, № 4. – С. 424-426.
22. Шевлюк, Н.Н., Морфофункциональная характеристика матки грызунов: морфогенез, структура, циклические изменения, воздействие различных негативных факторов среды обитания. [Текст] / Н.Н. Шевлюк, Е.В. Блинова // Ж. анат. и гистопат. – 2022. – Т. 11, № 3. – С. 82-92.
23. Пренатальный стресс и его роль в патологии детского возраста: исторические аспекты и современное состояние вопроса. [Текст] / А.А. Вялкова, Б.А. Фролов, Е.В. Савельева и др. // Нефрология. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 28-41.

Поступила в редакцию 29.04.2025 г.

UTERINE REDOX STATUS OF PRENATALLY STRESSED FEMALE RATS AT DIFFERENT STAGES OF THE ESTROUS CYCLE

O. N. Kuleshova, A. A. Vasilieva

One of the factors that disrupt the fetal development program is stress during pregnancy. The free radical status of the queens of prenatally stressed female rats was studied, taking into account the stages of the estrous cycle. Prenatal stress caused the growth of OMB products at the stage of diestrus. The level of sexual lipids of the uterine body remained unchanged. In the horns of the uterus, at the stage of estrus, a decrease in the level of POL was noted, and at the stage of diestrus, their increase was noted. The level of primary products and reserve lipids increased, while the final ones decreased. More significant changes in the sex level are characteristic of the stage of estrus in the horns of the uterus. The activity of antioxidant enzymes decreased after perinatal stress. Prenatal stress, by changing the basic level of the redox system, can be a risk factor for various disorders of the reproductive system of female offspring, reducing the activity of enzymatic antioxidants and causing carbonyl stress.

Keywords: prenatal stress; females; uterus; oxidative modification of proteins; lipid peroxidation; estrus; diestrus; superoxide dismutase; glutathione.

Кулешова Ольга Николаевна

кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры фундаментальной биологии, Астраханский государственный университет им. Н.В. Татищева, Астрахань, РФ.

E-mail: pozdniakova_olga@list.ru

Kuleshova Olga N.

Candidate of Biological Sciences, docent, Department of Fundamental biology, N.V. Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, RF.

Васильева Алиса Андреевна

студент магистратуры биологического факультета, кафедра фундаментальной биологии, Астраханский государственный университет им. Н.В. Татищева, Астрахань, РФ.

E-mail: Reratjune03Alice@gmail.com

Vasilyeva Alisa A.

student of magistrate of the Faculty of Biology, Department of Fundamental biology, N.V. Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, RF.

ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ И ПРОГНОЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ФИТОПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ В АНТРОПОГЕННО НАГРУЖЕННЫХ ВОДОЕМАХ ДОНБАССА

© 2025. Э. И. Мирненко

В статье представлены результаты многолетнего мониторинга фитопланктона в прудах и водохранилищах Донецкой Народной Республики (2015–2024 гг.). Выполнен анализ таксономического состава, численности, биомассы и индексов биоразнообразия. Установлены пространственно-временные закономерности сукцессии альгоценозов под воздействием биогенного и антропогенного загрязнения. Выявлена статистически значимая отрицательная корреляция между концентрацией фосфатов и индексом Шеннона, отражающая деградацию структурной устойчивости сообществ. Построена модель развития фитопланктона, подтверждающая переход ряда водоёмов к гиперэвтрофной стадии.

Ключевые слова Донбасс, пруды, эвтрофный водоём, фитопланктон, индексы разнообразия.

Введение. Фитопланктон представляет собой совокупность автотрофных микроскопических водорослей, свободно плавающих в толще воды способных к фотосинтезу. Фитопланктон занимает ключевую роль в водных экосистемах как первое звено в трофической цепи, обеспечивая энергией и органическим веществом все последующие уровни водных биоценозов – от зоопланктона до высших трофических уровней, включая рыб и других гидробионтов. Благодаря своей способности к быстрой реакции на изменения внешней среды, фитопланктон служит надежным биоиндикатором экологического состояния водоёмов [1–3].

В условиях повышенного антропогенного воздействия, характерного для Донецкой агломерации, особенно актуальным становится изучение динамики фитопланктона. Промышленные выбросы, сброс сточных и шахтных вод, сельскохозяйственные стоки, а также зарегулированный сток реки Кальмиус привели к изменению структуры и функционирования водных экосистем региона. Наблюдаемые факторы воздействия на водоёмы проявляются, прежде всего, в качественном и количественном составе фитопланктона, его сезонной и межгодовой динамике, а также в изменении соотношений между основными таксономическими группами микроводорослей [3–5].

Особый интерес представляет изучение многолетней динамики фитопланктона в искусственных водоёмах г. Донецка. Водоёмы различаются по уровню антропогенной нагрузки, степени эвтрофикации, гидрологическому режиму и использованию (питьевое водоснабжение, промышленное охлаждение, рекреация и др.) [5].

Целью работы является комплексный анализ многолетнего развития фитопланктона в водоёмах Донецкой Народной Республики на основе биоиндикационного подхода, с оценкой влияния, гидрохимических и антропогенных факторов.

Материалы и методы. Материалы для исследования фитопланктона были собраны в водоёмах г. Донецка и его окрестностях в период с 2015 по 2024 годы. Исследования охватывали различные типы водных объектов: пруды, водохранилище, участки на реке Кальмиус. Выбор этих водоёмов обусловлен их различной функциональной нагрузкой, уровнем антропогенного воздействия и характером водообмена, что позволило обеспечить полноту экологического охвата.

Отбор проб фитопланктона проводился ежемесячно в течение вегетационного сезона (март – ноябрь), а также периодически в зимнее время. Вода отбиралась в пластиковые бутылки объёмом не менее 1,5 литров с глубины 0,3–0,5 м. Пробы отбирались в трех повторностях на каждой точке наблюдения, с последующим объединением в интегральную пробу. Географические координаты и характеристики точек (глубина, скорость течения, удалённость от берега) фиксировались на месте.

Для анализа выбирались участки с разной степенью антропогенной нагрузки: Городские пруды – высокая антропогенная нагрузка; Молодежные пруды (Пруды ботанического сада и дендрария) – рекреационная зона с уменьшенным техногенным влиянием; Нижнекальмиусское водохранилище – водоем в черте промышленной и селитебной зоны с регулярными сбросами шахтных и ливневых вод; Старобешевское водохранилище – техногенный водоем-охладитель ТЭС с подогретым стоком и сельскохозяйственным дренажом.

Сгущение проб производилось методом вакуумной фильтрации через мембранные фильтры в системе Бунзена. Морфологическая идентификация микроводорослей проводилась методом прямого микроскопирования с использованием микроскопа Zeiss Primo Star при увеличениях 400× и 1000×. Для определения таксономической принадлежности использовались классические и современные определители пресноводных водорослей.

Для количественного учёта фитопланктона использовалась камера Горяева. Численность выражалась в тыс. кл/л, биомасса рассчитывалась по стереометрическим формулам и выражалась в мг/л [6]. На каждый проанализированный водоем было отобрано в среднем от 15 до 30 проб в год, в зависимости от сезона и интенсивности исследования.

Для оценки экологического состояния водоёмов рассчитывались следующие индексы: индекс Шеннона-Уивера (H), индекс Пиелоу (J), индекс Симпсона (D), индекс сапробности (S) по Pantle-Buck (модификация Оксьюка), коэффициент Серенсена-Чекановского для оценки таксономического сходства между биоценозами [7].

Параллельно с альгологическими исследованиями проводились гидрохимические измерения, включая: водородный показатель (pH), прозрачность (по диску Секки), концентрация растворенного кислорода ($\text{mgO}_2/\text{л}$), аммонийный азот (NH_4^+), нитриты (NO_2^-), нитраты (NO_3^-), фосфаты (PO_4^{3-}), соотношение биогенов Рэдфилда, количество азота к фосфору в воде (N:P), общее содержание взвешенных веществ [8].

Также использовался индекс Маргалефа для оценки видового богатства. Математико-статистическая обработка результатов производилась с использованием пакетов Statistica 10 и MS Excel. Для выявления общих корреляций и группировок сообществ применялся кластерный анализ. Моделирования развития фитопланктона проводили согласно формуле Монада.

$$N(t) = (N_{\max} \times [S]) / (K_s + [S]),$$

где:

$N(t)$ – численность фитопланктона в момент времени t ;

$N_{\max}$ – максимальная возможная численность;

$[S]$ – концентрация лимитирующего фактора;

K_s – константа насыщения.

Экологическое моделирование развития фитопланктона осуществлялось на основе корреляционного анализа между сезонной динамикой биомассы, численности водорослей и концентрацией биогенных веществ. Прогнозы строились по принципу

эвтрофикационной сукцессии с учётом климатических факторов, характера водообмена и уровня антропогенной нагрузки [8–9].

Результаты и обсуждение. На основании многолетних исследований, проведенных в водоемах бассейна р. Кальмиус и городских прудах г. Донецка, установлено, что фитопланктон в целом представлен высокой таксономической разнородностью от 124 до 371 таксона на водоем в разные годы наблюдений.

Таксономическая структура включала представителей 8 отделов, 17 классов, 42 порядков и 105 родов, при доминировании Heterocontophyta (Bacillariophyta), Chlorophyta и Cyanobacteria, что соответствует флоре умеренно эвтрофных пресноводных экосистем.

Наибольшее видовое богатство зафиксировано в Старобешевском водохранилище (371 вид и внутривидовой таксон), что скорее всего обусловлено его полифункциональностью и сочетанием термического и органического воздействия на водоём. Нижнекальмиусское водохранилище включало 216 таксонов, а средний участок р. Кальмиус – 124 вида. В Городских прудах молодежных прудах идентифицировано 182 вида, преимущественно из родов *Scenedesmus*, *Monoraphidium*, *Coelastrum*, *Desmodesmus* и др. (рис. 1).

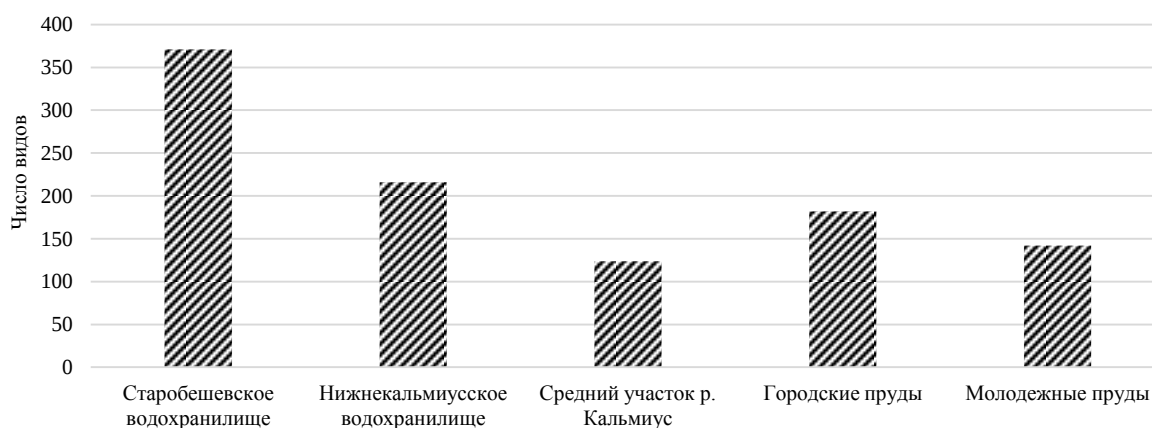


Рис. 1. Количество видов фитопланктона в исследуемых водоёмах г. Донецка

Количественные показатели фитопланктона. Максимальные значения численности и биомассы фитопланктона наблюдались в весенне-летний период, что связано с благоприятными термическими и световыми условиями. Например, в Городских прудах численность достигала 167 тыс. кл/л при биомассе до 51,9 мг/л, в то время как в Молодежных прудах с меньшей антропогенной нагрузкой биомасса не превышала 16,6 мг/л. В Нижнекальмиусском водохранилище в пиковые периоды численность достигала 8–10 млн. кл/л, а биомасса доходила до 1,3 г/л. Стоит отметить, что высокие показатели численности не коррелировали с высоким уровнем биоразнообразия: зачастую вспышки численности были обусловлены развитием монодоминантных сообществ цианобактерий (*Microcystis aeruginosa*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena spiroides*), характерных для стадии гиперэвтрофикации. Для Старобешевского водохранилища в условиях тёплой эвтрофной среды численность фитопланктона варьировала от 72 до 158 тыс. кл/л, в зависимости от сезона. Биомасса находилась в диапазоне от 24,5 до 52,6 мг/л, достигая пиков в июне-июле.

Гидрохимические условия как детерминанты альгосукцессии. Анализ физико-химических показателей выявил устойчивую тенденцию к увеличению минерализации и биогенного загрязнения. Средние значения pH колебались в пределах 7,2–8,2 ед; прозрачность воды составляла 30–80 см; концентрации растворённого кислорода в летний период снижались до <5 мг/л, что указывает на прогрессирующую деградацию олиготрофной фазы. Концентрации NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- и PO_4^{3-} и показатель соотношения азота к фосфору (N:P) – ключевой трофический индикатор. В Нижнекальмиусском водохранилище наблюдали среднее значения N:P<5:1 (при норме 16:1), что выражалось в массовом развитии родов *Microcystis*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*. Такие условия отмечены в Нижнекальмиусском водохранилище, что подтверждается статистической зависимостью между ростом PO_4^{3-} и снижением индекса Шеннона ($r = 0,74$; $p < 0,05$). Наблюдаемые условия свидетельствует о переходе экосистемы в устойчивое дисбиотическое состояние, при котором происходит циклическая смена доминант с потерей структурной устойчивости альгоценоза. Для остальных наблюдаемых водных экоценозов дисбиотических состояний не наблюдалось.

Индексы биоразнообразия и пространственно-временная структура. Расчеты индексов биоразнообразия подтвердили высокую степень пространственной и сезонной неоднородности альгосообществ.

Таблица 1

Индексы биоразнообразия в исследуемых водоёмах

Исследуемые водоёмы	H (min–max)	J (min–max)	D (min–max)	S (min–max)	dMg (min–max)
Старобешевское водохранилище	0,10–4,26	0,01–0,68	0,02–0,79	1,9–2,2	3,6–6,2
Нижнекальмиусское водохранилище	0,60–3,86	0,10–0,97	0,01–0,96	2,1–2,5	2,2–4,5
Пруды	0,40–2,90	0,08–0,64	0,04–0,78	2,2–2,6	1,8–3,7

Максимальные значения Шеннона-Уивера характерны для весенне-осеннего периода в Старобешевском водохранилище (H) (до 4,26 бит/экз), что указывало на развитую структуру сообществ и устойчивость к антропогенному воздействию. Минимальные значения наблюдали в летний период в городских прудах и в Нижнекальмиусском водохранилище где наблюдались вспышки моноценозов цианобактерий (*Microcystis aeruginosa*, *Aphanizomenon flos-aquae*).

В летний период значения во всех водоёмах наблюдалась выраженная неравномерность распределения видов (индекс Пиелу – J), обусловленная доминированием отдельных таксонов. Показатель $J < 0,3$ можно характеризовать как нестабильность и структурную деградацию фитопланктонного сообщества.

Значения Индекса Симпсона ($D < 0,5$) наблюдались в периоды «цветения» фитопланктона и отражало доминирование отдельных групп в альгоценозе. Значения $> 0,7$ определены для весеннего и осеннего периода, что отражает большую выровненность и функциональную устойчивость сообществ. Зоны сапробности (S) изменялись в пределах от 1,9 до 2,6, что относит исследуемые водоёмы олиго и мезосапробной зоне.

Кластеризация по индексу Шеннона и сапробности выявила устойчивое разделение водоёмов на три группы: стабильные, умеренно нарушенные, гиперэвтрофные зоны. Наиболее сильно на биоразнообразии влияет фосфатная нагрузка это подтверждает необходимость регулирования в поступлении биогенов и

восстановления естественной трофической структуры сообществ. Корреляционный анализ показал обратную зависимость между концентрацией фосфатов и индексом Шеннона ($r = 0,74$, $p < 0,05$), что подтверждает деструктивное влияние избытка биогенов на альгоценозы (рис.2).

С учётом многолетней динамики биоразнообразия, гидрохимических параметров и индексов сапробности можно утверждать, что все исследуемые водоёмы находятся в состоянии устойчивой эвтрофикации, с разной степенью компенсаторной способности. Старобешевское водохранилище, несмотря на промышленную нагрузку, демонстрирует признаки сукцессии к более зрелой экосистеме вероятнее всего благодаря высокой способности к самоочищению. В то время как Нижнекальмиусское водохранилище – это пример экосистемы с нарушенным балансом, где доминируют процессы эвтрофного распада.

Корреляционный анализ зависимости между концентрацией фосфатов и индексом Шеннона. Для оценки влияния биогенного загрязнения на структурно-функциональную организацию фитопланктонных сообществ был проведён корреляционный анализ между концентрацией ортофосфатов (PO_4^{3-}) в воде и значениями индекса биоразнообразия Шеннона–Уивера (H), полученными на основе многолетних наблюдений.

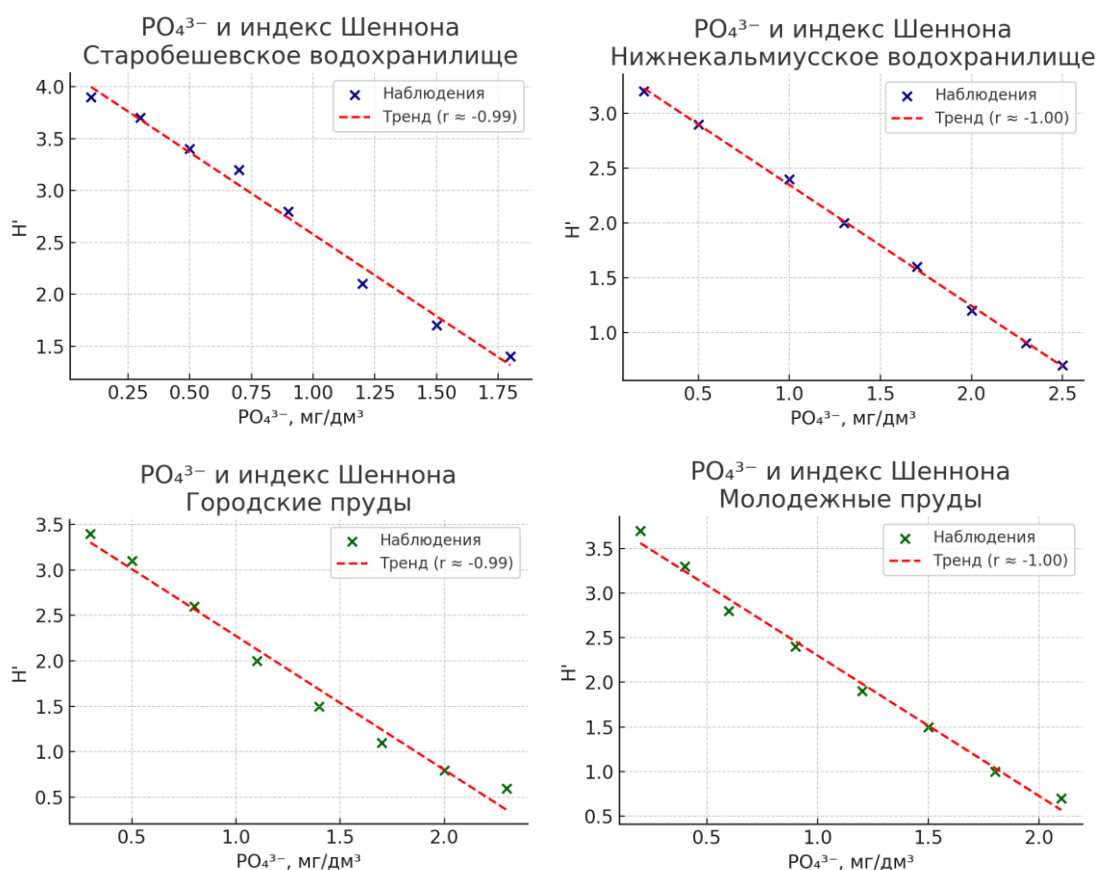


Рис. 2. Корреляционный анализ зависимости между фосфатами и индексом Шеннона–Уивера в исследуемых прудах

Анализ показал наличие выраженной отрицательной корреляции между переменными, что свидетельствует о статистически значимой и сильной обратной зависимости между насыщением водоёма фосфатами и степенью таксономического

разнообразия фитопланктона. Данный эффект особенно ярко выражен при превышении концентрации фосфатов выше 1,5–2,0 мг/дм³, где индекс Шеннона снижался до критически низких значений ($H < 1,5$), что отражает переход к доминированию узкого круга толерантных таксонов, преимущественно представителей Cyanobacteria (например *Microcystis aeruginosa*).

Наблюдаемое развитие альгоценозов соответствует классической модели эвтрофной сукцессии, при которой избыточное содержание фосфора стимулирует быстрый рост отдельных видов-доминантов, что приводит к общей дестабилизации альгосообщества, снижению равномерности (индекс Пиелу) и формированию моно- и олигодоминантных структур.

Таким образом, корреляционный анализ подтверждает, что повышенные концентрации PO_4^{3-} занимает ключевую роль в деградации альгосообществ, снижая их биоразнообразие, устойчивость и способность к саморегуляции. Это также согласуется с ранее установленными сапробными характеристиками исследуемых водоёмов, в которых наблюдалась тенденция к переходу от бета- к альфа-мезосапробным условиям.

Динамика фитопланктона в водоемах г. Донецка определяется, прежде всего, отношением биогенов и скоростью поступления фосфора. Устойчивое доминирование цианобактерий при высоких температурах, низкой проточности и $\text{N:P} < 5:1$ указывает на переход водоемов в стадию устойчивой эвтрофной деструкции. Снижение фосфатной нагрузки и восстановление трофического баланса может значительно улучшить альгосукцессии и экологическое состояние водоемов региона.

Моделирование дальнейшего развития фитопланктона при сохранении текущих условий предсказывает, дальнейшее усиление доминирования цианобактерий сокращение репродуктивного окна у Heterocontophyta и Chlorophyta выражающееся в падении буферной ёмкости экосистем повышение вероятности гипоксических условий в придонных слоях. Для предотвращения дальнейшей деградации альгосообществ необходима строгая регуляция фосфатной нагрузки, в том числе контроль сброса сточных и ливневых вод, применение фосфат-уловителей и восстановление буферных зон на водосборах.

Вывод. Развитие фитопланктона в водоёмах г. Донецка чётко детерминирована гидрохимическим режимом. Повышение концентрации фосфатов и аммонийного азота, снижение прозрачности и растворённого кислорода способствуют переходу от разнообразных фитопланктонных сообществ к нестабильным моноценозам с преобладанием цианобактерий. Эти изменения снижают экологическую устойчивость водоёмов, ухудшают их способность к самоочищению и указывают на необходимость срочных природоохранных мер.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ НИОКТР 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнева, Л. Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / Л. Г. Корнева. – Кострома : ООО "Костромской печатный дом", 2015. – 284 с. – EDN ZVYMBV.
2. Гидрохимические исследования и фитопланктон соленых озёр Павлодарской области / А. С. Молдрахман, Ж. О. Мажибаева, С. Ю. Долгополова [и др.] // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – 2022. – № 1(112). – С. 145-152. – DOI 10.51452/kazatu.2022.1(112).878. – EDN JDXTHJ.
3. Мирненко Э. И. Влияние некоторых форм азота на развитие фитопланктона прудов водосборного бассейна р. Кальмиус (г. Донецк, ДНР) / Э. И. Мирненко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 35-40. – DOI 10.5281/zenodo.15005656. – EDN MZRVEJ.

4. Мирненко Э. И. Особенности «цветения» водоемов в городе Донецке / Э. И. Мирненко. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015 – 93 с.
5. Рижинашвили А. Л. Оценка обеспеченности первичной продукции в малом озере и его трофический статус / А. Л. Рижинашвили, О. Б. Максимова // Гидробиологический журнал. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 31-42. – EDN YLPLDB.
6. Тыныбеков А. К. Метод расчета объемов клеток фитопланктона / А. К. Тыныбеков // Исследование живой природы Кыргызстана. – 2021. – № 2. – С. 163-166. – EDN ILMCFL.
7. Основы статистической обработки данных: учебно-методическое пособие. Методы экологических исследований / Р.М. Городничев, Л.А. Пестрякова, Л.А. Ушницкая и др. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2019. — 94 с.
8. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник. – М.: Протектор, 2000. – 838 с.
9. Algaebase.org [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.algaebase.org/> (дата обращения: 11.09.2024).

Поступила в редакцию 19.05.2025 г.

DYNAMICS OF STRUCTURE AND FORECAST OF PHYTOPLANKTON COMMUNITIES TRANSFORMATION IN ANTHROPOGENICALLY LOADED WATER BODIES OF DONBASS

E. I. Mirnenko

The article presents the results of long-term monitoring of phytoplankton in ponds and reservoirs of the Donetsk People's Republic (2015–2024). The taxonomic composition, abundance, biomass and biodiversity indices were analyzed. Spatial and temporal patterns of succession of algocenoses under the influence of biogenic and anthropogenic pollution were established. A statistically significant negative correlation between phosphate concentration and Shannon index, reflecting the degradation of structural stability of communities, was revealed. The model of phytoplankton development is constructed, confirming the transition of a number of water bodies to the hypereutrophic stage.

Keywords: Donbass, ponds, eutrophic water body, phytoplankton, diversity indices.

Мирненко Эдуард Игоревич

старший преподаватель кафедры ботаники и
экологии ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: eduard_mirnenko@list.ru
ORCID: 0000-0002-3625-5326
Author ID: 1050999

Mirnenko Eduard Igorevich

Senior lecture of the Department of Botany and
Ecology, Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ БЕЛКОВЫХ ДОБАВОК НА ПЕРЕВАРИМОСТЬ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ КОРМОВ РАЦИОНА И ВОСПРОИЗВОДИТЕЛЬНУЮ ФУНКЦИЮ КОРОВ

© 2025. Н. А. Перова, В. Н. Калаев

В целях изучения влияния защищённых от распада в рубце белковых добавок в рационе высокопродуктивных коров на переваримость питательных веществ рационов и воспроизводительную функцию животных в условиях хозяйства был проведен опыт на трех группах коров. Показано, что применение защищенных белковых добавок повышает переваримость сырого протеина в среднем на 2,7 % в опытных группах животных, а также способствует лучшему усвоению сухого и органического веществ кормов. Скармливание коровам опытных групп защищенных белковых добавок привело к улучшению их воспроизводительных функций. Это проявилось в снижении индекса осеменения с 2,57 до 2,24–2,36, что свидетельствует о повышении эффективности оплодотворения. Также сократился сервис-период — с 147,3 дней до 132,5 и 124,2 дней, что указывает на более быстрое восстановление репродуктивной функции коров после отела.

Ключевые слова: кормление коров, шрот подсолнечный экструдированный, шрот соевый экструдированный, переваримость питательных веществ, воспроизводительная функция коров.

Введение. В последние годы наблюдается рост интереса к использованию растительных белковых добавок в рационе высокопродуктивных коров. Это связано с необходимостью повышения продуктивности животных, улучшения качества молока и снижения затрат на кормление. Одним из перспективных направлений является использование защищенных белковых добавок, которые обеспечивают более эффективное усвоение белка в организме коров.

Защищенные белковые добавки — это источники белка, которые подверглись специальной обработке для защиты от разрушения в рубце. Дополнительная защита позволяет белку достигать тонкого кишечника в неизменном виде, где он может быть эффективно усвоен организмом животного. Использование таких защищенных добавок позволяет повысить усвояемость аминокислот, что особенно важно для высокопродуктивных коров, нуждающихся в большом количестве питательных веществ в период наивысшей молочной продуктивности [1, 2].

В период от отела до пика лактации у высокопродуктивных коров потребление корма отстает от истинной потребности в питательных веществах, метаболические процессы подчиняются доминанте лактации, происходит мобилизации веществ (белков и жира) собственного тела, которые используются на продукцию молока. Причина состоит том, что животные физически не в состоянии потребить необходимое количество сухого вещества корма.

В период наивысшей молочной продуктивности, в первые 2–4 месяца лактации, физиологической нормой для коров является потеря не более 8–10 % живой массы. Однако, у высокопродуктивных коров во время острого дефицита питательных веществ наблюдаются потери 10–30 % жира и 10–25 % белка тела [3, 4].

Исходя из этого, для обеспечения оптимального кормления высокопродуктивных коров необходимо учитывать не только уровень сырого протеина, но и особенности его расщепления в преджелудках. Важно уделять внимание качеству белков и их усвояемости в организме животных [5, 6].

При составлении рационов без учета степени расщепления белковых добавок возможны негативные последствия: перерасход протеиновых кормов, нарушение обменных процессов, снижение продуктивности и экономической эффективности животноводства. Поэтому ключевым аспектом является баланс между количеством и качеством протеинов, а также их соответствие физиологическим потребностям коров [7, 8].

Цель нашего исследования состояла в анализе воздействия белковых добавок, созданных из разных растительных материалов, на усвоение питательных веществ в кормах и на репродуктивную способность коров.

Для выполнения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать, как добавление защищенных белковых компонентов из сои и подсолнечника в рацион коров влияет на усвоение питательных веществ.
2. Проанализировать, как использование защищенных белковых добавок из сои и подсолнечника сказывается на репродуктивных способностях коров.

Материалы и методы. Был организован научно-хозяйственный эксперимент с участием коров голштинской породы, которые в предыдущий период лактации давали 8000 кг молока за 305 дней. В рамках эксперимента были созданы три группы по 10 новотельных коров, отобранных по принципу аналогов: учитывались их живая масса, происхождение, возраст, дата отела и продуктивность. Коровы содержались в стойлово-привязных условиях с ежедневным выгулом. Наблюдение за показателями проводилось в течение 100 дней — с 21-го по 120-й день лактации.

Все группы животных питались одинаковым рационом, который состоял из объемистых и концентрированных кормов. В рацион входили: сено многолетних злаков, сенаж многолетних трав, кукурузный силос, свежая пивная дробина, кормовая патока, кукурузная мука, дробленый ячмень, подсолнечный жмых, гранулированные кормовые дрожжи, кормовой мел, пищевая сода, поваренная соль и премикс ПКК 60-3.

В ходе эксперимента коровам из опытных групп I и II добавляли защищенные белковые добавки, произведенные из различных растительных компонентов. В рационе коров из группы I использовался экструдированный подсолнечный шрот. Для коров из группы II применялся экструдированный соевый шрот. Дозировка белковой добавки составляла 1,0 кг на голову в сутки. Массовая доля сырого протеина (СП) и нераспадаемого в рубце протеина (НРП) в подсолнечной белковой добавке составляла 39 % и 50 %, в соевой белковой добавке – 49 % и 60 %, соответственно. Благодаря повышенному содержанию СП и НРП в белковых защищенных добавках, их доля в сухом веществе (СВ) рациона увеличилась с 16,0 и 35,0 % в контроле до 17,0 и 36,70 % в I опытной и до 17,4 % и 38,0 % во II опытной группах (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика кормления животных подопытных групп

Элемент кормления	Подопытные группы		
	Контрольная (10 коров)	I опытная (10 коров)	II опытная (10 коров)
Основной рацион	Сено многолетних злаков, сенаж многолетних трав, силос кукурузный, дробина пивная свежая, патока кормовая, кукурузный размол, ячмень дробленый, жмых подсолнечный, дрожжи кормовые гранулированные, мел кормовой, сода пищевая, соль поваренная, премикс ПКК 60-3 (23,3 кг СВ).		
Белковая добавка	–	+ 1,0 кг шрота подсолнечного экструдированного (EFKO FEED PRO SF 90)	+ 1,0 кг шрота соевого экструдированного (EFKO FEED PRO SB 95)
СП, %	16,0	17,0	17,4
НРП, %	35,0	36,7	38,0

С целью изучения влияния испытуемых защищенных растительных белковых добавок на переваримость питательных веществ кормов рациона коровами на третьем месяце эксперимента проведены физиологические исследования по изучению переваримости питательных веществ кормов рациона с использованием метода инертных индикаторов [9, 10]. Используемые в этом методе индикаторы совершенно не всасываются в желудочно-кишечном тракте. Чаще всего для этого используют окись хрома – Cr_2O_3 . Индикатор тщательно перемешивают с кормом в определенной концентрации и скармливают подопытным животным, учитывая количество потребленного корма. Далее проводятся исследования питательных веществ в образцах корма и кала животных и определение концентрации индикатора в образцах корма рациона и кала животного. Зная концентрации питательных веществ в корме и кале, рассчитывают переваримость сухого вещества и его компонентов по формуле:

Переваримость, % = $100 - (100 \times (\text{Cr}_2\text{O}_3, \% \text{ корм} / \text{Cr}_2\text{O}_3, \% \text{ кал}) \times (\text{питательное вещество, \% кал} / \text{питательное вещество, \% корм}))$ [9].

В качестве индикатора в эксперименте по переваримости использовалась окись хрома в количестве 0,2% от сухого вещества рациона. Во время учетного периода эксперимента по переваримости животные содержались в отдельных стойлах с индивидуальным учетом потребления кормов. Определение химического состава кала и кормов проводили по общепринятым методам зоохимического анализа: сухое вещество и влага – по ГОСТ Р 52838; сырой протеин – по ГОСТ Р 51417; сырая клетчатка – по ГОСТ Р 52839; сырой жир – по ГОСТ 32905-2014; БЭВ – расчетным способом. Концентрацию хрома в средней пробе кала коров и кормов рационов в опыте по переваримости питательных веществ кормов определяли методами атомно-адсорбционной спектрофотометрии.

В опыте по переваримости также была проведена оценка энергетической ценности рационов, для этого был применен следующий метод расчета обменной энергии (ОЭКРС):

$$\text{ОЭКРС (МДж)} = 17,46 \times \text{пП} + 31,23 \times \text{пЖ} + 13,65 \times \text{пК} + 14,78 \times \text{пБЭВ} [11],$$

где ОЭ – обменная энергия в 1 кг корма, МДж; пП – переваримый протеин, кг; пЖ – переваримый жир, кг; пК – переваримая клетчатка, кг; пБЭВ – переваримые экстрактивные вещества, кг.

Изучение воздействия защищенных белковых добавок на воспроизводительную функцию коров проводилось по оценке следующих характеристик воспроизводства стада:

- оплодотворяемость коров после первого осеменения определялась отношением числа стельных (беременных) животных от первичных осеменений к числу стельных коров в подопытной группе;
- индекс осеменения – количество осеменений, затраченных на одно результативное оплодотворение, высчитывается как число осеменений коровы в течение сервис-периода;
- длительность сервис-периода определялась как количество дней от окончания одной до начала следующей стельности.

В ходе эксперимента также оценивалась упитанность животных по 5-бальной шкале [9]: от 1 – очень низкая до 5 – чрезвычайно высокая.

Полученные в опыте материалы были статистически обработаны с использованием программы STATISTICA, version 10, StatSoft, Inc., 2011 (www.statsoft.com). При этом вычисляли следующие величины: среднеарифметическая (M), среднеквадратическое отклонение ($\pm m$) и уровень значимости (p). Сравнение

средних значений изучаемых признаков осуществляли с использованием t-критерия Стьюдента. Различия считали достоверными при $p \leq 0,05$. При $p \leq 0,1$, но $p > 0,05$ – различия на уровне тенденции. При $p > 0,1$ разницу показателей считали недостоверной.

Результаты и обсуждение

Изучение переваримости питательных веществ рационов коров опытных групп с использованием метода инертных индикаторов. На третьем месяце лактации проводилось исследование переваримости питательных веществ рационов коров. Рацион животных оставался неизменным и соответствовал таблице 1. Благодаря дополнительным защищенным белковым добавкам подопытные группы потребляли на 0,9 кг сухого вещества (СВ) больше, чем контрольная группа, которая потребляла 23,3 кг СВ, исходя из данных среднесуточного рациона кормления коров.

В ходе исследования учитывали следующие показатели: объем съеденных кормов, химический состав кормов и кала, а также содержание инертного индикатора в сухом веществе рациона и кала. На основе этих данных были определены объемы переваренных питательных веществ (таблица 2) и рассчитан процент переваримости компонентов рациона (таблица 3).

Таблица 2

Сравнительная таблица объемов питательных веществ, потребленных и переваренных животными в контрольной и опытных группах

Показатель	Объем потребленных питательных веществ, г			Объем переваренных питательных веществ, г		
	контрольная	I опытная	II опытная	контрольная	I опытная	II опытная
Сухое вещество	23297,9 ±151,6	24209,2 ±132,6*	24183,7 ±137,3*	16 352,8 ±109,5	17 270,8 ±99,3*	17 380,8 ±101,5*
Органическое вещество	22190,4 ±143,9	23031,6 ±98,7*	23014,1 ±145,8*	16 074,7 ±106,6	16 898,3 ±69*	16 991,3 ±128,9*
Протеин	3730,7 ±43,5	4106,2 ±19,4*	4205,5 ±43,9**	2 506,3 ±29,8	2 856,7 ±19,2*	2 951,8 ±29,8**
Жир	910,6 ±13,8	925, ±10,2*	927,9 ±17,6*	606,3 ±10,7	622,5 ±5,6*	628,3 ±13,5*
Клетчатка	4 006,6 ±89,9	4 135,3 ±64,4*	4 038,0 ±85,2*	2 561,0 ±68,1	2 667,7 ±46,3*	2 615,4 ±61,7*
Безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ)	13 542,6 ±94,6	13 864,2 ±35,1*	13 842,8 ±102*	10 401,1 ±67,7	10 751,4 ±26,3*	10 795,8 ±77,5*

Обозначения:

* – различия на уровне тенденции ($p \leq 0,1$);

** – различия с контрольной группой достоверны ($p \leq 0,05$).

Было установлено значительное улучшение показателей переваримости питательных веществ у животных опытных групп.

В частности, эффективность усвоения сырого протеина возросла на 2,4-3,0 процента, при этом статистическая значимость составила $p \leq 0,1$ для первой группы и $p \leq 0,05$ для второй. Параллельно наблюдалась положительная динамика в процессах переваривания других важных компонентов на уровне тенденции (при $p \leq 0,1$):

- жиров: увеличение на 0,6–1,1 %;
- клетчатки: рост на 0,6–0,9 %;
- БЭВ: повышение на 0,7–1,2 %.

Таблица 3

Переваримость питательных веществ кормов различных рационов в контрольной и опытных группах

Показатель	контрольная	I опытная	II опытная
Сухое вещество, %	70,2 ± 0,47	71,3 ± 0,41*	71,9 ± 0,42*
Органическое вещество, %	72,4 ± 0,48	73,4 ± 0,30*	73,8 ± 0,56*
Протеин, %	67,2 ± 0,80	69,6 ± 0,47*	70,2 ± 0,71**
Жир, %	66,6 ± 1,18	67,2 ± 0,88*	67,7 ± 1,46*
Клетчатка, %	63,9 ± 1,70	64,5 ± 1,12*	64,8 ± 1,53*
Безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ), %	76,8 ± 0,51	77,5 ± 0,19*	78,0 ± 0,56*

Обозначения:

* – различия с контрольной группой на уровне тенденции ($p \leq 0,1$);** – различия с контрольной группой достоверны ($p \leq 0,05$).

Кроме того, отмечалось улучшение усвоения сухого вещества на 1,1–1,7 % (при $p \leq 0,1$) и органического вещества на 1,0–1,4 % у животных из первой и второй опытных групп по сравнению с контрольной группой (при $p \leq 0,1$).

На основании метода расчета обменной энергии было показано, что рацион 1 обладал энергетической ценностью 251,4 МДж, рацион 2 – 264,6 МДж, рацион 3 – 266,4 МДж.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют положительную динамику в процессах переваривания основных питательных веществ у животных опытных групп по сравнению с контрольной.

В ходе эксперимента также оценивалась упитанность животных в подопытных группах по 5-балльной шкале, особенно в период максимальных потерь живой массы, когда для компенсации дефицита питательных веществ у коров происходит их мобилизация из собственного тела на производство молока. Визуальная оценка упитанности на 100-й день лактации показала, что у контрольной группы средний балл составил 2,5, тогда как у опытных групп он достиг 2,75. Это различие в 0,25 балла было в пользу коров, получавших рационы с содержанием сырого протеина 17,0 % и 17,4 %, а также долей нераспадаемого в рубце протеина 36,7 % и 38,0 %, в отличие от контроля (16,0 % СП и 35,0 % НРП).

Изучение влияния использования защищенных белковых добавок в рационах кормления коров на показатели их воспроизводительной функции через исследование оплодотворяемости коров после первого осеменения, расчета индекса осеменения и сервис-периода. Анализ данных, отражающих воспроизводительные способности коров в экспериментальных группах, выявил, что показатели у животных опытных групп оказались выше, однако различия с контрольной группой регистрировались только на уровне статистической тенденции (таблица 4).

Таблица 4

Показатели воспроизводительной функции коров

Показатель	Группа (n=10)		
	Контрольная	I опытная	II опытная
Оплодотворяемость коров после 1-го осеменения, %	40,0	50,0	50,0
Индекс осеменения	2,57±0,76	2,36±0,48*	2,24±0,53*
Сервис-период, дней	147,3±17,82	132,5±14,69*	124,2±16,27*

Обозначения:

* – различия с контрольной группой на уровне тенденции ($p \leq 0,1$).

Тем не менее, анализируя данные таблицы 4, можно сделать вывод, что сервис-период в опытных группах в среднем был короче на 14,8 и 23,1 дня, соответственно, по сравнению с контрольной группой. Наиболее высокие показатели воспроизводительной функции зафиксированы у животных II опытной группы, которым давали соевый шрот.

Кроме того, отмечено увеличение оплодотворяемости коров из опытных групп на 10 % по сравнению с контролем, а также снижение числа осеменений, необходимых на одно результативное оплодотворение, на 0,21–0,33 (при $p \leq 0,1$).

Выводы. Изучено влияние использования защищенных белковых добавок из соевого и подсолнечного сырья в рационах кормления коров на переваримость питательных веществ рационов и показатели воспроизводительной функции животных.

Проведенный научно-хозяйственный опыт показал, что скармливание высокопродуктивным коровам защищенных белковых добавок позволяет улучшить переваримость сырого протеина (на 2,4–3,0 %) и остальных питательных веществ кормов, а также улучшить воспроизводительные функции высокопродуктивных коров. Наилучшие показатели были получены в группе животных, которым скармливали соевый экструдированный шрот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопатко, А.М. Будь здорова, кормилица-корова: Науч.-практ. пособие / А.М. Лопатко, А.М. Субботин, И.В. Сучкова [и др.]. – Орел, 2017. – 413 с.
2. Chojnacka, K. Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture / K. Chojnacka, K. Mikula, G. Izydorczyk [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 291. – Iss. 2. – Article number: 112693.
3. Хазиахметов, Ф.С. Особенности кормления высокопродуктивных коров / Ф.С. Хазиахметов // Рациональное кормление животных. – СПб. - М. - Краснодар : Лань, 2011. – С. 191-206.
4. Григорьев, Н. Современные требования к энергетической и протеиновой питательности кормов и рационов для высокопродуктивных коров / Н. Григорьев // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2007. – № 11. – С. 22-31.
5. Харитонов, Е. Л. Физиология и биохимия питания молочного скота / Е. Л. Харитонов. – Боровск: изво «Оптим пресс», 2011. – 372 с.
6. Рядчиков В.Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных: учебно-практическое пособие / В.Г. Рядчиков. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 328 с.
7. Прохоров, Е.О. Эффективность использования безалкалоидного зерна белого люпина в составе комбикорма при кормлении молочного скота: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.02.08 / Прохоров Евгений Олегович. – М., 2017. – 22 с.
8. Антонович, А.М. Гранулированный люпин в кормлении молодняка крупного рогатого скота / А.М. Антонович // Материалы международной научно-практ. конф., посвящ. 130-летию со дня рожд. акад. ВАСХНИЛ И.С. Попова: – М., 2018. – С. 305-310.
9. Рядчиков, В.Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных: учебно-практическое пособие / В.Г. Рядчиков – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 48 с. – 306 с.
10. Овсянников, А.И. Основы опытного дела в животноводстве. – М.: Колос, 1976. – 276 с.
11. Методика расчета обменной энергии в кормах на основе содержания сырых питательных веществ: Наставление / М.П. Кирилов, Е.А. Махаев, Н.Г. Первов и др.; ГНУ ВНИИЖ РАСХН. – Дубровицы, 2008. – 32 с.

Поступила в редакцию 21.04.2025 г.

EFFECTS OF RUMEN-PROTECTED PROTEIN SUPPLEMENTATION ON NUTRIENT
DIGESTIBILITY AND REPRODUCTIVE FUNCTION OF COWS

N. A. Perova, V. N. Kalaev

In order to study the effect of rumen-protected protein supplements in the diet of highly productive cows on the nutrient digestibility and the reproductive function of animals an experiment was conducted on three groups of highly productive cows. The present studies have shown that the use of protected protein supplements increases the digestibility of crude protein by an average of 2.7%, and also promotes the digestibility of dry and organic matter in feed. Feeding cows in the experimental groups with protected protein supplements led to an improvement in their reproductive functions. This was manifested in a decrease in the insemination index from 2.57 to 2.3 on average for the experimental groups, which indicates an increase in the efficiency of fertilization. The service period also decreased – from 147.3 days to 132.5 and 124.2 days, which indicates a faster recovery of the reproductive function of cows after calving.

Keywords: feeding cows, extruded sunflower meal, extruded soybean meal, digestibility of nutrients, reproductive functions of cows.

Перова Наталья Альвиановна

аспирант кафедры генетики, цитологии и биоинженерии медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия.

E-mail: NATALIY3103@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-1451-9255

SPIN-code: 3135-9870

Perova Natalya A.

Postgraduate Student of the Department of Genetics, Cytology and Bioengineering, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Калаев Владислав Николаевич

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой генетики, цитологии и биоинженерии; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия.

E-mail: dr_huixs@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4247-4509

Kalaev Vladislav N.

Doctor of Biological Sciences, Professor, Chair of genetics, cytology and bioengineering; Voronezh State University, Voronezh, Russia.

ЛОЖНОСКОРПИОНЫ (ARACHNIDA, PSEUDOSCORPIONES) ЦЕНТРАЛЬНОГО ДОНБАССА

© 2025. Е. В. Прокопенко

На настоящий момент в Центральном Донбассе (в пределах территорий Донецкой Народной Республики и Луганской Народной Республики) зарегистрированы 12 видов ложноскорпионов, относящиеся к 4 семействам. Наибольшее количество видов известно в составе семейства Chernetidae (5 видов). Семейство Chthoniidae включает 3 вида, семейства Cheliferidae и Neobisiidae – по два вида. Все отмеченные виды характеризуются широкими ареалами: палеарктическим (4 вида), европейско-азиатским (1 вид), голарктическим (1 вид) и космополитным (1 вид). Наибольшей численностью и широким распространением в регионе характеризуется *Chernes hahnii* (C. L. Koch, 1839), кроме того, часто встречаются *Lamprochernes chyzeri* (Tömösváry, 1883) и *Pselaphochernes scorpioides* (Hermann, 1804).

В статье приведен аннотированный список видов ложноскорпионов с данными о находках в регионе, распространении, биотопических предпочтениях и сезонной динамике численности.

Ключевые слова: ложноскорпионы, Центральный Донбасс, фауна.

Введение. Количество видов ложноскорпионов в мировой фауне достигает 4 307 (26 семейств) [1]. В составе фауны России известно 48 видов [2], что далеко не отражает истинное разнообразие этой группы паукообразных. Значительная часть страны практически не охвачена исследованиями [3]. Это в полной мере касается и Центрального Донбасса (в пределах территорий Донецкой Народной Республики и Луганской Народной Республики) [4].

Целью данной работы было обобщить и проанализировать имеющиеся на сегодня данные о ложноскорпионах региона, их распространении, сезонной динамике численности и биотопических предпочтениях.

Материал и методика исследования. Материал был собран с 1998 по 2025 гг. в 16 пунктах на территории ДНР и ЛНР (табл. 1). Кроме того, использованы сборы В.Е. Скляра, собранные в норах грызунов в с. Хомутово и с. Чермалык, хранящиеся на кафедре зоологии и экологии ДонГУ.

Сбор материала проходил с использованием почвенных ловушек и ручного сбора под корой деревьев, камнями, в норах млекопитающих, жилых помещениях и хозяйственных постройках. Всего было собрано 266 экземпляров половозрелых и ювенильных ложноскорпионов. Материал хранится в личной коллекции автора.

Фотографии сделаны с помощью USB Digital camera Lens Mount, присоединенной к микроскопу Zeiss Primo Star и биноккулярному микроскопу Olympus SZ 51.

Результаты и обсуждение. На настоящий момент в Центральном Донбассе зарегистрированы 12 видов ложноскорпионов, относящиеся к 4 семействам. Видовую принадлежность *Chthonius* sp., двух видов *Ehippichthonius* sp., (Chthoniidae) и двух видов рода *Neobisium* (Neobisiidae) пока установить не удалось. Наибольшее количество видов известно в составе семейства Chernetidae (5 видов), семейство Chthoniidae включает 3 вида, семейства Cheliferidae и Neobisiidae – по два вида.

Таблица 1

Пункты сбора материала		
Название населенного пункта	Координаты	Примечание
Луганская Народная Республика		
пос. Криничное	49°17'N 40°05'E	отделение Луганского природного заповедника «Стрельцовская степь»
пгт. Станица Луганская	48°40'N 39°28'E	отделение Луганского природного заповедника «Придонцовская пойма»
Донецкая Народная Республика		
г. Святогорск	49°02'N 37°35'E	Национальный природный парк «Святые горы»
с. Дроновка	48°55'N 38°02'E	
г. Краматорск	48°43'N 37°33'E	
с. Петровское	48°37'N 37°50'E	
с. Викторовка	48°32'N 36°57'E	
г. Авдеевка	48°08'N 37°44'E	
пгт. Зуевка	48°03'N 38°15'E	Региональный ландшафтный парк «Зуевский»
г. Макеевка	48°03'N 37°57'E	
г. Донецк	48°00'N 37°48'E	
г. Амвросиевка	47°48'N 38°29'E	
с. Назаровка	47°20'N 37°06'E	отделение «Каменные Могилы» заповедника «Степь Донецкая»
с. Чермалык	47°18'N 37°48'E	
с. Хомутово	47°15'N 38°08'E	отделение «Хомутовская степь» заповедника «Степь Донецкая»
пос. Седово	47°04'N 38°09'E	Национальный природный парк «Меотида»
с. Белосарайская Коса	46°52'N 37°19'E	Национальный природный парк «Меотида»

Все отмеченные виды характеризуются широкими ареалами: палеарктическим (4 вида), европейско-азиатским (1 вид), голарктическим (1 вид) и космополитным (1 вид). Наибольшей численностью и широким распространением в регионе характеризуется *Chernes hahnii* (C. L. Koch, 1839), кроме того, часто встречаются *Lamprochernes chyzeri* (Tömösváry, 1883) и *Pselaphochernes scorpioides* (Hermann, 1804).

Ниже приведен аннотированный список видов с данными о находках в регионе, распространении, сезонной динамике численности и биотопических предпочтениях.

Аннотированный список видов ложноскорпионов Центрального Донбасса

Семейство Chthoniidae

Chthonius sp. 1

Материал. ДНР, с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора мыши лесной, 1♀, 19.06.1968, 1♂, 1.07.1968, 3♀, 30.07.1968, сб. Скляр В.Е.; нора полевки обыкновенной, 2♀, 26.07.1968, 1♂, 30.07.1968, сб. Скляр В.Е.

Замечание. Видовую принадлежность определить не удалось.

Ephippiochthonius sp. 1

Материал. ДНР, г. Макеевка, дачи, 1♀, 13-22.06.2016, сб. Семыкина О.; г. Амвросиевка, поле озимой пшеницы, 1♀, 20-27.05.2017, Литвиченко Н.

Замечание. Видовую принадлежность определить не удалось.

Ephippiochthonius sp. 2

Материал. ДНР, г. Донецк, Путиловский лес, байрачная дубрава, почвенные ловушки, 1♀, 20-27.05.2023; с. Назаровка, заповедник «Каменные Могины», луговая растительность у колодца, 1♀, 16-23.05.2008, 1♂, 15-22.08.2006, сб. Савченко Е.Ю.; с. Чермалык, нора мыши лесной, 1♀, 26.01 (?).1968, 1♂, 1♀, 4.05.1968, 3♂, 1♀, 22.05.1968, 2♂, 18.08.1968, сб. Скляр В.Е.; нора мыши домовой, 1♀, 4.06.1968, 1♂, 29.08.1968, сб. Скляр В.Е.; нора полевки обыкновенной, 2♀, 22.05.1968, 2♀, 9.08.1968, сб. Скляр В.Е.; нора хомячка серого, 1♀, 17.08.1968, сб. Скляр В.Е.; с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора мыши лесной, 3♂, 1♀, 20.06.1968, 5♂, 10♀, 21.06.1968, 2♂, 1♀, 24.06.1968, 1♂, 2♀, 17.07.1968, 1♂, 30.09.1967, сб. Скляр В.Е.; 1♂, 1♀, нора хомячка серого, 12.05.1968, 2♀, 17.07.1968, 1♀, 20.07.1968, сб. Скляр В.Е.; нора полевки обыкновенной, 3♀, 19.06.1968, 1♀, 27.07.1968, сб. Скляр В.Е.

Замечание. Видовую принадлежность определить не удалось.

Семейство Neobisiidae*Neobisium* sp. 1

Материал. ДНР, г. Макеевка, поле, 1♀, осень 2016, сб. Семькина О.; с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора мыши лесной, 1♂, 6.03.1968, сб. Скляр В.Е.

Замечание. Видовую принадлежность определить не удалось.

Neobisium sp. 2

Материал. ЛНР, с. Криничное, заповедник «Стрельцовская степь», нора сурка, 1♀, 9.05.1998.

Замечание. Видовую принадлежность определить не удалось.

Семейство Cheliferidae*Chelifer cancroides* (Linnaeus, 1758)

Космополитический вид [1]. РФ: Астраханская, Белгородская, Брянская, Воронежская, Московская, Ростовская, Рязанская, Свердловская, Челябинская области, Пермский край, Приморский край, Башкортостан, Бурятия, Крым [3, 5–9].

Вид часто обнаруживается в гнездах птиц, гуано летучих мышей, пчелиных ульях и синантропных местообитаниях, типичный обитатель курятников, чердаков, жилых помещений (селится среди книг и бумаг, под отстающими обоями, в белье); реже встречается в природе: в листовой подстилке, дуплах и под корой деревьев [7, 9–12]. В естественной среде обитания встречается с мая по август [12].

В Центральном Донбассе отмечен только в пчелином улье и норе полевки с июня по октябрь.

Материал. ДНР, с. Викторівка, пчелиный улей, 2♀, 20.06.2023, 5♂, 6♀, октябрь 2023, сб. Маевская Ю.Е.; с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора полевки обыкновенной, 1♀, 17.07.1968, сб. Скляр В.Е.

Dactylochelifer latreillii (Leach, 1817) (рис. 1, Г)

Европа, Алжир, Тунис, Армения, Азербайджан, Грузия, Иран, Казахстан; Россия: Крым [1, 6].

Обитает в лесной подстилке, под корой, в птичьих гнездах, норах млекопитающих, компостных кучах [6, 11, 12].

В Центральном Донбассе отмечен преимущественно в листовой подстилке древесных насаждений и естественных лесов с апреля по июнь.

Материал. ДНР, с. Назаровка, заповедник «Каменные Могилы», осинник, в почвенных ловушках, 1♂, 15-22.05.2006, 1♀, 16-23.05.2007; пос. Седово, заболоченный луг, в почвенных ловушках, 1♀, 24.04-8.05.2016; с. Белосарайская Коса, лесополоса, в почвенных ловушках, 2♀, 17-24.06.2009.

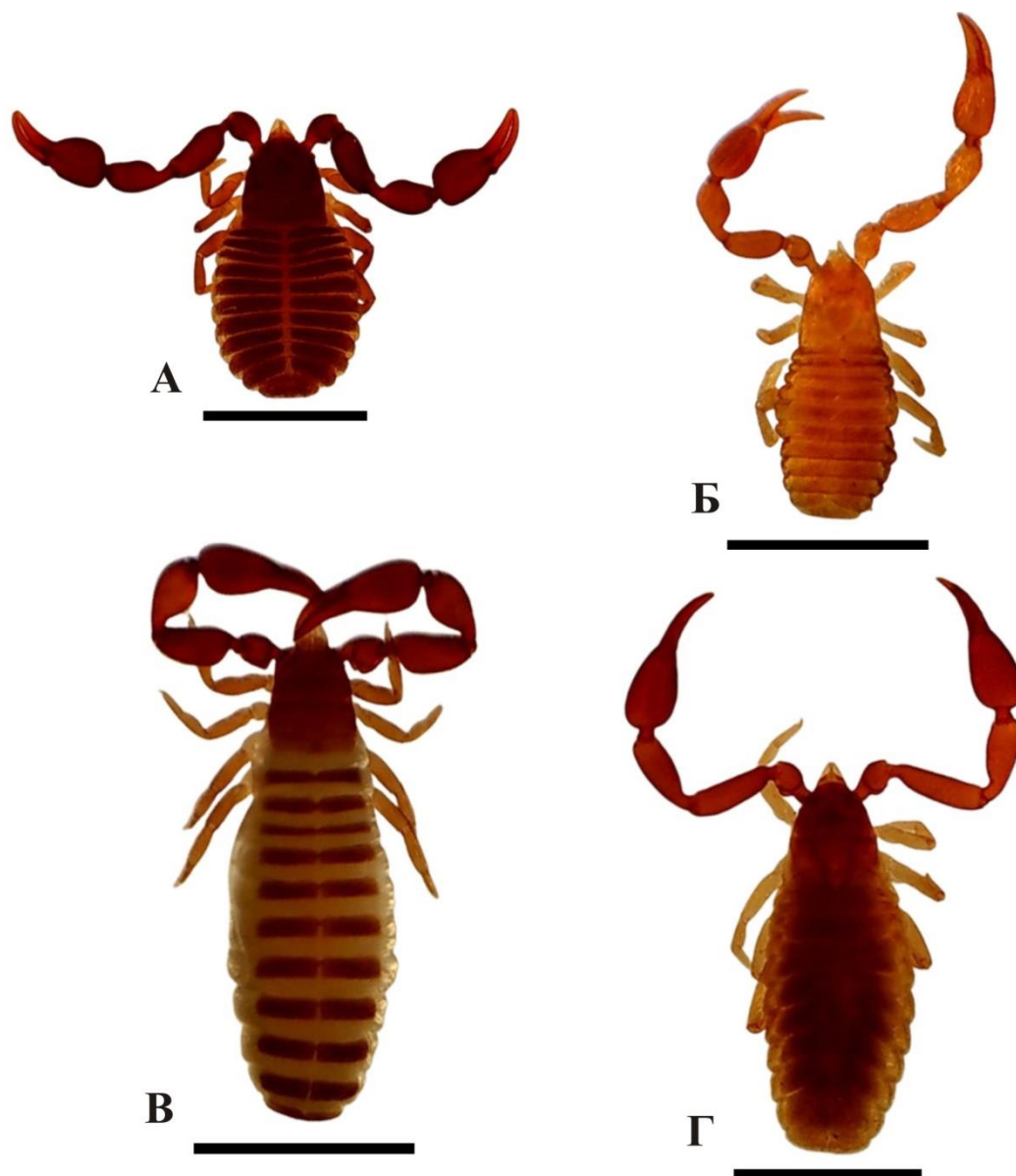


Рис. 1. *Chernes cimicoides* (А), *Pselaphochernes scorpioides* (Б), *Lamprochernes chyzeri* (В), *Dactylochelifer latreillii* (Г), масштабная шкала – 1 мм

Семейство Chernetidae

Allochernes wideri (C. L. Koch, 1843)

Европа, Алжир, Азербайджан, Армения, Грузия, Иран, Турция, Пакистан, Индия; Россия: Белгородская, Московская области, Башкортостан [1, 5, 8, 9].

Обитает под корой деревьев, в гниющих растительных остатках, муравейниках и птичьих гнездах, норах млекопитающих, в листовой подстилке и компостных кучах [13].

В регионе отмечен только в курином помете и норах грызунов с июля по сентябрь.

Материал. ЛНР, пгт. Станица Луганская, курятник, сухой помет, 2♂, 5♀, 6 juv., 27.07.2003, сб. Кондратенко А.В. ДНР, с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора хомячка серого, 2♀, 23.09.1967, сб. Скляр В.Е.; с. Чермалык, нора хомячка серого, 1♀, 17.08.1967, сб. Скляр В.Е.

Chernes cimicoides (Fabricius, 1793) (рис. 1, А)

Европа, Армения, Грузия, Казахстан, Турция; РФ: Калужская, Кировская, Куйбышевская, Ленинградская, Московская, Оренбургская, Самарская, Саратовская, Сахалинская, Свердловская, Челябинская области, Пермский край, Карелия, Крым [1, 3, 6, 8, 9, 12, 14].

Обитает под корой и в дуплах деревьев, листовой подстилке, гниющей древесине, муравейниках, птичьих гнездах [6, 9, 11, 14].

В регионе найден в лиственных древесных массивах в апреле.

Материал. ДНР, г. Святогорск, НПП «Святые горы», Маяцкое лесничество, 3♂, 3♀, 30.04.2005; г. Донецк, древесное насаждение, на стволе дуба, 1♀, 14-28.04.2025.

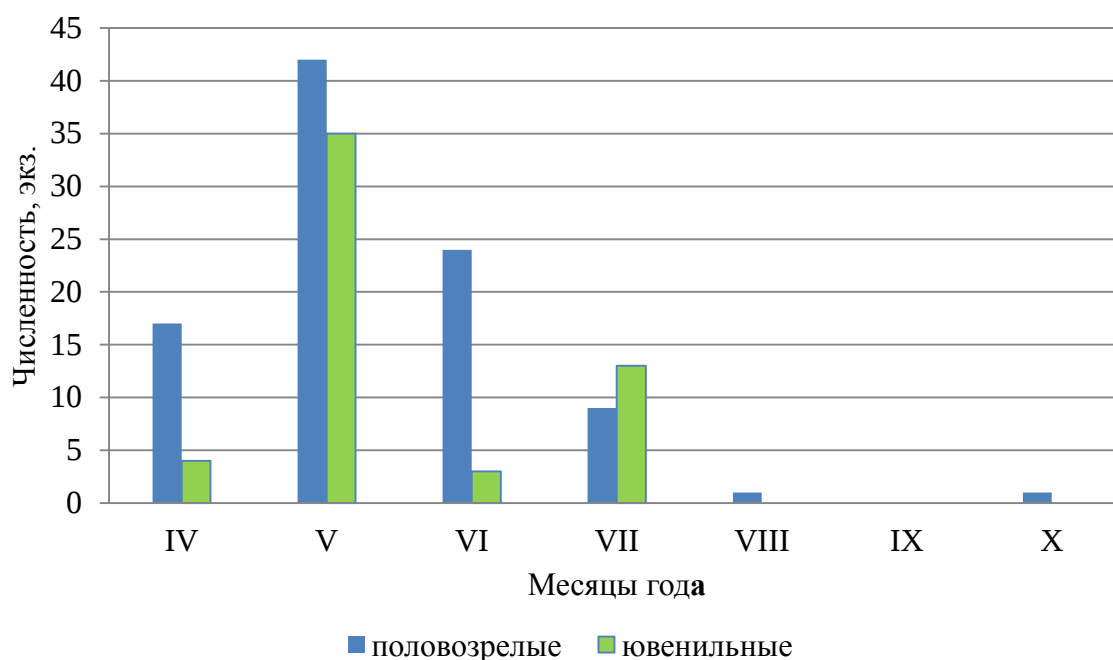
Chernes hahnii (C. L. Koch, 1839)

Европа, Турция, Армения, Азербайджан, Грузия, Иран, Казахстан, Китай; РФ: Астраханская, Кировская, Куйбышевская, Московская, Самарская, Сахалинская области, Пермский край, Чечено-Ингушетия [1, 5, 8].

Вид относится к характерным обитателям древесных биотопов (под корой и в дуплах, листовой подстилке), кроме того, обнаруживается в птичьих гнездах и муравейниках [5, 9, 11, 12].

В Донбассе большинство экземпляров собрано под корой деревьев в пойменных и байрачных лесах. Пик численности и половозрелых, и ювенильных стадий приходится на май, самки с яйцевыми мешками отмечены во второй декаде июня (рис. 2).

Материал. ЛНР, с. Криничное, заповедник «Стрельцовская степь», пойма р. Черепаха, под корой ивы, 4♂, 3♀, 9 juv, 9.05.2003, сб. Мартынов В.В.; пгт. Станционно-Луганское, Станционно-Луганский заповедник, 3♂, 2♀, 2 juv, 16.05.2003; 1♂, 1♀, 22-29.06.2004, сб. Мартынов В.В.; сосновый лес, под корой сосны, 1♂, 05.05.2003, сб. Мартынов В.В.; пойменный лес, почвенные ловушки, 2♀, 2-4.05.2003; под корой ясеня, 9♂, 5♀, 12 juv, 6.05.2003, сб. Мартынов В.В.; под корой дуба, 2♂, 7♀, 11 juv, 2.05.2003, сб. Мартынов В.В.; поляна, 1♀, 2.10.2004. ДНР, г. Святогорск, НПП «Святые горы», 1♂, 30.04.2005; с. Дроновка, пойменный лес, под корой, 1♂, 1 juv, 17.07.2003; окр. с. Петровское, лиственный лес, под корой ильма, 6♂, 12♀ (5 самок – с яйцевыми мешками), 2 juv, 17.06.2005, сб. Мартынов В.В.; г. Краматорск, РЛП «Краматорский», участок «Беленькое», степь, 7♂, 6♀, 4 juv, 25.04.2005; г. Авдеевка, лиственный лес, под корой вербы, 1♀, 10.06.2003; пгт. Зуевка, РЛП «Донецкий Кряж», 2♀, 26.04.2003; г. Донецк, Путиловский лес, байрачная дубрава, под корой ясеня, 1♂, 1♀, 1 juv, 22.06.2003, сб. Мартынов В.В.; муравейник, 1♀, 14.04.2000, сб. Мартынов В.В.; парк им. Ленинского Комсомола, 1♀, 8.08.2000; с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», нора полевки обыкновенной, 1♀, 11.05.1968, 2♀, 15.05.1968, 2♀, 17.05.1968, сб. Скляр В.Е.; нора хомячка серого, 1♀, 12.06.1968, сб. Скляр В.Е.; нора лесной мыши, 4♂, 4♀, 9.07.1968, сб. Скляр В.Е.

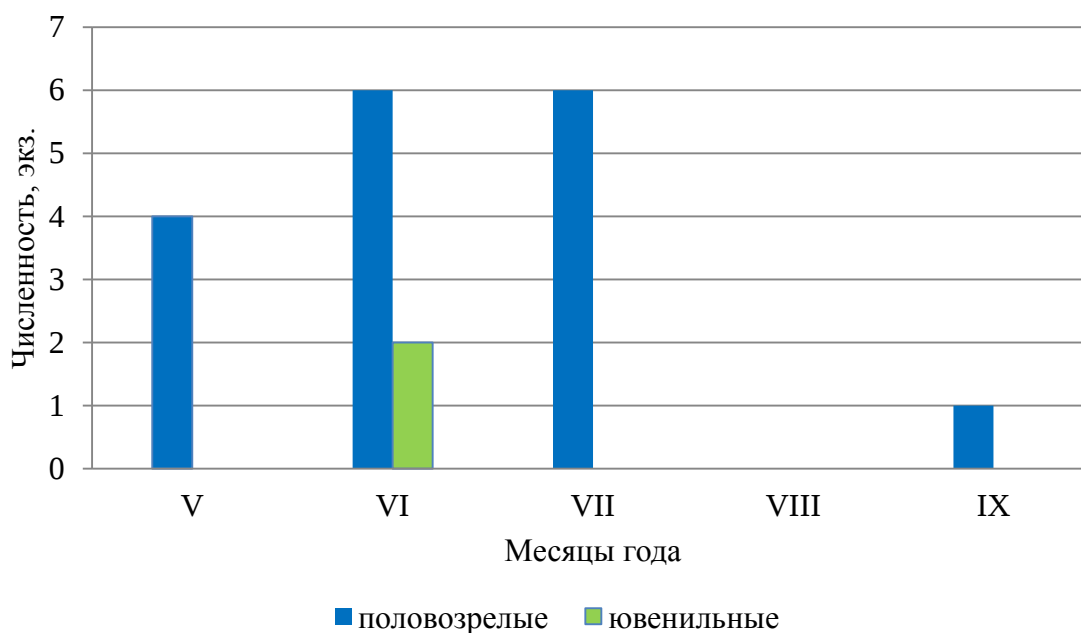
Рис. 2. Сезонная динамика *Chernes hahnii*

Lamprochernes chyzeri (Tömösváry, 1883) (рис. 1, В)

Европа, Турция, Грузия, Казахстан; РФ: Кировская, Свердловская области, Крым [1, 6, 8].

Вид обитает под корой деревьев, в подстилке и мхе, птичьих гнездах, муравейниках, теплицах и компостных кучах [6, 13].

В нашем материале – под корой лиственных и хвойных деревьев, в листовой подстилке, навозе кролей. Половозрелые особи отмечены с мая по октябрь с пиком в июне и июле (рис. 3).

Рис. 3. Сезонная динамика *Lamprochernes chyzeri*

Материал. ЛНР, Станично-Луганский заповедник, под корой сосны, 1♀, 5.05.2003, сб. Мартынов В.В.; пойменный лес, почвенные ловушки, 2♂, 2-4.05.2003; пойменный лес, под корой дуба, 1♀, 2.05.2003, сб. Мартынов В.В. ДНР, с. Дроновка, 1♂, 30.06.2000; пойменный лес, 1♀, 2♀, 3.07.2002; под корой, 2♂, 2♀ (1 самка с яйцевым мешком), 6.07.2003; г. Авдеевка, лиственный лес, под корой вербы, 3♀, 1 juv, 10.06.2003; навоз кролей, 1♂, 9.09.2002, сб. Никулина Т.В.; г. Донецк, Путиловский лес, под корой ясеня, 1♂, 1♀, 1 juv, 22.06.2003, сб. Мартынов В.В.

Pselaphochernes scorpoides (Hermann, 1804) (рис. 1, Б)

Европа, Алжир, Марокко, Израиль, Ливан, Сирия, Иран, Турция, Грузия, Азербайджан, Армения, Узбекистан, Пакистан, США; Россия: Московская, Белгородская области [1, 6].

Вид обнаруживается в листовой подстилке, мертвой древесине, гнездах птиц, норах млекопитающих, муравейниках; часто встречается в синантропных местообитаниях (компостные кучи, навоз, помет животных) [6, 9, 11, 15].

В Центральном Донбассе отмечен в пойменных и байрачных лесах, искусственных древесных насаждениях, наиболее часто – в листовой подстилке, с апреля по октябрь.

Материал. ЛНР, пгт. Станица Луганская, Станично-Луганский заповедник, 1♀, 2.10.2004. ДНР, г. Донецк, Путиловский лес, байрачная дубрава, почвенные ловушки, 1♀, 20-27.05.2003; парк им. Ленинского Комсомола, почвенные ловушки, 1♀, 20-27.05.03; урочище Бахмут, 3-й ставок, лесополоса, 1♀, 24.04.1999, сб. Трихлеб Т.; с. Назаровка, заповедник «Каменные Могилы», лесополоса, почвенные ловушки, 1♀, 15-22.05.2006, сб. Савченко Е.Ю.; с. Хомутово, заповедник «Хомутовская степь», лесополоса, 1♀, 1.07.2006.

Благодарности. Автор приносит свою искреннюю благодарность И.С. Турбанову (Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок) и В.Б. Колесникову (Воронежский государственный педагогический университет) за помощь в таксономической идентификации материала. Кроме того, автор благодарен коллегам, предоставившим материал для обработки.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Pseudoscorpiones Catalog [Electronic resource]. – Natural History Museum Bern, 2022. – URL: <http://wac.nmbe.ch> (дата обращения: 10.05.2022).
2. Михайлов К. Г. Арахнология в России/СССР // Аспекты биоразнообразия : сб. тр. Зоол. музея МГУ им. М. В. Ломоносова. – 2016. – Т. 54, ч. 2. – С. 655–691.
3. Турбанов И. С., Колесников В. Б., Пржиборо А. А. К фауне ложноскорпионов (Arachnida: Pseudoscorpiones) сфагновых болот Северо-Запада России и юга Чили // Труды ИБВВ РАН. – 2017. – Вып. 79 (82). – С. 228–235.
4. Прокопенко Е. В., Турбанов И. С., Колесников В. Б. Материалы к изучению ложноскорпионов (Pseudoscorpiones) Донбасса // Биота, генезис и продуктивность почв : материалы XIX Всерос. совещ. по почв. зоол. / под ред. А. В. Тиунова, К. Б. Гонгальского, А. В. Уварова. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2022. – С. 131–132.
5. Schawaller W. Pseudoskorpione aus der Sowjetunion, Teil 3 (Arachnida: Pseudoscorpiones) // Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde. Ser. A. – 1989. – Bd. 440. – S. 1–30.
6. Панченко А. А. Ложноскорпионы (Arachnida: Pseudoscorpionidea) Горного Крыма (Украина) // Экологическое разнообразие почвенной биоты и биопродуктивность почв : материалы докл. IV (XIV) Всерос. совещ. по почв. зоол. / под ред. Б. Р. Стригановой. – Тюмень, 2005. – С. 189–190.

7. Белоусова Н. М. Население членистоногих гнезд синантропных и гемисинантропных птиц селитебных районов Приханкайской равнины : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.05 / Белоусова Наталья Михайловна. – Владивосток, 2012. – 24 с.
8. Козьминых В. О. Список ложноскорпионов (Arachnida: Pseudoscorpiones) Урала // Фауна Урала и Сибири. – 2017. – № 2. – С. 38–45.
9. Krajčovičová K., Matyukhin A. V., Christophoryová J. First comprehensive research on pseudoscorpions (Arachnida: Pseudoscorpiones) collected from bird nests in Russia // Turkish Journal of Zoology. – 2018. – Vol. 42. – P. 480–487. – DOI: 10.3906/zoo-1801-47.
10. Краснопевцева В. М. Дополнение к списку паукообразных Байкальского заповедника // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири : сб. ст. / под ред. В. В. Непомнящего. – Новосибирск, 2016. – С. 26–27.
11. Červená M., Krajčovičová K., Christophoryová J. Recent data about diversity and distribution of pseudoscorpions (Arachnida: Pseudoscorpiones) collected from different habitat types in Slovakia // Klapalekiana. – 2020. – Vol. 56. – P. 1–18.
12. Ostrovsky A. M. On the fauna of false scorpions (Arachnida: Pseudoscorpiones) of south-eastern Belarus // Ecosystem Transformation. – 2020. – Vol. 3, No. 2. – P. 11–21.
13. Kárpáthgyi P. Pseudoscorpions of Hungary // Folia Historico-Naturalia Musei Matraensis. – 2007. – Vol. 31. – P. 81–90.
14. Кондратьев Е. Н. Ложноскорпионы (Arachnida: Pseudoscorpiones), найденные в гнездах птиц на территории Хвалынского района Саратовской области // Научные труды Национального парка «Хвалынский» : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2021. – С. 31–32.
15. Nassirkhani M. A redescription of *Pselaphochernes scorpioides* (Hermann) (Pseudoscorpiones; Chernetidae) // International Journal of Avian & Wildlife Biology. – 2018. – Vol. 3, No. 3. – P. 240–243. – DOI: 10.15406/ijawb.2018.03.00092.

Поступила в редакцию 13.05.2025 г.

PSEUDOSCORPIONS (ARACHNIDA, PSEUDOSCORPIONES) OF CENTRAL DONBAS

E. V. Prokopenko

To date, 12 pseudoscorpion species belonging to 4 families have been recorded in Central Donbas (within the territories of the Donetsk People's Republic and Lugansk People's Republic). The family Chernetidae is represented by the highest number of species (5), the family Chthoniidae contains three species, the families Cheliferidae and Neobisiidae each contain two species. All recorded species are characterized by broad distribution ranges: Palearctic (4 species), Euro-Asian (1 species), Holarctic (1 species), and cosmopolitan (1 species). *Chernes hahnii* (C. L. Koch, 1839) shows the highest abundance and widest distribution in the region, while *Lamprochernes chyzeri* (Tömösváry, 1883) and *Pselaphochernes scorpioides* (Hermann, 1804) are also frequently encountered.

The paper presents an annotated checklist of pseudoscorpion species with data on their regional occurrences, distribution patterns, habitat preferences, and seasonal population dynamics.

Keywords: pseudoscorpions, Central Donbas, fauna.

Прокопенко Елена Васильевна

кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: helen_procop@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1859-3241
AuthorID: 636053

Prokopenko Elena Vasilievna

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of
Zoology and Ecology Department, Donetsk State
University, Donetsk, DPR, Russia.
E-mail: helen_procop@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1859-3241
AuthorID: 636053

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСТРАКТА *SCUTELLARIA BAICALENSIS* НА УРОВЕНЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ САХАРОЗЫ В УСЛОВИЯХ «СОЦИАЛЬНОГО» СТРЕССА

© 2025. В. В. Уранова, Н. А. Ломтева

Результаты исследования отражают влияние «социального» стресса и экстракта *Scutellaria baicalensis* (SB) на уровень потребления сахарозы у экспериментальных животных. Установлено значительное влияние «социального» стресса на развитие депрессивных состояний у животных, что проявилось в снижении их предпочтения к сахарозному раствору, указывая на утрату интереса к вознаграждениям. Как агрессоры, так и жертвы, испытывающие «социальный» стресс, показали пониженную потребность в удовольствии. Введение экстракта SB увеличивало потребление сахарозы, что указывает в пользу его возможной терапевтической эффективности для коррекции тревожно-депрессивных состояний. Динамика уровней глюкозы в плазме крови также подтверждает влияние экстракта SB на метаболические реакции в условиях стресса. Данное исследование подчеркивает необходимость дальнейшего анализа экстракта SB и его возможностей, что может привести к новым фитотерапевтическим методам в области психического здоровья.

Ключевые слова: «социальный» стресс, *Scutellaria baicalensis*, сахароза, ангедония, глюкоза.

Введение. В современном мире стресс стал неотъемлемой частью повседневной жизни, и его влияние на здоровье человека вызывает все больший интерес ученых и медицинских работников [1–6]. Социальные стрессоры, такие как межличностные конфликты, давление на работе и изменения в политической обстановке, оказывают значительное влияние на физическое и психоэмоциональное состояние [7, 8]. В то же время имеются многочисленные данные, подтверждающие, что такие факторы могут изменять пищевые привычки и предпочтения, в том числе и уровень потребления сахара [9, 10]. В современных условиях, где социальные взаимодействия играют ключевую роль в жизни общества, понимание причин и последствий «социального» стресса поможет эффективно разрабатывать меры, направленные на минимизацию его негативных эффектов, что, в свою очередь, будет способствовать сохранению здоровья [11, 12].

Научные исследования подтверждают, что длительное воздействие стресса может приводить к возникновению целого ряда заболеваний, включая болезни желудочно-кишечного тракта, сердечно-сосудистой и центральной нервной систем [2, 3]. Выявление взаимосвязи между факторами стресса и теми биохимическими процессами, которые они инициируют, позволит разработать специфические терапевтические средства, которые помогут устранить негативные последствия стресса на человеческий организм. Известно, что социальные стрессоры активируют симпатическую нервную систему, что приводит к реакции «бей или беги». Такого рода активация вызывает усиленное выделение адреналина и норадреналина надпочечниками в кровоток, что, в свою очередь, приводит к учащению сердечного ритма и повышению артериального давления. Такие изменения способствуют улучшению кровоснабжения внутренних органов и мышц, увеличивая приток кислорода в легкие и усиливая тонус мышц. Кроме этого, рефлекторное подавление некоторых периферических функций, например, пищеварения, позволяет организму более эффективно реагировать на негативные воздействия окружающей среды [1].

В ходе исследований было установлено, что «социальный» стресс оказывает значительное влияние на функционирование иммунной системы, что связано с активацией гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси (ГГН-оси). Данный процесс инициируется повышенной экспрессией кортикотропин-рилизинг-гормона, который, в свою очередь, стимулирует гипофиз к секреции адренкортикотропного гормона. Последний активирует надпочечники, что приводит к повышенной выработке кортизола, играющего ключевую роль в адаптации организма к стрессовым условиям, однако его высокие уровни имеют подавляющее действие на иммунный ответ. Доказано, что повышенная концентрация кортизола негативно сказывается на активности лимфоцитов, что, в свою очередь, уменьшает защитные функции организма против инфекций. Также наблюдается подавление синтеза цитокинов, которые являются важными сигнальными молекулами для координации взаимодействия клеток иммунной системы при влиянии кортизола. «Социальный» стресс нарушает регуляцию воспалительных процессов, что подтверждается данными о том, что хроническое воздействие стресса способствует активации воспалительных реакций, увеличивая риск развития таких хронических патологий, как диабет, онкологические заболевания и сердечно-сосудистые дисфункции [11, 12].

Одним из естественных способов смягчения последствий стресса является использование препаратов на основе лекарственного растительного сырья. Одним из такого рода средств может быть экстракт *Scutellaria baicalensis* (SB), растение, известное своими седативными и адаптогенными свойствами. В этом контексте важно исследовать, как сочетание «социального» стресса и действия экстракта SB может повлиять на уровень потребления сахара. Понимание такого рода взаимосвязей не только углубит знания о механизмах стресса, но и может привести к новым подходам в его профилактике и лечении, а также в коррекции пищевых привычек. SB является одним из наиболее изученных видов рода *Scutellaria*, широко известным благодаря своим фармакологическим свойствам и применению в традиционной медицине. Данное многолетнее травянистое растение встречается преимущественно в восточной Азии, включая Сибирь и Китай, где оно используется в качестве лекарственного средства в различных травяных составах. Основу научного интереса к SB составляет его уникальный химический состав, который включает в себя различные биоактивные компоненты. Основными соединениями, обнаруженными в SB, являются флавоноиды, которые представляют собой важную группу полифенольных соединений, обладающих выраженной антиоксидантной активностью. Среди них наиболее изученными являются байкалин, вогонин и байкалеин. Данные вещества не только способствуют защите клеток от окислительного стресса, но также участвуют в модуляции различных биологических процессов, включая противовоспалительные реакции и регуляцию иммунного ответа. Кроме флавоноидов, в SB были обнаружены и другие классы соединений, такие как алкалоиды, терпеноиды и органические кислоты. Установлено, что различные терпены демонстрируют потенциал в борьбе с воспалительными процессами. Таким образом, многообразие химических соединений в составе SB открывает широкие возможности для его использования в медицинских целях [13–15].

В последние годы в рамках современных исследований уделяется внимание экстрактам, полученным из различных видов *Scutellaria*, с использованием методов экстракции, что позволяет выделить и концентрировать биологически активные вещества, повышая биодоступность соединений и раскрывая новые горизонты для научных разработок в области фармацевтики и нутрициологии.

В связи с вышесказанным целью работы явилось изучение влияния «социального» стресса и экстракта *SB* на уровень потребления сахарозы и ее концентрацию в плазме крови экспериментальных животных.

Материал и методика исследования. Корни четырехлетнего *SB*, полученные методом культивирования на территории Астраханской области, стали объектом исследования. Заготовку, сушку и хранение изучаемого растительного сырья осуществляли согласно требованиям ГФ XV [16]. Изготовление экстракта проводили методом мацерации с применением 70 %-го спирта этилового с последующим выдерживанием в течение 2 суток при температуре 8–10 °С для осаждения балластных веществ, которые отделяли фильтрованием для получения прозрачной жидкости. После получали густой экстракт путем удаления спирта этилового с помощью ротационного испарителя (Hei-VAP Core HL, Германия) под вакуумом при температуре не выше 60 °С.

Работа была проведена на 80 самцах нелинейных белых крыс в возрасте 5–6 месяцев массой 246,5±27,84 г. Эксперимент включал в себя два этапа: изучение поведенческих реакций в условиях нормы и при моделировании «социального» стресса. Оценку влияния «социального» стресса и экстракта *SB* на потребление раствора сахарозы выполняли на животных шести сформированных групп: контрольной (группа I, n=20, вода для инъекций); животных, которым вводили экстракт *SB* (группа II, n=20); особей агрессоров (n=10) и жертв (n=10), подвергавшихся воздействию межсамцовых конфронтаций (группы III–IV, n=10); крыс с доминантным (n=10) и субмиссивным (n=10) типами поведения, получавших *SB* в условиях «социального» стресса (группы V–VI).

Введение воды для инъекций и экстракта *SB* (100 мг/кг/сут) осуществляли однократно в сутки внутривенно на протяжении 14 дней. Моделирование «социального» стресса проводили путем установления межсамцовых конфронтаций в условиях парного сенсорного контакта при ежедневном его воспроизведении на протяжении 21 дня [17]. Оценку влияния «социального» стресса и экстракта корней *SB* на уровень депрессивности проводили с помощью теста предпочтения раствора сахарозы.

Тест заключается в том, что в течение суток крысам одновременно был предоставлен доступ к выбору между двумя идентичными поилками, одна из которых содержала 1 %-ный раствор сахарозы, а другая – обычную воду. Расположение поилок менялось через 12 ч, чтобы исключить эффект предпочтения места. Предпочтение раствора сахарозы вычисляли по следующей формуле (1):

$$\text{Предпочтение (\%)} = \frac{\text{масса раствора сахарозы}}{\text{суммарная масса потребленной жидкости}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Потребление растворов фиксировали с помощью весов, путем взвешивания поилок до и после окончания эксперимента [18].

Забор крови осуществлялся путем действия эфирного наркоза методом декапитации в норме или после воздействия стресса. Плазму получали путем центрифугирования и отделения ее от эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов. Содержание глюкозы в биологическом материале (плазма) было определено ферментативным (гексокиназный) ультрафиолетовым методом (ммоль/л). Метод основан на том, что глюкоза под влиянием гексокиназы и аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) превращается в глюкозо-6-фосфат, который при взаимодействии окисленным никотинамидадениндинуклеотидом (НАД) под воздействием глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы преобразуется в глюконат-6-фосфат и восстановленный никотинамид-аденин-динуклеотид (НАДН).

1. Глюкоза + АТФ $\xrightarrow{\text{гексокиназа}}$ Глюкоза-6-фосфат + Аденозиндифосфат;
2. Глюкоза-6-фосфат + НАД $\xrightarrow{\text{Глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа}}$ Глюконат-6-фосфат + НАДН + H⁺.

Величина абсорбции пропорциональна концентрации глюкозы в пробе.

Исследуемым материалом являлась свежая плазма без следов гемолиза. В исследовании применяли набор реагентов «ГЛЮКОЗА-ВИТАЛ-3». Реагент №1 – буфер рН 7,8: трис(гидроксиметил)аминометан – 80 ммоль/л; $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ – 4 ммоль/л. Реагент № 2 – лиофилизат: гексокиназа – 1500 U/л; глюкоза-6-фосфатдегидрогеназа – 1500 U/л; АТФ – 1,7 ммоль/л; НАД – 1,7 ммоль/л. Реагент №3 – калибратор: глюкоза – 10 ммоль/л.

Проведение анализа осуществлялось при длине волны 340 нм. Длина оптического пути 1 см. Температура инкубации 18–25 °С. Фотометрирование проводили против холостой пробы. Расчет концентрации глюкозы (С) (2):

$$C = \frac{A_{\text{оп}}}{A_{\text{кал}}} \cdot 10 \text{ ммоль/л}, \quad (2)$$

где $A_{\text{оп}}$ – адсорбция опытной пробы; $A_{\text{кал}}$ – адсорбция калибровочной пробы; 10 ммоль/л – концентрация глюкозы а калибраторе [19].

Статистическую обработку полученных результатов выполняли с использованием пакета «Statistica 10», определяя нормальность распределения данных, среднее арифметическое значение (М), ошибку среднего арифметического значения (m) и достоверность различий показателей в группах. Установление нормальности распределения значений проводили, используя тест Шапиро-Уилка, результаты которого позволили сделать вывод о том, что полученные в ходе эксперимента значения подчиняются закону нормального распределения. Отличие в процентном изменении уровня потребления сахарозы считались при $p < 0,05$ по точному критерию Фишера (двусторонний). Для обоснования различий между показателями уровней глюкозы в группах был применен критерий Стьюдента, которые признавались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение. Одним из ключевых проявлений депрессии является гедонический дефицит, также известный как ангедония, который характеризуется снижением или отсутствием желания испытывать удовольствия. В переносе на животные модели для верификации наличия депрессивных состояний применяется тест на предпочтение сахарозного раствора. Тест осуществляется при условии обеспечения условий свободного выбора, где животные могут самостоятельно выбирать между сахарозным раствором и чистой водой. Данный подход позволяет установить степень утраты интереса к наградам и оценить воздействие на поведение факторов, способствующих или подавляющих проявления депрессивных симптомов. На протяжении двадцати четырех часов животным был предоставлен одновременный доступ к выбору между двумя идентичными поилками. Одна из поилок содержала обычную водопроводную воду, тогда как в другой находился 1 % раствор сахарозы. Спустя двенадцать часов осуществляли смену местоположения поилок, что было направлено на минимизацию влияния эффекта предпочтения места на выбор животных.

Результаты исследования в тесте на предпочтение раствора сахарозы показали, что в условиях отсутствия стресса не наблюдалось статистически значимых различий (рис. 1). Моделирование «социального» стресса у животных, которые получали воду для инъекций, привело к достоверному снижению потребления раствора сахарозы

агрессорами в 1,9 раза, а жертвами в 2,4 раза ($p < 0,05$) относительно контрольной группы. Сравнение данных особей, получавших воду для инъекций при отсутствии стресс-реакции, и животных, которым вводили экстракт *SB* в условиях «социального» стресса, показало отсутствие достоверных различий. Введение экстракта *SB* особям групп, которые были подвержены стрессу, привело к увеличению потребления раствора сахарозы в 1,7 раза у агрессоров и 1,6 раза ($p < 0,05$) для жертв относительно агрессоров группы стресса. Зафиксировано более выраженное возрастание предпочтения 1 %-ного раствора сахарозы у группы экстракта *SB*, в которой на протяжении 21 дня формировали тревожно-депрессивное состояние, относительно жертв, в 2,2 раза у особей, имеющих доминантный тип поведения, и в 2,1 раза ($p < 0,05$) – у субмиссивного.

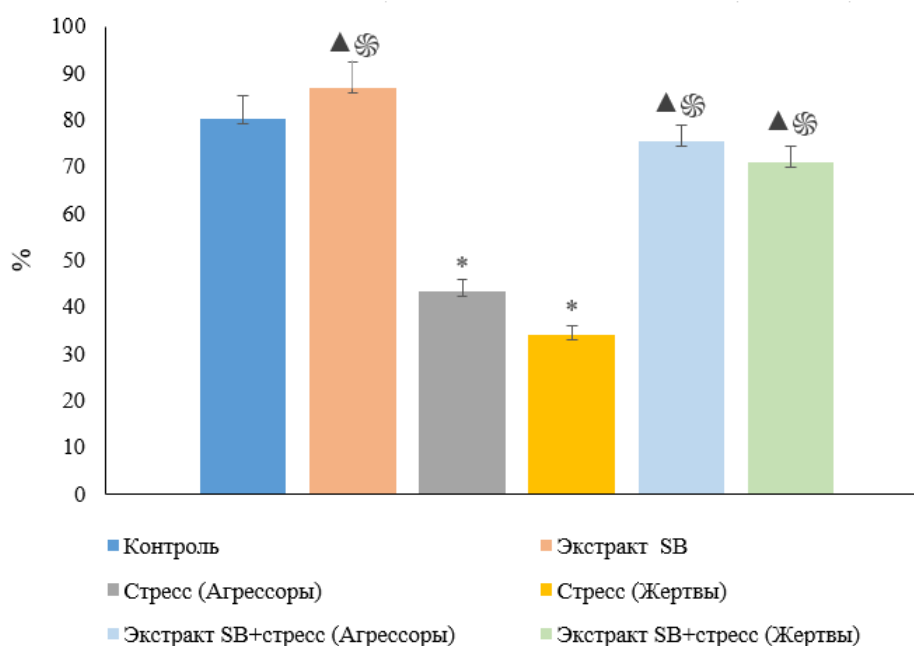


Рис. 1. Влияния экстракта *SB* на уровень потребления сахарозы в условиях «социального» стресса

Примечание: * – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы первых суток. ▲ – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы агрессоров первых суток. ⊙ – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы жертв первых суток.

Следующий этап эксперимента был направлен на установление изменения уровней глюкозы в плазме крови животных, участвующих в исследовании. Анализ данных, полученных для группы экстракта *SB*, показал, что относительно контроля при отсутствии стресса, вызванного межсамцовыми конфронтациями, значимых изменений не наблюдалось (рис. 2). Формирование «социального» стресса у особей, которые получали воду для инъекций, спровоцировало увеличение концентрации глюкозы сравнительно с контрольной группой в 1,3 раза для агрессоров и 1,7 раза для жертв ($p < 0,05$). Воспроизведение стресса на протяжении 21 дня в группах, которым вводили экстракт *SB*, послужило снижению уровней глюкозы относительно агрессоров в 1,4 раза ($p < 0,05$) у особей, имеющих как доминантный тип поведения, так и субмиссивный. Подобное сопоставление с жертвами, которым вводили воду для инъекций, продемонстрировало более выраженное снижение в 1,8 раза ($p < 0,05$) у особей доминантов и подчиненных, получавших экстракт *SB*. Анализ данных позволил

зафиксировать, что особи-агрессоры, которые получали воду для инъекций, имели менее высокий уровень глюкозы, чем жертвы в 1,3 раза ($p < 0,05$).

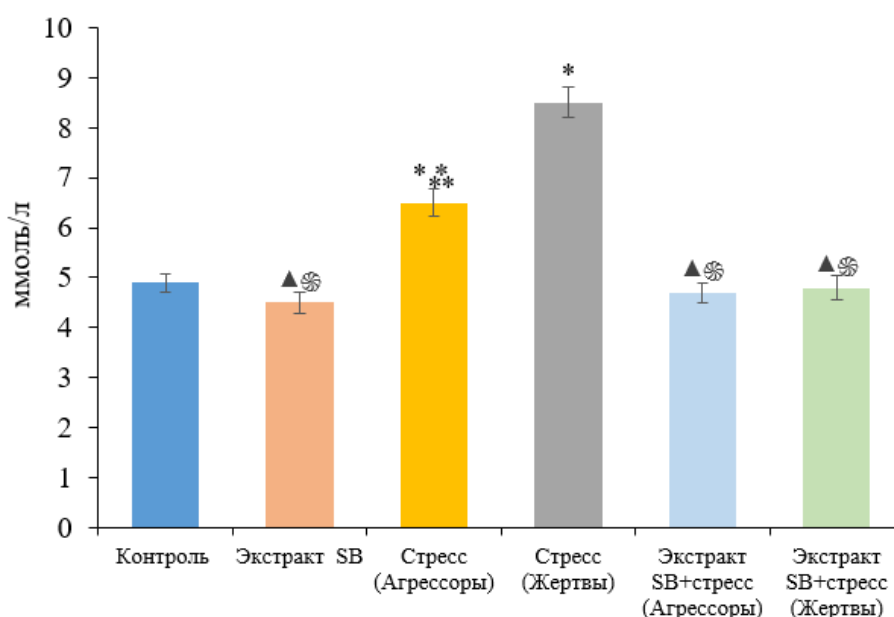


Рис. 2. Концентрация глюкозы при воздействии экстракта SB в условиях «социального» стресса

Примечание: * – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы первых суток. ▲ – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы агрессоров первых суток. ⊗ – статистически значимые различия ($p < 0,05$) относительно контрольной группы жертв первых суток. ** – различия статистически значимы ($p < 0,05$) между группой агрессоров жертв.

В результате проведенного эксперимента установили, что у животных, демонстрирующих как агрессивные, так и субмиссивные типы поведения, в процессе формирования депрессии было зафиксировано развитие ангедонии. Такого рода состояние проявлялось в снижении потребления сахарозного раствора, что, в свою очередь, свидетельствовало о развитии эмоциональной индифферентности. Кроме того, применение экстракта SB способствовало восстановлению данного параметра, что указывает на его потенциальную роль в коррекции депрессивных состояний. Установлено, что исходный (до экспериментальных воздействий) уровень глюкозы экспериментальных групп относительно контрольной группы не имел статистически значимых различий. Однако моделирование патологического состояния в виде «социального» стресса привело к достоверному повышению содержания глюкозы относительно контрольной группы у особей как доминантного, так и субмиссивного типов. Полученные данные указывали на значимое увеличение количества определяемого углевода группы контроля в условиях «социального» стресса у животных жертв относительно особей агрессоров. Зафиксировано, что применение экстракта SB привело к выравниванию уровня глюкозы при воспроизведении патологического состояния, вызванного межсамцовыми конфронтациями, относительно контрольной группы.

Заключение. Проведенное исследование продемонстрировало значительное влияние «социального» стресса на проявления депрессии и гедонического дефицита у животных при использовании теста на предпочтение сахарозного раствора как индикатора утраты интереса к вознаграждениям. Полученные результаты показали, что агрессоры и жертвы, испытывающие «социальный» стресс, значительно снижали

потребление сахарозы, что подтверждает теорию о том, что стресс негативно влияет на желание испытывать удовольствие. Введение экстракта *SB* способствовало увеличению потребления сахарозного раствора у обеих групп, что указывает на его потенциал как терапевтического средства для лечения депрессивных состояний. Динамика уровней глюкозы в плазме крови также подтверждает влияние экстракта *SB* на метаболические реакции в условиях стресса. Полученные данные подчеркивают необходимость дальнейших исследований, направленных на изучение химического состава экстракта *SB* и его механизмов действия, что может привести к разработке новых растительных препаратов и углублению понимания традиционных методов лечения. Таким образом, результаты этого эксперимента открывают новые перспективы как для научных исследований, так и для клинической практики в области психического здоровья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карауш, И. С. Ранние дезадаптивные схемы как модераторы стресса и формирующейся психической патологии / И. С. Карауш, И. Е. Куприянова // Сибирский психологический журнал. – 2022. – № 83. – С. 122-140. – DOI 10.17223/17267080/83/7.
2. Стресс как причина патологии / А. В. Вахнина, А. С. Зяблицева, А. Д. Попова [и др.] // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 5-2(80). – С. 36-45.
3. Состояние тревожности, как проявление эмоционального стресса у больных с патологией печени / А. В. Васильев, В. С. Васильев, М. И. Богущий [и др.] // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. – 2008. – № 1(21). – С. 49-52.
4. Звонарева, Е. Б. Роль эмоционального стресса, как этиологического фактора в развитии патологии / Е. Б. Звонарева, А. С. Малина, Д. А. Устинова // Заметки ученого. – 2022. – № 8. – С. 218-223.
5. Психосоматическая патология как результат психологического стресса и незавершенной психофизиологической адаптации / Е. С. Оленко, В. Ф. Киричук, С. В. Сачков [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 4. – С. 27.
6. Стресс и индивидуальное развитие / Ю. И. Александров, А. И. Булава, А. В. Бахчина [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2022. – Т. 72, № 4. – С. 437-456.
7. Pirozhkova, V. O. Social and emotional intelligence as resources for overcoming stress by subjects of team and individual activity presenter / V. O. Pirozhkova, G. B. Gorskaya // Current Issues of Sports Psychology and Pedagogy. – 2022. – Vol. 2, No. 1. – P. 36-39. – DOI 10.15826/spp.2022.1.18.
8. Валеева, А. С. Социальный стресс как фактор нарушения психического здоровья / А. С. Валеева, Н. Р. Мингазова, Г. Р. Давлетшина // Вестник Башкирского государственного медицинского университета. – 2024. – № S2. – С. 12-15.
9. Изменение уровня глюкозы в крови после умеренной стрессорной нагрузки как показатель стресс-реактивности при тревожно-депрессивных расстройствах: пилотное трансляционное исследование / С. В. Фрейман, М. В. Онуфриев, Т. А. Дружкова [и др.] // Нейрохимия. – 2015. – Т. 32, № 2. – С. 175.
10. Влияние глюкозы на свободнорадикальное окисление липопротеинов низкой плотности *in vitro* и *in vivo* / В. З. Ланкин, Г. Г. Коновалова, А. К. Тихазе, Л. В. Недосугова // Биомедицинская химия. – 2012. – Т. 58, № 3. – С. 339-352. – DOI 10.18097/pbmc20125803339.
11. Мурталиева, В. Х. "Социальный" стресс – релевантная модель тревожно-депрессивного состояния животных / В. Х. Мурталиева, А. Л. Ясенявская, М. А. Самотруева // Современные вопросы биомедицины. – 2022. – Т. 6, № 4(21). – DOI 10.51871/2588-0500_2022_06_04_11.
12. Смолева, Е. О. Социальный стресс и стратегии его преодоления: анализ концепций и моделей / Е. О. Смолева // Социальное пространство. – 2020. – Т. 6, № 3. – С. 3. – DOI 10.15838/sa.2020.3.25.3.
13. Уранова, В. В. Изучение стресс-протективного и анксиолитического действий экстракта *Scutellaria baicalensis* Georgi в условиях «социального» стресса / В. В. Уранова, Н. А. Ломтева, О. Н. Кулешова // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2023. – Т. 15, No 5. – С. 117-136. – DOI 10.12731/2658-6649-2023-15-5-929.
14. Оленников, Д. Н. Фенольные соединения шлемника байкальского (*Scutellaria Baicalensis* Georgi) / Д. Н. Оленников, Н. К. Чирикова, Л. М. Танхаева // Химия растительного сырья. – 2009. – № 4. – С. 89-98.
15. Влияние сухого экстракта из корней шлемника Байкальского (*Scutellaria baicalensis* Georgi) на развитие окислительного стресса, вызванного циклофосфаном / А. А. Потапова, Е. Г. Доркина, Е. О. Сергеева, Л. А. Саджая // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 667.

16. Государственная фармакопея XV издание. – 2023. – Режим доступа: <http://femb.ru/femb/pharmacopea.php>, свободный (дата обращения: 10.03.2023).
17. Стресспротекторная активность экстракта *Astragalus physodes* на модели «социального» стресса / В. Х. Мурталиева, А. А. Цибизова, М. У. Сергалиева, М. А. Самотруева // Научные результаты биомедицинских исследований. – 2023. – Т. 9, № 3. – С. 347-356. – DOI 10.18413/2658-6533-2023-9-3-0-5. – EDN PWLOJT.
18. Хроническое ультразвуковое воздействие вызывает ангедонию, снижение исследовательской активности и изменение уровня тревожности крыс / А. В. Горлова, Д. А. Павлов, Е. А. Зубков [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2019. – Т. 69, № 6. – С. 743-751. – DOI 10.1134/S0044467719060054.
19. Гусякова, О. А. Определение глюкозы в биологических жидкостях : Учебно-методическое пособие / О. А. Гусякова, И. Ф. Сидорова, О. А. Кизирова ; Под ред. Ф.Н. Гильмияровой. – Самара : Самарский государственный медицинский университет, 2007. – 30 с.

Поступила в редакцию 14.03.2025 г.

STUDY OF THE EFFECT OF *SCUTELLARIA BAICALENSIS* EXTRACT ON THE LEVEL OF SUCROSE CONSUMPTION UNDER CONDITIONS OF “SOCIAL” STRESS

V. V. Uranova, N. A. Lomteva

The results of the study are devoted to the influence of "social" stress and *Scutellaria baicalensis* (SB) extract on the level of sucrose consumption in experimental animals. The significant influence of "social" stress on the development of depressive states in animals was established, which was manifested in a decrease in their preference for a sucrose solution, indicating a loss of interest in rewards. Both aggressors and victims experiencing "social" stress showed a reduced need for pleasure. The introduction of SB extract increased sucrose consumption, suggesting its therapeutic effectiveness for the correction of anxiety and depressive states. The dynamics of glucose levels in blood plasma also confirms the effect of SB extract on metabolic reactions under stress. This study emphasizes the need for further analysis of SB extract and its capabilities, which may lead to new phytotherapeutic methods in the field of mental health.

Keywords: "social" stress, *Scutellaria baicalensis*, sucrose, anhedonia, glucose.

Уранова Валерия Валерьевна

ассистент кафедры фундаментальной химии,
ФГБОУ «Астраханский государственный
медицинский университет», г. Астрахань, РФ.
E-mail: fibi_cool@list.ru
ORCID: 0000-0003-2114-1286
AuthorID: 934288

Uranova Valeria Valerievna

assistant of the Department of Fundamental Chemistry,
Astrakhan State Medical University, Astrakhan, RF

Ломтева Наталья Аркадьевна

Доктор биологических наук, доцент;
профессор, заведующий кафедрой
фундаментальной биологии
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
университет им. В. Н. Татищева», г. Астрахань, РФ.
E-mail: molecula01@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-8336-7726
AuthorID: 370121

Lomteva Natalia Arkadyevna

Doctor of Biological Sciences,
Associate Professor;
Professor, Head of the Department of
Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev,
Astrakhan, RF

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ НЕРЕСТА У АВСТРАЛИЙСКОГО
КРАСНОКЛЕШНЕВОГО РАКА *CHERAX QUADRICARINATUS* (Von Martens, 1868)
В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2025. Э. Э. Чолутаева, Д. С. Саркисян, Д. Ю. Ковальчук, В. Н. Шевченко,
А. В. Ольшевская

В последние годы растёт интерес к разведению австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868) как одного из перспективных объектов для пресноводной астацикультуры. Этот вид ценится за высокие темпы роста, адаптивность к различным условиям и высокую рыночную привлекательность. В данной работе рассматривается опыт организации нереста *C. quadricarinatus* в искусственной среде. При температуре выше рекомендуемой (29–30 °C) средняя продолжительность эмбриогенеза составила 31 сутки, что оказалось на 9 суток меньше, чем при рекомендуемой температуре (27–28 °C). От 6 самок в общей сложности было получено 1 129 экз. суточной молоди, выживаемость которой за 14 суток наблюдений составила 61,89 %. Средняя плодовитость 1 самки составила 188,17 экз., варьируя от 126 до 238 экз. молоди.

Ключевые слова: аквакультура; австралийский красноклешневый рак; *Cherax quadricarinatus*; искусственное выращивание; нерест.

Введение. Пресноводные ракообразные представляют собой ценный источник легкоусвояемого животного белка, востребованного на мировом рынке. В условиях роста численности населения и усиливающегося дефицита традиционных ресурсов животного происхождения, аквакультура раков (астацикультура) приобретает всё большую значимость как направление устойчивого развития продовольственной отрасли. В условиях ограниченной продуктивности традиционных аборигенных видов речных раков всё более актуальным становится использование альтернативных объектов аквакультуры. Одним из эффективных решений повышения продуктивности отрасли в России может стать внедрение быстрорастущих тропических видов. Наибольший интерес представляет австралийский красноклешневый рак *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868), отличающийся высокой скоростью роста, способностью к быстрой адаптации к искусственным условиям и значительным потенциалом для промышленного разведения в различных климатических регионах [1].

C. quadricarinatus представляет собой интересный объект для фундаментальных и прикладных исследований в области биологии развития и аквакультуры. Его относительно быстрый рост, доступность для содержания в лабораторных условиях и генетическая пластичность делают его удобной моделью для изучения различных аспектов онтогенеза, включая влияние факторов среды на морфогенез, физиологию и поведение. Выбор *C. quadricarinatus* в качестве объекта исследования обусловлен также недостаточностью сведений о механизмах, регулирующих его репродуктивный цикл и ранние стадии развития.

Жизненный цикл *C. quadricarinatus* характеризуется прямым развитием с отсутствием личиночных стадий. Молодые особи, покидающие материнский организм, являются миниатюрными копиями взрослых раков. Половой зрелости раки достигают в возрасте 5–7 месяцев при оптимальных условиях содержания. В течение жизненного цикла раки проходят регулярные линьки, особенно интенсивные на ранних стадиях онтогенеза. Данный вид демонстрирует выраженный половой диморфизм, который

проявляется, прежде всего, в морфометрических различиях и окраске клешней. У половозрелых самцов наблюдается увеличение массы и окрашивание клешней в ярко-красный оттенок. Самки, напротив, обладают менее массивными клешнями и не имеют яркой окраски. У самок хорошо развиты брюшные плеоподы, на которых вынашиваются оплодотворённые яйца в период нереста. Размножение *C. quadricarinatus* осуществляется в основном в тёплый сезон, однако в условиях контролируемой температуры (25–29 °C) половое поведение и нерест может наблюдаться от 3 до 5 раз в год [2]. Половой цикл включает стадии спаривания, формирования кладки, эмбрионального развития, вылупления личинок и их последующий метаморфоз. После спаривания самка откладывает от 300 до 1500 яиц (в зависимости от размера), которые прикрепляются к плеоподам и развиваются в течение 28–42 суток, в зависимости от температуры воды [2, 3].

Целью настоящего исследования является изучение особенностей размножения *C. quadricarinatus* в искусственных условиях.

Материалы и методы. Преднерестовое содержание маточного поголовья. Исследования проводились на базе научно-исследовательской лаборатории «Центр агробиотехнологии» и лаборатории индустриальной аквакультуры Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

В работе использовались клинически здоровые половозрелые особи австралийского красноклешневого рака *C. quadricarinatus* в количестве 39 экз., среди которых 25 экз. были идентифицированы как самцы (рис. 1), и 14 экз. – самки (рис. 2). Особи были распределены между двумя бассейнами в установке замкнутого водоснабжения (УЗВ): в бассейне №1 содержалось 20 экз., среди которых самок – 6 экз., самцов – 14 экз., в бассейне №2 находилось 19 экз., среди которых самок – 8 экз., самцов – 11 экз. Продолжительность периода преднерестового содержания в среднем составляла 14 суток.

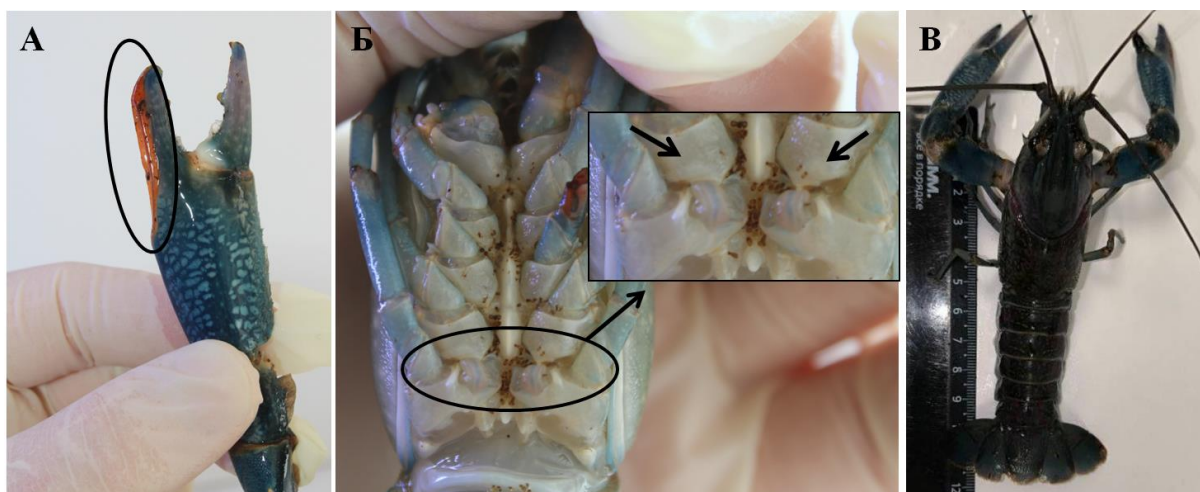


Рис. 1. Внешний вид и половые признаки самца *C. quadricarinatus*: А – клешненоносная нога с характерным красным пятном на проподусе; Б – гонопоры в основании пятых переоподов; В – общий вид

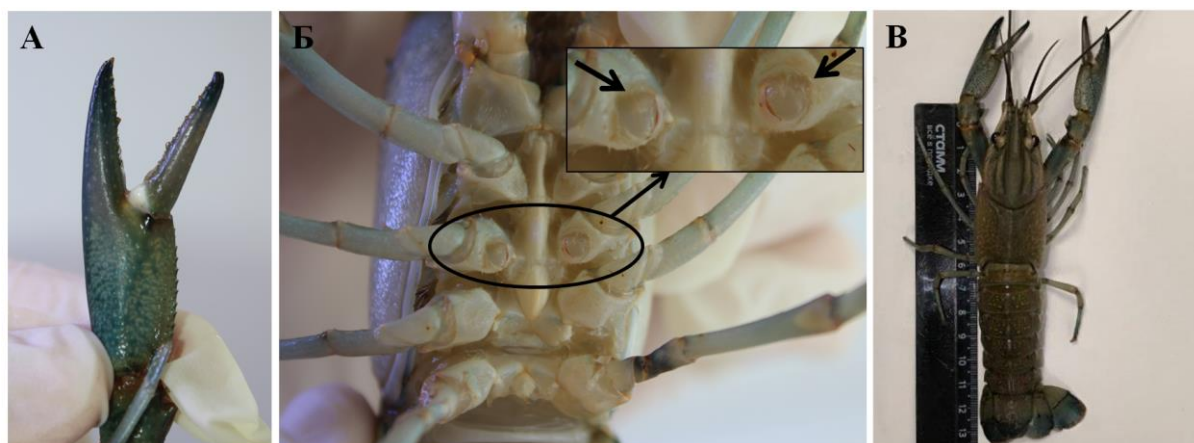


Рис. 2. Внешний вид и половые признаки самки *C. quadricarinatus*: А – клешеносная нога; Б – гонопоры в основании третьих переоподов; В – общий вид

В настоящем исследовании для содержания австралийского красноклешневого рака *C. quadricarinatus* использовался стабильный режим фотопериода, соответствующий естественному суточному циклу, и составлявший 12 часов светлого времени и 12 часов темного (режим 12L:12D).

Для обеспечения полноценной подготовки особей к последующим этапам воспроизводства был реализован режим сбалансированного кормления, направленный на насыщение организма необходимыми микро- и макроэлементами, а также витаминами, способствующими накоплению энергетических и пластических резервов. В качестве кормового рациона применялась замороженная овощная смесь, включающая соцветия цветной капусты, измельчённые плоды моркови, кабачка, стручковой фасоли и зелёного горошка, подаваемая в утренние часы (в интервале 8:30–9:00). В вечернее время (в интервале 17:00–17:30) особи получали замороженные личинки хирономид Chironomidae Newman, 1834, являющиеся высокобелковым компонентом рациона. Суточная доза кормления составляла 6,0 % от совокупной живой массы ракообразных, при этом долевое распределение рациона было эквивалентным: 50 % составляли личинки хирономид, 50 % – растительные компоненты овощного происхождения.

Контрольные измерения (бонитировка) проводились каждые 7 суток эксперимента. В ходе бонитировки оценивали индивидуальную массу каждой особи (m, г) с использованием лабораторных весов II класса точности BEL LG- 2202i с дискретностью 0,01 г (ChangZhou XingYun Electronic Equipment Co., Китай), а также проводили измерения общей длины тела (L, мм) при помощи штангенциркуля.

Температура воды поддерживалась на оптимальном уровне 25–30 °С согласно рекомендациям [4]. С этой целью в период преднерестового выдерживания использовались нагреватели Prottemp S 50 Вт (JBL, Германия).

Экспериментальные особи содержались в бассейнах системы УЗВ, выполненных из полимерного материала (полипропилен), габаритные размеры которых составляли 100×100 см с уровнем водного столба 30 см. Каждая установка была оснащена автономным модулем водоподготовки, включающим элементы механической и биологической фильтрации, обеспечивающие циркуляцию и поддержание стабильных параметров качества воды в условиях замкнутого водоснабжения.

Для поддержания гидрохимического баланса осуществлялась еженедельная частичная подмена воды в объеме 30 % от общего объема циркулирующей среды с

использованием предварительно отстоянной свежей воды. Внутри каждого бассейна были размещены искусственные укрытия по 15 ед. на резервуар для снижения внутривидовой агрессии и риска каннибализма среди особей.

Содержание самок в период эмбриогенеза. Для снижения каннибализма и состояния стресса самки содержались в индивидуальных емкостях (рис. 3). В качестве индивидуальных емкостей использовались аквариумы объемом 8 л.

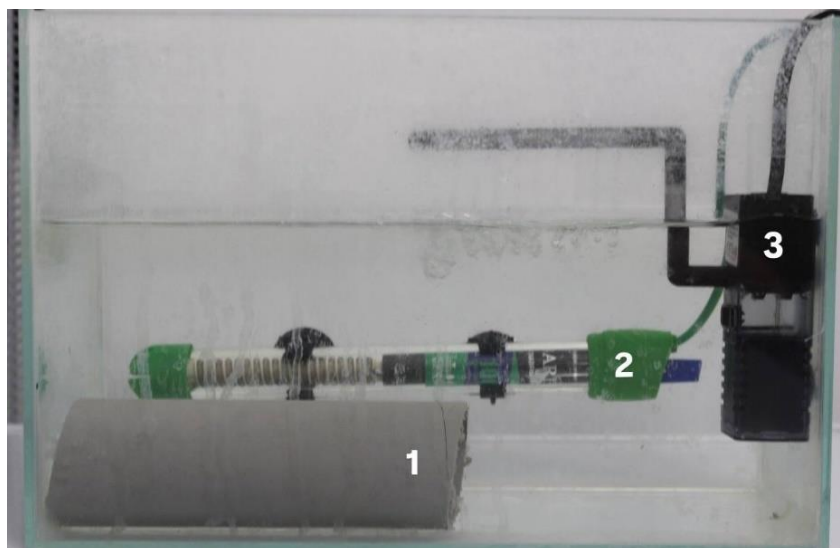


Рис. 3. Внешний вид индивидуальных емкостей для содержания самок *C. quadricarinatus* в период эмбриогенеза: 1 – укрытие из поливинилхлорида; 2 – нагреватель с терморегулятором; 3 – внутренний губчатый фильтр с аэрацией.

Выбор такого объема обусловлен обеспечением достаточного пространства для одной самки с икрой и удобством наблюдения. В аквариумах поддерживалась стабильная температура воды при помощи нагревателей с терморегулятором Barbus Heater 001-007 мощностью 25 Вт со стеклянной кварцевой колбой (Barbus, Китай).

С целью изучения влияния температурного режима на продолжительность эмбрионального развития у *C. quadricarinatus*, половозрелые оплодотворённые самки были помещены в индивидуальные аквариумы с идентичными условиями по объёму воды, уровню аэрации и фотопериоду, за исключением температурного параметра [5]. В условиях эксперимента двое самок в период эмбриогенеза содержались при температуре выше оптимальной (29–30 °С), остальные особи содержались при оптимальной температуре (27–28 °С) [4].

Для обеспечения биологической фильтрации в каждом аквариуме использовался внутренний губчатый фильтр с аэрацией Barbus Filter 045 с мощностью 3 Вт и производительность 200 л/ч (Barbus, Китай). Замена фильтрующего материала производилась еженедельно.

Вода в аквариумах менялась на 30 % еженедельно, используя отстоянную водопроводную воду с параметрами: pH – 7,0 ед.; GH (общая жёсткость воды) – 28 ед.; KH (карбонатная жёсткость воды) – 8 ед.

В качестве корма для самок в период эмбриогенеза использовались замороженные личинки хирономид Chironomidae. Кормление проводилось в вечернее время ежедневно небольшими порциями. Количество корма подбиралось индивидуально, с учетом состояния самки и количества потребляемой пищи. Остатки корма удалялись из аквариума ежедневно для предотвращения загрязнения воды.

В каждом аквариуме в качестве укрытий использовали трубы из поливинилхлорида с диаметром 6 см и длиной каждого укрытия 15 см.

Оценка качества параметров окружающей среды. В процессе проведения исследования осуществлялся ежедневный мониторинг ключевых гидрохимических параметров среды, включая температурный режим и уровень растворённого кислорода в воде. Для измерений применялся портативный анализатор кислорода и температуры «Анион-7040» (НПП «Инфраспек-Аналит», Россия).

Измерение гидрохимических параметров проводилось с использованием стандартных наборов тестов для воды «НИЛПА PRO 10 в 1». Наблюдения осуществлялись за следующими параметрами: водородный показатель (pH), карбонатная жёсткость воды (KH), жёсткость воды (GH), нитриты (NO_2), нитраты (NO_3), аммиак/аммоний (NH_3/NH_4), фосфаты (PO_4), медь (Cu), железо (Fe). Использование тестов осуществлялось согласно прилагаемой инструкции.

Измерение основных гидрохимических параметров (pH, общая жесткость, щелочность) проводилось еженедельно. Контроль за уровнем токсичных соединений азота (нитритов, нитратов и аммиака) проводился чаще – дважды в неделю. В случае изменения качества воды, визуального ухудшения состояния раков или при подозрении на отклонение от нормы, проводились внеплановые измерения.

Содержание молоди. Содержание молоди осуществлялось в стеклянных аквариумах объемом 8–10 литров. Использование аквариумов позволяло осуществлять визуальный контроль за состоянием молоди, качеством воды и эффективностью кормления. Плотность посадки молоди в аквариумах поддерживалась на уровне ≈ 397 экз./м².

Для поддержания оптимальной температуры воды в аквариумах с молодью (в диапазоне 26–29 °C) [4], использовались погружные автоматические нагреватели с терморегулятором. Температура воды регулярно контролировалась с помощью цифровых термометров.

Для обеспечения высокого качества воды и удаления продуктов жизнедеятельности молоди в каждом аквариуме устанавливались внутренние фильтры. Использовались фильтры комбинированного типа, осуществляющие как механическую (удаление взвешенных частиц), так и биологическую (преобразование токсичных азотистых соединений) очистку воды. Биологическая фильтрация обеспечивалась за счет пористых наполнителей, заселенных нитрифицирующими бактериями. Регулярно проводилась промывка механической части фильтра и контроль состояния биологической части.

Молодь австралийского красноклешневого рака подвержена каннибализму, особенно в период линьки. Для снижения агрессии и создания безопасной среды для молоди в аквариумы помещались укрытия: пластиковые трубки, нарезанные на отрезки различной длины и диаметра; мелкая сетка или волокнистые губки; искусственные водные растения.

Кормление молоди осуществлялось согласно рекомендациям Борисова Р.Р. [6] замороженными личинками хирономид Chironomidae, а также комбикормами с высоким содержанием белка Tetra Crusta Granules (Tetra, Германия). Аналитические показатели используемых кормов (в соответствии с информацией производителя): сырой белок 49 %, сырой жир 9 %, сырая клетчатка 2 %, содержание влаги 8 %, кальций 1,3 %, фосфор 1,1 %.

Кормление молоди осуществлялось 3–4 раза в сутки небольшими порциями с целью обеспечения постоянного доступа к корму и предотвращения избыточного внесения, способного негативно повлиять на гидрохимические параметры среды. Подача

корма осуществлялась групповым методом. Объём кормовых дач корректировался на основе визуальной оценки поедаемости и остаточного количества корма.

Результаты. Преднерестовое содержание производителей / маточного поголовья. В период преднерестового выдерживания средняя масса самок составляла $52,5 \pm 0,03$ (42–69) г, средняя масса самцов – $53,6 \pm 0,03$ (39–67) г. Коэффициент упитанности по Фультону [7] у самок составлял $2,66 \pm 0,01$ (2,32–3,09) ед., у самцов – $2,6 \pm 0,01$ (2,29–2,92).

В период преднерестового содержания гидрохимический режим соответствовал норме. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения параметров воды за преднерестовый период

Срок выдерживания / оптимум	pH	КН	GH	NO ₂ (мг/л)	NO ₃ (мг/л)	NH ₃ /NH ₄ (мг/л)	PO ₄ (мг/л)	Cu (мг/л)	Fe (мг/л)
	6,8–7,2	5–15	5–20	0–0,2	≤20	0–0,05	0,26–0,6	0	<0,1
7 сутки	7,0	9	18	0,1	20	0	0,5	0	0
14 сутки	7,1	11	17	0,1	10	0	0,5	0	0

Поддержание оптимальных параметров позволяет минимизировать стрессовые факторы, способствует активации репродуктивных процессов и повышает общую выживаемость и жизнеспособность потомства. Особое значение имеет исключение присутствия аммиака и ионов меди, обладающих высокой токсичностью для ракообразных даже в низких концентрациях. В нашем эксперименте удалось создать оптимальные гидрохимические условия, которые соответствовали всем технологическим нормам [8, 9].

Содержание самок. В рамках экспериментальных исследований по изучению эмбрионального развития *C. quadricarinatus* было отсажено 8 половозрелых самок с визуально определяемыми признаками кладки яиц. Отсадка проводилась по мере обнаружения сформированной кладки (рис. 4), что свидетельствовало о наступлении периода эмбриогенеза.

Из 8 отсаженных самок успешно завершили эмбриогенез и дали жизнеспособное потомство 6 особей, что составило 81,8 % от общего количества. Две самки погибли на раннем этапе инкубационного периода в результате неисправности оборудования. Погибшие особи были исключены из дальнейшего анализа. У остальных самок отмечено стабильное течение эмбриогенеза без признаков патологий.

В результате проведённых измерений морфометрических характеристик ооцитов австралийского красноклещевого рака было установлено, что средний диаметр ооцита составил $1,45 \pm 0,14$ (1,32–1,70) мм, средняя масса составила $0,0036 \pm 0,002$ (0,00181–0,00381) г.

Ооциты визуально имели овальную или округлую форму (рис. 5), с характерной для вида желтовато-оранжевой окраской [10]. Гомогенность размеров указывает на синхронность их развития, что свидетельствует о физиологической готовности самки к нересту.

В процессе наблюдений было зафиксировано стрессовое поведение, вызванное агрессией со стороны другой самки во временной емкости при передержке особей во время технического обслуживания нерестовых емкостей. В результате этого зарегистрирован самопроизвольный сброс ооцитов в количестве 183 шт., что, вероятно, является защитной физиологической реакцией у ракообразных.

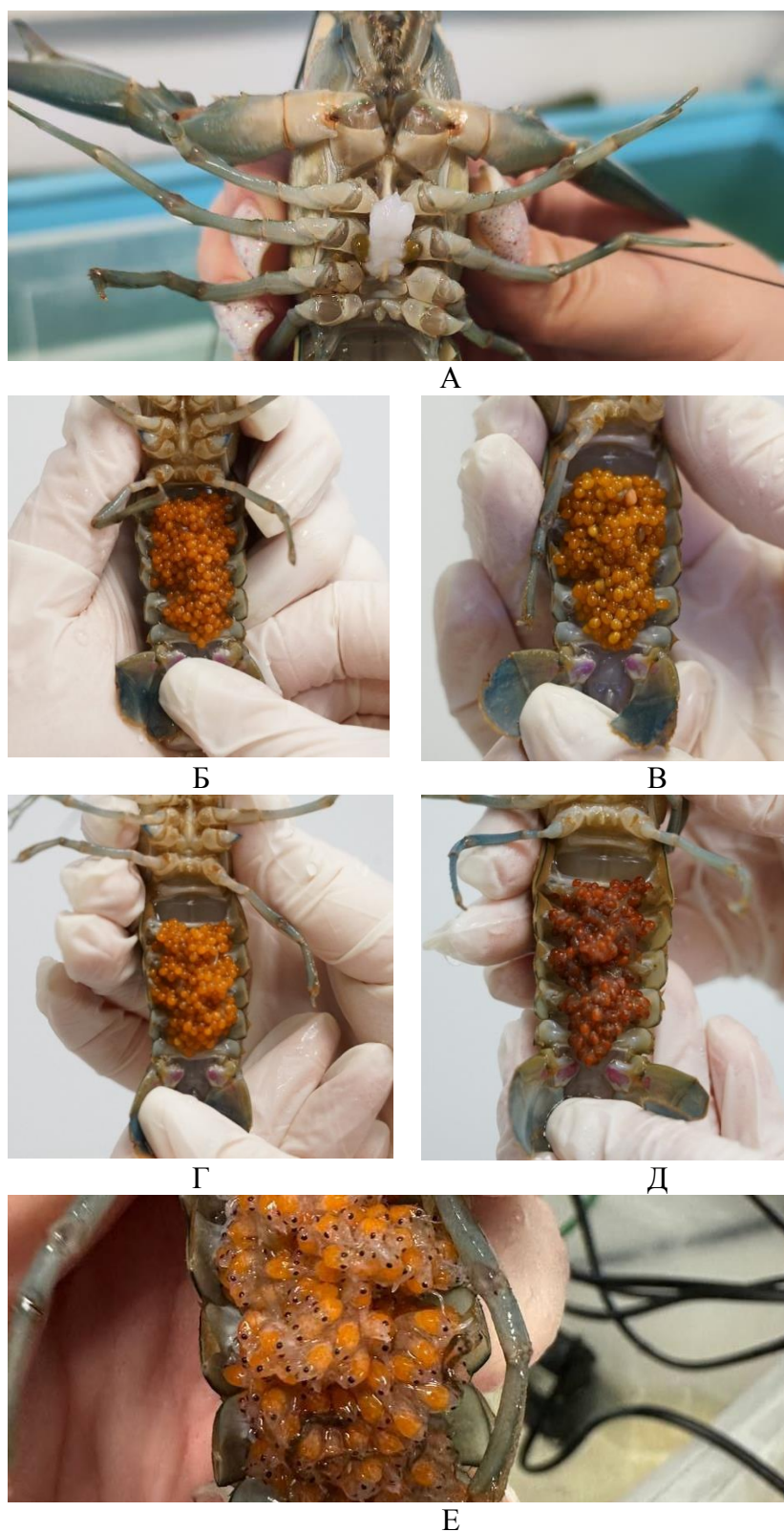
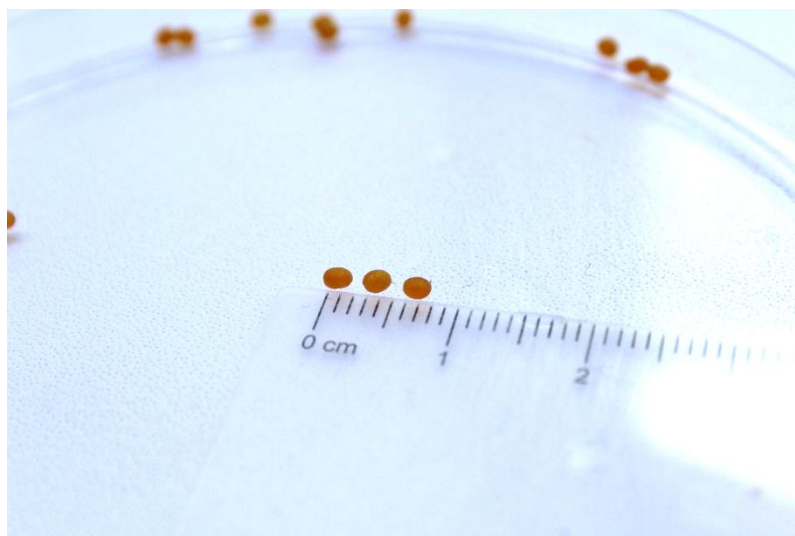


Рис. 4. Ход эмбриогенеза у самки *C. quadricarinatus* при температуре 29 °C: А – оплодотворенная самка со сперматофорами; Б – 3 сут. после нереста; В – 6 сут. после нереста; Г – 9 сут. после нереста; Д – 16 сут. после нереста, молодь 1 стадии; Е – 26 сут. после нереста, молодь 2 стадии

Рис. 5. Внешний вид ооцитов у *C. quadricarinatus*

Эмбриональное развитие протекало при различных температурных режимах с целью оценки их влияния на продолжительность эмбриогенеза. При температуре выше рекомендуемой (29–30 °С) средняя продолжительность эмбриогенеза составила 31 сутки, что оказалось на 9 суток меньше, чем при рекомендуемой температуре (27–28 °С, 40 суток в среднем). Полученные результаты соответствуют литературным сведениям [11]. Таким образом, незначительное повышение температуры воды позволило сократить период эмбриогенеза на 22,5 %, что в условиях производственного цикла может значительно сократить финансовые расходы на индивидуальное содержание самок и повысить рентабельность производства.

Молодь. От 6 самок в общей сложности было получено 1 129 экз. суточной молоди. Средняя плодовитость 1 самки составила 188,17 экз., варьируя от 126 до 238 экз. молоди. Общая выживаемость молоди представлена на рис. 6.

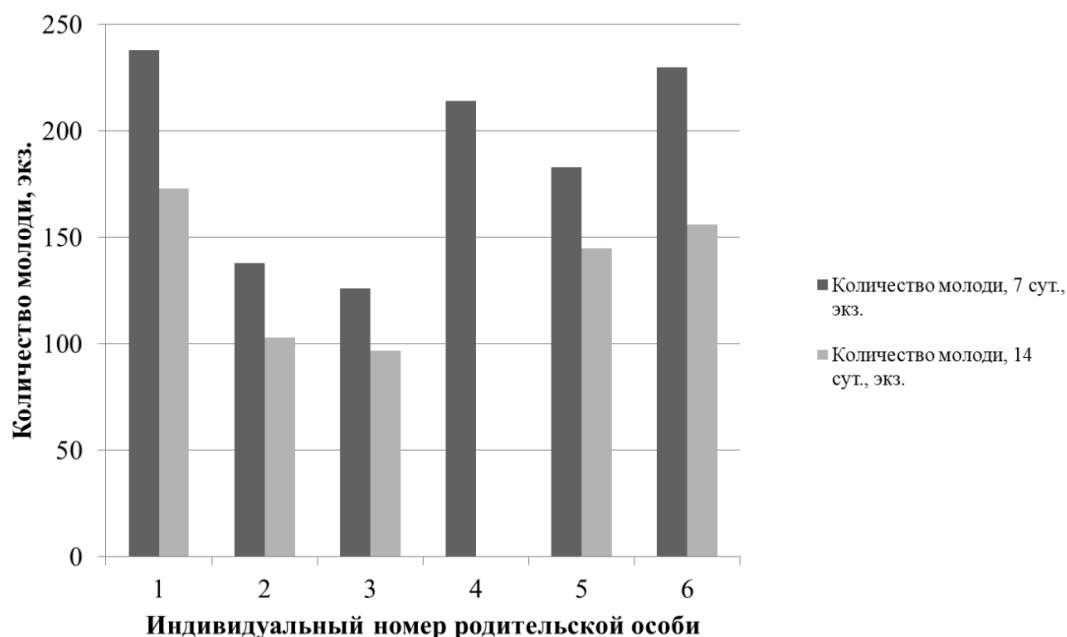


Рис. 6. Динамика изменения количественных показателей молоди за 14 суток наблюдений

Выживаемость молоди за 14 суток наблюдений составила в среднем 61,89 %. В одной из опытных групп молоди, полученной от самки №4, зарегистрирована 100 % гибель на 11 сутки наблюдений. Гибель молоди была обусловлена техническим фактором, а именно выходом из строя нагревательного элемента в постнерестовой емкости, в результате чего температура воды поднялась до 61,3 °С, что на 118 % выше температурного оптимума. Без учета этой экспериментальной группы средняя выживаемость молоди за 14 суток наблюдений составила 74,27 %.

Длина особей на 7 сутки составляла 1,0–1,1 см, на 14 сутки – 1,3–1,4 см (рис. 7).

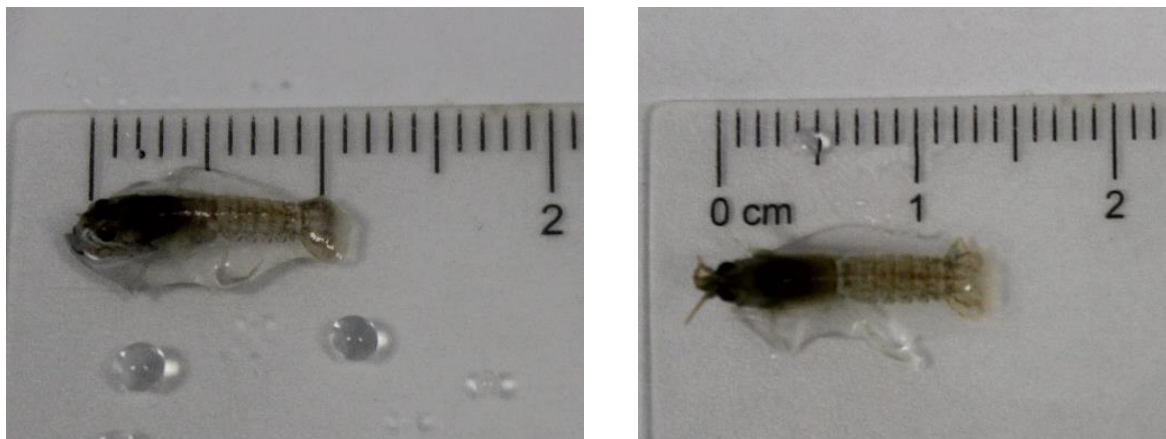


Рис. 7. Внешний вид молоди *C. quadricarinatus*

Заключение. Проведённые исследования подтвердили возможность успешного проведения нереста австралийского красноклешневого рака *C. quadricarinatus* в контролируемых условиях. От 6 самок в лабораторных условиях в общей сложности было получено 1 129 экз. суточной молоди. Средняя плодовитость 1 самки составила 188,17 экз., варьируя от 126 до 238 экз. молоди. Выживаемость молоди за 14 суток наблюдений составила 61,89 %. В условиях повышенной температуры окружающей среды на 1–2 °С наблюдалось уменьшение периода эмбрионального развития до 31 суток. В оптимальных температурных условиях продолжительность эмбрионального развития составила 40 суток. В связи с тем, что эксперимент проведен на ограниченной выборке особей, требуется дальнейшее масштабирование экспериментов в производственных условиях. Сокращение периода эмбриогенеза может способствовать оптимизации производственных расходов в период нереста.

Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Р. Р., Жигин А.В., Ковачева Н.П., Кряхова Н.В., Никонова И.Н. Биологические аспекты культивирования австралийского красноклешневого рака *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) в России // Рыбное хозяйство. – 2025. – № 3. – DOI: 10.36038/0131-6184-2024-3-80-92.
2. Jones C. M. Production of juvenile redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens) (Decapoda, Parastacidae) II. Juvenile nutrition and habitat // Aquaculture. – 1995. – Vol. 138. – No. 1-4. – P. 239-245. DOI: 10.1016/0044-8486(95)00069-0.
3. Masser, M.P., Rouse D.B. Australian red claw crayfish // Southern Regional Aquaculture Center. – 1997. – Vol. 244. – P. 1-8
4. Xiaoxuan C., Zhixin W., Licai H. Effects of water temperature on ingestion and growth of *Cherax quadricarinatus* // Journal Huazhong (Central China) Agricultural University. – 1995. – Vol. 14. – No. 5. – P. 477-480.

5. Нгуен Т. Т. Влияние инверсии пола на рост, развитие и формирование гонад некоторых десятиногих раков (на примере *Macrobrachium rosenbergii* и *Cherax quadricarinatus*): дис. – Астрахан. гос. техн. ун-т, 2014. – 139 с.
6. Борисов Р.Р., Ковачева Н.П., Жигин А.В., Никонова И.Н., Кряхова Н.В. Аквакультура австралийского красноклещевого рака *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868). – М.: ВНИРО, 2024. – 200 с.
7. Рудой Д.В., Ольшевская А. В., Шевченко В. Н., Головкин Л. С., Оганисян М. М. Темпы роста самок австралийского красноклещевого рака *Cherax quadricarinatus* Von Martens, 1868 в УЗВ в период адаптации к индустриальным условиям // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 2. – С. 69-77. – DOI: 10.5281/zenodo.15088819.
8. Брайнбалле Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения // Введение в новые экологические и высокопродуктивные замкнутые рыбоводные системы. – Копенгаген: ЕВРОФИШ, 2010. – 70 с.
9. Жигин А.В. Замкнутые системы в аквакультуре: моногр. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. – 2011. – 664 с.
10. Sagi A., Ra'anan Z., Cohen D., Wax Y. Gonad maturation, morphological and physiological changes during the first reproductive cycle of the crayfish *Cherax quadricarinatus* female // Invertebrate Reproduction & Development. – 1996. – Vol. 29. – No. 3. – P. 235-242.
11. Haubrock P. J., Oficialdegui F.J., Zeng Y., Patoka J., Yeo D.C.J., Kouba A. The redclaw crayfish: A prominent aquaculture species with invasive potential in tropical and subtropical biodiversity hotspots // Reviews in Aquaculture. – 2021. – Vol. 13. – No. 3. – P. 1488-1530. <https://doi.org/10.1111/raq.12531>

Поступила в редакцию 20.05.2025 г.

EXPERIENCE IN INDUCING SPAWNING OF THE AUSTRALIAN RED CLAW CRAYFISH *CHERAX QUADRICARINATUS* (von MARTENS, 1868) UNDER CONTROLLED CONDITIONS

E. E. Cholutaeva, D. S. Sarkisyan, D. Yu. Kovalchuk, V. N. Shevchenko, A. V. Olshevskaya

In recent years, interest in breeding the Australian red claw crayfish *Cherax quadricarinatus* (von Martens, 1868) has increased due to its potential as a promising species for freshwater astaciculture. This species is valued for its rapid growth rate, adaptability to diverse conditions, and high market appeal. This study presents the results of induced spawning of *C. quadricarinatus* in an artificial environment. At temperatures exceeding recommended values (29–30 °C), the average duration of embryogenesis was 31 days, which was 9 days shorter than at the recommended temperature range (27–28 °C). A total of 1,129 day-old juveniles were obtained from 6 females, with a 14-day survival rate of 61.89 %. The mean fecundity per female was 188.17 juveniles, ranging from 126 to 238 juveniles per individual.

Keywords: aquaculture; Australian red claw crayfish; *Cherax quadricarinatus*; artificial rearing; spawning.

Чолутаева Энкрина 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

Саркисян Диана Славиковна

студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический
университет, г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: dengorden00@mail.ru
Author ID: 1180124
SPIN-код: 8500-8112

Srkisyan Diana Slavikovna

Student, Faculty of Agribusiness, Don State Technical
University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: dengorden00@mail.ru
Author ID: 1180124
SPIN-code: 8500-8112

Ковальчук Даниил Юрьевич

Студент, факультет «Агропромышленный»,
Донской государственный технический
университет, г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: cool.d4niil@yandex.ru
AuthorID: 1180923
ORCID: 0009-0008-8670-9307

Kovalchuk Daniil Yurievich

Student, Faculty of Agribusiness, Don State Technical
University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
E-mail: cool.d4niil@yandex.ru
AuthorID: 1180923
ORCID: 0009-0008-8670-9307

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

Ольшевская Анастасия Владимировна

кандидат технических наук,
заместитель руководителя Центра развития
территориального кластера «Долина Дона»,
Донской государственный технический
университет, г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: olshevskaya.av@gs.donstu.ru
ORCID: 0000-0001-8318-3938
AuthorID: 784811
SPIN-код: 8026-6860

Olshevskaya Anastasiya Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the
Territorial Cluster Development Center “Dolina
Dona”, Don State Technical University, Rostov-on-
Don, Russian Federation.
E-mail: olshevskaya.av@gs.donstu.ru
ORCID: 0000-0001-8318-3938
AuthorID: 784811
SPIN-code: 8026-6860

INTERRELATION OF BIOCHEMICAL STRESS MARKERS AND PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF AUTONOMIC REGULATION

© 2025. K. Todoroski

This article explores the interrelationships between biochemical markers of stress (cortisol, indicators of oxidative status) and physiological parameters of autonomic regulation (heart rate variability, brain activity, peripheral blood flow). Contemporary methods for assessing these parameters are analyzed within the framework of the “brain–heart axis” concept. Based on recent scientific literature, the article presents mechanisms of interaction among various regulatory systems of the body under stress and discusses their clinical significance. The review is grounded in a systematic analysis of current research findings.

Key words: stress; cortisol; heart rate variability; brain activity; peripheral blood flow; oxidative stress; autonomic nervous system; biomarkers; neurovisceral integration; physiology.

Introduction. Stress is an integral part of modern life and represents a complex psychophysiological response of the organism to various stressors. Over recent decades, scientific interest in the biological mechanisms of stress and its impact on human health has significantly increased. This is driven by growing recognition that chronic stress is a major risk factor for the development of numerous disorders, including cardiovascular, metabolic, neurodegenerative, and psychiatric diseases. For an objective assessment of the body's stress response, reliable biomarkers are required that can reflect various aspects of the physiological reaction to stress.

Among biochemical stress markers, particular attention is paid to cortisol and indicators of oxidative status. Cortisol, the primary glucocorticoid hormone secreted by the adrenal cortex, plays a central role in the body's stress response and is a classical biomarker of hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis activation. Oxidative status, reflecting the balance between the formation of reactive oxygen species (ROS) and the body's antioxidant defense mechanisms, also undergoes significant changes under stress and may serve as an indicator of stress-induced metabolic disturbances.

Physiological parameters such as heart rate variability (HRV), brain activity, and peripheral blood flow represent another group of stress-sensitive indicators. HRV is a marker of autonomic nervous system activity, reflecting the balance between sympathetic and parasympathetic influences on the heart. Brain activity, assessed using electroencephalography (EEG), functional magnetic resonance imaging (fMRI), and other methods, provides insight into the neuronal mechanisms of the stress response. Peripheral blood flow, in turn, serves as an indicator of vasomotor function and endothelial health, both of which are affected by stress.

Despite considerable progress in the study of individual stress biomarkers, a comprehensive understanding of the interactions between biochemical and physiological parameters remains limited. An integrative approach to stress assessment offers a more complete picture of stress mechanisms and their health consequences. Studying correlations between various stress biomarkers can reveal shared pathophysiological pathways and support the development of more effective strategies for the diagnosis, prevention, and treatment of stress-related conditions.

The aim of this review is to analyze current scientific evidence on the interrelation between biochemical stress markers (cortisol, oxidative status) and physiological parameters

(HRV, brain activity, peripheral blood flow). The review addresses the physiological foundations of these interactions, methods of their assessment, clinical relevance, and future research perspectives. Particular attention is given to the concept of the “brain–heart axis” and integrative models of systemic responses to stress.

Biochemical Markers of Stress

Cortisol is the principal glucocorticoid hormone secreted by the adrenal cortex in response to stress. It plays a central role in the regulation of metabolic, immune, and neuroendocrine functions. Cortisol secretion is governed by the hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis, a complex system of feedforward and feedback interactions involving the hypothalamus, pituitary gland, and adrenal cortex. When a stressor is encountered, the hypothalamus releases corticotropin-releasing hormone (CRH), which stimulates the anterior pituitary to secrete adrenocorticotrophic hormone (ACTH). ACTH, in turn, promotes the synthesis and release of cortisol from the adrenal cortex [1].

Cortisol secretion follows a distinct circadian rhythm, peaking in the early morning (30–45 minutes after awakening) and gradually declining throughout the day, reaching its lowest levels in the evening and at night. This phenomenon, known as the cortisol awakening response (CAR), is a key indicator of HPA axis function and can be disrupted in various pathological conditions, including chronic stress, depression, and post-traumatic stress disorder [2].

Cortisol levels can be assessed in a variety of biological matrices, including blood (serum or plasma), saliva, urine, and, more recently, hair. Each method has specific advantages and limitations. Blood cortisol measurement reflects total hormone levels (both bound and free fractions) and is considered the clinical “gold standard”. However, it is invasive, and the blood draw itself may elicit a stress response, potentially distorting results. Salivary cortisol assessment is non-invasive and reflects free (biologically active) cortisol levels. This method is widely used in stress research, especially for evaluating CAR and circadian rhythms of cortisol secretion [3].

Urinary cortisol, typically measured in 24-hour collections, provides an integrated index of hormone secretion but does not capture circadian dynamics. Hair cortisol analysis is a relatively novel technique that reflects cumulative cortisol exposure over extended periods (weeks or months) and may be particularly informative in studies of chronic stress [1].

The acute stress response is characterized by a rapid rise in cortisol levels, peaking 15–30 minutes after exposure to a stressor and returning to baseline within 60–90 minutes. This response is adaptive, facilitating the mobilization of energy resources necessary to cope with the challenge. However, chronic stress may lead to dysregulation of the HPA axis, manifesting as altered basal cortisol levels, disrupted circadian patterns, and/or modified reactivity to acute stressors [4].

Several distinct patterns of HPA axis dysregulation have been described in chronic stress conditions. Hyperactivity of the axis – elevated basal cortisol levels and/or exaggerated stress responses – is commonly observed during early stages of chronic stress and in certain psychiatric disorders, such as major depressive disorder. Conversely, HPA hypoactivity – reduced basal cortisol and/or blunted stress reactivity – can emerge in prolonged stress, post-traumatic stress disorder, and some somatic conditions including chronic fatigue syndrome and fibromyalgia [4].

Cortisol exerts a wide array of physiological effects, including regulation of glucose, lipid, and protein metabolism, modulation of immune and inflammatory responses, and influences on cardiovascular function and central nervous system activity. Through these mechanisms, cortisol plays a critical role in adaptation to stress. However, chronic HPA

hyperactivation may contribute to the development of various pathological states, such as metabolic syndrome, cardiovascular disease, immune dysfunction, and psychiatric disorders [5].

The oxidative status of the body reflects the balance between the production of reactive oxygen species (ROS) and the efficacy of antioxidant defense systems. Under normal physiological conditions, there exists a dynamic equilibrium between ROS generation and their neutralization by antioxidants. Disruption of this balance – either due to excessive ROS production or impaired antioxidant capacity – leads to oxidative stress, a key factor in the pathogenesis of numerous diseases and the aging process [6].

Reactive oxygen species include both free radicals such as the superoxide anion (O_2^-) and hydroxyl radical ($OH^\bullet$), as well as non-radical molecules like hydrogen peroxide (H_2O_2) and singlet oxygen (1O_2). ROS are generated during normal metabolic processes, particularly within the mitochondrial respiratory chain, and also by several enzymatic systems including NADPH oxidase, xanthine oxidase, and cyclooxygenase. Additionally, ROS production may be exacerbated by various environmental factors such as ultraviolet radiation, ionizing radiation, air pollution, smoking, and psychological stress [7].

The antioxidant system comprises enzymatic antioxidants – such as superoxide dismutase (SOD), catalase, and glutathione peroxidase (GPx) – and non-enzymatic antioxidants including glutathione, vitamins C and E, carotenoids, flavonoids, and other compounds. These components act in concert to neutralize ROS and prevent oxidative damage to cellular structures [8].

At physiological concentrations, ROS serve essential signaling functions, regulating processes such as cell proliferation, differentiation, apoptosis, and immune responses. However, excessive ROS levels may cause oxidative damage to lipids, proteins, and nucleic acids, thereby impairing membrane integrity, enzyme activity, receptor function, and genomic stability. These deleterious effects underlie the pathogenesis of many disorders, including cardiovascular, neurodegenerative, metabolic, and oncological diseases [9].

A broad range of biomarkers are used to assess oxidative status, which may be categorized into markers of lipid, protein, and DNA oxidation; markers of antioxidant defense; and integrative indices of oxidative/antioxidant balance [10].

Markers of lipid peroxidation include malondialdehyde (MDA), 4-hydroxynonenal (4-HNE), isoprostanes, and oxidized low-density lipoproteins (oxLDL). Among these, MDA is one of the most extensively studied and is commonly measured via thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS) assays. F2-isoprostanes are considered among the most reliable in vivo indicators of lipid peroxidation and can be detected in plasma, urine, and other biological matrices [10].

Markers of protein oxidation include protein carbonyls – formed through the oxidation of amino acid residues – and 3-nitrotyrosine, which results from the reaction of tyrosine with peroxynitrite. DNA oxidation markers include 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OHdG) and other oxidized bases, detectable in blood, urine, or tissue samples [9].

Indicators of antioxidant defense include the activity of antioxidant enzymes (SOD, catalase, GPx), levels of non-enzymatic antioxidants (e.g., glutathione, vitamins C and E), and total antioxidant capacity (TAC) of plasma or serum. Composite measures such as total oxidant status (TOS), total antioxidant status (TAS), and the oxidative stress index (OSI, the TOS/TAS ratio) are also employed to evaluate the overall oxidative-antioxidant balance [10].

Psychological stress is closely linked to oxidative stress via multiple mechanisms. First, stress activates the sympathetic nervous system and the HPA axis, leading to increased levels of catecholamines and glucocorticoids. These hormones can promote ROS production through the activation of NADPH oxidase and other enzymatic pathways, as well as through enhanced

metabolic and mitochondrial activity. Second, stress-induced inflammation involves the activation of immune cells that release ROS. Third, chronic stress may deplete antioxidant reserves, reducing the activity of enzymatic antioxidants and the levels of non-enzymatic antioxidants [6].

Numerous studies have demonstrated that both acute and chronic psychological stress are associated with elevated markers of oxidative stress and reduced antioxidant defense. For instance, students undergoing examination periods exhibit increased MDA levels and decreased antioxidant enzyme activity. Patients with post-traumatic stress disorder and depression also display evidence of oxidative stress. Experimental studies in animals have shown that various stress models (e.g., immobilization, social defeat, chronic unpredictable stress) induce oxidative stress in multiple tissues, including the brain, heart, liver, and kidneys [7].

Oxidative stress induced by psychological stress likely contributes to the pathogenesis of stress-related diseases. Oxidative damage to vascular endothelium promotes the development of atherosclerosis and hypertension. Oxidative stress in neurons and glial cells may lead to neurodegeneration and cognitive impairment. Damage to pancreatic β -cells may contribute to insulin resistance and type 2 diabetes mellitus. Thus, oxidative stress may serve as a key mechanistic link between psychological stress and somatic diseases [9].

Physiological Parameters

Heart rate variability (HRV) is a physiological phenomenon characterized by fluctuations in the time intervals between successive heartbeats. This parameter reflects the cardiovascular system's ability to rapidly adapt to changing internal and external conditions and serves as a key indicator of the functional state of the autonomic nervous system (ANS). HRV results from the complex interplay between the sympathetic and parasympathetic branches of the ANS, which exert opposing effects on cardiac activity: sympathetic activation increases heart rate and reduces HRV, whereas parasympathetic (vagal) activity slows the heart rate and enhances HRV [11].

The physiological basis of HRV encompasses multiple levels of regulation. At the central level, brainstem structures – particularly the medulla oblongata, where the vagal nuclei and sympathetic centers are located – play a pivotal role. Higher regulatory centers such as the hypothalamus, amygdala, prefrontal cortex, and insular cortex also contribute significantly. At the peripheral level, baroreceptors, chemoreceptors, and mechanoreceptors provide afferent input to central regulatory mechanisms. The intrinsic cardiac nervous system, composed of ganglia and nerve plexuses within the heart, further modulates HRV [12].

HRV analysis methods are typically classified into time-domain, frequency-domain, and non-linear approaches. Time-domain methods involve statistical analysis of the intervals between normal heartbeats (NN intervals) and include parameters such as SDNN (standard deviation of NN intervals), RMSSD (root mean square of successive differences), and pNN50 (percentage of NN intervals differing by more than 50 ms). Frequency-domain methods utilize spectral analysis to differentiate HRV components: high-frequency (HF, 0.15–0.4 Hz), low-frequency (LF, 0.04–0.15 Hz), and very-low-frequency (VLF, 0.0033–0.04 Hz) bands. Non-linear methods, such as entropy measures, fractal analysis, and Poincaré plots, assess the complexity and unpredictability of heart rate dynamics [13].

Each HRV component reflects specific aspects of ANS activity. The HF component is predominantly associated with parasympathetic influence and respiratory sinus arrhythmia. The LF component reflects both sympathetic and parasympathetic input, as well as baroreflex activity. The LF/HF ratio is often used as an index of sympathovagal balance, though its interpretation remains a topic of ongoing debate. The VLF component is linked to long-term

regulatory mechanisms, including thermoregulation, the renin–angiotensin system, and metabolic processes [11].

HRV is a sensitive marker of stress and adaptive capacity. Numerous studies have shown that acute psychological stress reduces overall HRV and the HF component while increasing the LF/HF ratio – indicating a shift toward sympathetic dominance and vagal withdrawal. These changes represent part of the broader physiological response aimed at mobilizing bodily resources to confront a perceived threat [14].

Chronic stress is associated with a more sustained reduction in HRV, suggesting long-term dysregulation of the ANS and diminished adaptive resilience. Low HRV is a recognized risk factor for cardiovascular disease, metabolic dysfunction, and mental disorders. Meta-analyses have demonstrated reduced HRV in individuals with depression, anxiety disorders, post-traumatic stress disorder, and other stress-related psychiatric conditions [15].

It is important to note that HRV is influenced by numerous confounding factors, including age, sex, physical activity, breathing patterns, body posture, circadian rhythm, medications, and comorbid somatic conditions. These variables must be considered when interpreting HRV results and investigating its associations with other physiological and biochemical markers [13].

Brain activity encompasses a complex set of electrophysiological, metabolic, and hemodynamic processes that reflect the functional state of the central nervous system. Investigating brain activity in the context of stress is essential for understanding the neurobiological mechanisms of the stress response and its interactions with other physiological and biochemical parameters.

A wide range of techniques are employed to assess brain activity, each with distinct strengths and limitations. Electroencephalography (EEG) records electrical activity of cortical neurons with high temporal resolution and allows for the identification of various brain rhythms: delta (0.5–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha (8–13 Hz), beta (13–30 Hz), and gamma (>30 Hz). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is based on the blood-oxygen-level-dependent (BOLD) signal and provides high spatial resolution mapping of hemodynamic changes associated with neural activity. Positron emission tomography (PET) and single-photon emission computed tomography (SPECT) enable visualization of metabolic activity and neurotransmitter systems using radioactive tracers. Magnetoencephalography (MEG) captures magnetic fields generated by neuronal activity, offering both high temporal and spatial resolution [16].

The neural networks involved in the stress response include several interconnected brain regions. The hypothalamus – particularly the paraventricular nucleus – is central to this process, containing neurons that secrete corticotropin-releasing hormone (CRH), initiating activation of the hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis. The amygdala plays a pivotal role in the processing of emotional information, especially related to threat and fear, and is rapidly activated in response to stressors. The hippocampus is critical for contextual memory and regulation of the HPA axis via negative feedback mechanisms. The prefrontal cortex, particularly its medial and orbitofrontal regions, contributes to cognitive appraisal of stressors and modulation of emotional responses. The insular cortex integrates visceral and somatosensory inputs and supports the awareness of emotional states. The anterior cingulate cortex is implicated in conflict monitoring and regulation of emotional and autonomic responses to stress [17].

Changes in brain activity under stress depend on the type, intensity, and duration of the stressor, as well as individual characteristics of the subject. Acute psychological stress typically results in increased activation of the amygdala, insular cortex, and anterior cingulate

cortex, along with deactivation of the medial prefrontal cortex. These alterations reflect a shift in balance from “cognitive” to “emotional” brain systems, with emotional reactivity overriding executive control. At the EEG level, acute stress is often associated with increased beta activity and reduced alpha power, indicative of heightened cortical arousal and vigilance [18].

Chronic stress can induce more persistent changes in both brain function and structure. Prolonged exposure to stressors and glucocorticoids has been linked to dendritic atrophy and reduced neurogenesis in the hippocampus, as well as structural alterations in the prefrontal cortex and amygdala. These changes may underlie the cognitive deficits and emotional dysregulation observed in chronic stress and stress-related psychiatric disorders. Functionally, chronic stress may lead to hyperactivation of the amygdala and hypoactivation of the prefrontal cortex, reflecting impaired top-down regulation of emotion [19].

It is important to highlight the close interconnection between brain activity and other physiological systems, including the autonomic nervous system and endocrine responses. Central stress-related structures such as the hypothalamus and brainstem regulate both sympathetic–parasympathetic balance and hormonal secretion. For instance, stress-induced activation of the amygdala can promote sympathetic output via projections to the hypothalamus and brainstem, as well as initiate HPA axis activation through CRH release. In turn, glucocorticoids and catecholamines exert feedback effects on brain activity via receptors expressed throughout key brain regions, establishing complex bidirectional regulatory loops [20].

Peripheral blood flow is an important physiological parameter that reflects the state of microcirculation and endothelial function. Alterations in peripheral circulation are part of the integrated physiological response to stress and may serve as indicators of sympathetic nervous system activation and vascular reactivity.

The physiology of peripheral circulation is based on a complex interplay between cardiac output, systemic vascular resistance, and local regulatory mechanisms. Blood flow in peripheral tissues is regulated through changes in the diameter of arterioles and precapillary sphincters, which determine total peripheral resistance and the distribution of blood across various organs and tissues. This regulation is mediated through neural, humoral, and local mechanisms [21].

Neural control of peripheral blood flow is primarily exerted by the sympathetic nervous system, which innervates vascular smooth muscle. Activation of sympathetic fibers leads to the release of norepinephrine, which binds to α 1-adrenergic receptors on vascular smooth muscle cells, causing vasoconstriction. The parasympathetic system plays a more limited role in direct vascular tone regulation but can influence peripheral circulation indirectly through cardiac control and the release of vasoactive substances [22].

Humoral regulation involves the action of circulating and locally produced vasoactive substances. Vasoconstrictors include catecholamines (adrenaline, norepinephrine), angiotensin II, vasopressin, endothelin-1, and thromboxane A2. Vasodilators include nitric oxide (NO), prostacyclin, bradykinin, histamine, and natriuretic peptides. The vascular endothelium plays a central role in tone regulation by synthesizing and releasing NO, prostacyclin, and endothelin-1 in response to stimuli such as shear stress, hypoxia, and vasoactive agents [23].

Various methods are used to assess peripheral blood flow, each with its own strengths and limitations. Laser Doppler flowmetry (LDF) is a non-invasive method based on the Doppler effect and enables real-time evaluation of skin microcirculation. Plethysmography measures volume changes in limbs or organs related to pulsatile blood flow and can assess circulation in extremities. Doppler ultrasound allows for measurement of flow velocity in

large and medium-sized arteries. Peripheral arterial tonometry (PAT) quantifies changes in pulse wave amplitude at the fingertips and can be used to assess endothelial function and peripheral vascular reactivity. Thermography measures skin temperature, which is dependent on cutaneous blood flow [21].

Stress significantly affects peripheral blood flow through sympathetic nervous system activation and catecholamine release. Acute psychological stress typically induces peripheral vasoconstriction, particularly in the skin and inactive skeletal muscles, resulting in reduced cutaneous blood flow and skin temperature. This response is part of the "fight-or-flight" mechanism aimed at redistributing blood toward vital organs (brain, heart) and active skeletal muscles. The degree of vasoconstriction varies depending on the intensity of the stressor, individual characteristics, and baseline vascular status [24].

Chronic stress can lead to more persistent alterations in peripheral blood flow and endothelial function. Repeated or prolonged sympathetic activation may contribute to endothelial dysfunction, characterized by reduced nitric oxide bioavailability and impaired endothelium-dependent vasodilation. Endothelial dysfunction is considered an early marker of atherosclerosis and a risk factor for cardiovascular disease. Chronic stress may also cause structural vascular changes, including arteriolar remodeling and capillary rarefaction, further impairing tissue perfusion and contributing to hypertension and other cardiovascular conditions [23].

It is important to note that the peripheral vascular response to stress is modulated by several factors, including age, sex, physical activity, smoking, obesity, and comorbid conditions. For example, older individuals and patients with cardiovascular disease often exhibit an exaggerated vasoconstrictive response to stress, possibly due to heightened sympathetic tone and/or existing endothelial dysfunction [21].

Research indicates that peripheral vasoconstriction during mental stress correlates with coronary vasomotor responses and may predict adverse cardiovascular outcomes in patients with ischemic heart disease. Specifically, individuals demonstrating a low peripheral arterial tonometry (PAT) ratio during mental stress (indicating pronounced vasoconstriction) have been shown to have a significantly higher risk of adverse cardiovascular events, independent of demographic and traditional cardiovascular risk factors.

Correlational Studies

The relationship between cortisol and physiological parameters represents a complex system of bidirectional interactions, reflecting the integration of various stress-regulating systems within the body. Investigating these relationships is crucial for understanding the mechanisms of stress and its impact on health.

One of the most well-documented interactions involves **the relationship between cortisol levels and heart rate variability (HRV)**, reflecting the integrated response of the endocrine and autonomic nervous systems to stress. This connection is supported by the neurovisceral integration model, which suggests that the prefrontal cortex modulates activity of both the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis and the sympathetic nervous system through common neural pathways. Consequently, impaired prefrontal cortex function may result in concurrent elevations in cortisol secretion and diminished HRV, indicating a breakdown in stress regulatory mechanisms.

Research has consistently demonstrated an inverse relationship between cortisol levels and HRV parameters, particularly those associated with parasympathetic nervous system activity (such as the high-frequency [HF] component and root mean square of successive differences [RMSSD]). Experimental evidence indicates that elevated cortisol concentrations correlate with decreased HRV in healthy individuals. Furthermore, studies examining cortisol

responses to psychosocial stressors (including standardized laboratory stress protocols) have shown that greater cortisol reactivity is associated with both lower baseline HRV and impaired autonomic recovery following stress exposure.

Importantly, the relationship between cortisol and HRV appears to be modulated by temporal factors. The circadian rhythms of cortisol secretion and HRV are partially synchronized, with cortisol peaking and HRV reaching a nadir in the early morning hours. However, this synchrony may be disrupted in chronic stress and various pathological states. For instance, individuals with post-traumatic stress disorder (PTSD) often exhibit a dissociation between low cortisol levels and reduced HRV, possibly reflecting distinct mechanisms of stress-system dysregulation [1].

The mechanisms linking cortisol and HRV involve both central and peripheral components. At the central level, brain regions involved in HPA axis regulation (e.g., the hypothalamus, amygdala, hippocampus, and prefrontal cortex) also modulate autonomic nervous system activity. Peripherally, glucocorticoid receptors are expressed in the heart and vasculature, allowing cortisol to directly influence cardiovascular function. Moreover, cortisol may modulate adrenergic receptor sensitivity, thereby enhancing the cardiovascular effects of catecholamines [25].

The clinical relevance of the cortisol-HRV relationship is well-established, with research demonstrating that concurrent elevations in cortisol and reductions in HRV are associated with heightened risks for cardiovascular disease, metabolic dysfunction, and psychiatric disorders. Prospective investigations have revealed that this combined biomarker profile (elevated cortisol with diminished HRV) can predict the onset of metabolic syndrome independent of conventional risk factors, highlighting its potential as a clinically significant risk indicator.

The relationship between cortisol and brain activity is bidirectional: on the one hand, activation of specific brain structures regulates cortisol secretion via the HPA axis; on the other, cortisol modulates the function and structure of various brain regions through glucocorticoid receptors, which are widely expressed throughout the central nervous system.

Studies using functional magnetic resonance imaging (fMRI) have shown that acute increases in cortisol – whether endogenous (in response to stress) or exogenous (via glucocorticoid administration) – are associated with altered activity in several key brain areas. Specifically, cortisol enhances amygdala activation in response to emotional stimuli, particularly those of a negative nature, potentially amplifying emotional reactivity to threats. Concurrently, cortisol reduces activity in the hippocampus and medial prefrontal cortex, which may impair memory formation and cognitive regulation of emotions [16].

Chronic exposure to elevated cortisol levels can induce structural changes in the brain. Numerous studies have found that chronic stress and hypercortisolemia are associated with hippocampal atrophy, reduced prefrontal cortical volume, and increased amygdala volume. These structural alterations may underlie the cognitive and emotional disturbances observed in chronic stress and stress-related psychiatric disorders such as depression and PTSD [26].

It is important to emphasize that the cortisol–brain activity relationship is influenced by individual factors such as age, sex, genetic background, and prior stress exposure. For instance, cortisol's impact on hippocampal function appears to be more pronounced in older adults, possibly explaining their heightened vulnerability to stress-induced cognitive decline. Genetic polymorphisms affecting glucocorticoid receptor sensitivity or serotonin transporter function may also modulate cortisol's effects on neural activity [16].

The relationship between oxidative status and peripheral blood flow is central to understanding the mechanisms of endothelial dysfunction and vascular complications in a

range of pathological conditions. The vascular endothelium is both a source and a target of reactive oxygen species (ROS), and the balance between ROS production and antioxidant defense plays a key role in the regulation of vascular tone and endothelial function [27].

Oxidative stress may impair peripheral blood flow through several mechanisms. First, ROS – particularly the superoxide anion (O_2^-) – can inactivate nitric oxide (NO), the primary endothelium-dependent vasodilator. The reaction between O_2^- and NO produces peroxynitrite ($ONOO^-$), a potent oxidant that further damages the endothelium. Reduced NO bioavailability leads to impaired endothelium-dependent vasodilation and a predominance of vasoconstrictor influences. Second, ROS can activate redox-sensitive signaling pathways in endothelial and smooth muscle cells, promoting the expression of pro-inflammatory genes, leukocyte adhesion, smooth muscle proliferation, and vascular remodeling. Third, oxidative damage to endothelial cells may compromise barrier function, facilitating the infiltration of lipoproteins and inflammatory cells into the vascular wall – a key event in the pathogenesis of atherosclerosis [27].

Interestingly, the oxidative status–blood flow relationship is modifiable by lifestyle and therapeutic factors. Regular physical activity enhances endothelial function by boosting antioxidant defenses and upregulating endothelial nitric oxide synthase (eNOS) expression. Diets rich in antioxidants (e.g., vitamins C and E, polyphenols) help protect the endothelium from oxidative injury and support peripheral circulation. Conversely, smoking and high saturated fat intake exacerbate oxidative stress and impair endothelial function [27].

Interactions between biochemical stress markers (e.g., cortisol, oxidative status) and physiological parameters (e.g., HRV, brain activity, peripheral blood flow) form a complex network of interrelations, reflecting the integrative function of multiple bodily systems in response to stress. These relationships extend beyond simple pairwise correlations and include multilevel, multidirectional connections that vary depending on context, timing, and individual characteristics.

Several integrative models have been proposed to explain these complex physiological interactions. Among the most influential is the allostatic load model, which conceptualizes chronic stress as causing cumulative "wear and tear" on the body's regulatory systems. This model describes how prolonged stress leads to multisystem dysregulation affecting neuroendocrine (cortisol, catecholamines), immune, metabolic, and cardiovascular functions. Elevated allostatic load has been consistently associated with increased disease risk and premature mortality [28].

An important theoretical perspective is provided by the neurovisceral integration model, which highlights the central autonomic network (CAN) as a critical mediator of stress responses. This network, encompassing prefrontal, cingulate, and insular cortices along with limbic and brainstem structures, coordinates cognitive, emotional, and physiological aspects of stress adaptation. CAN dysfunction may result in impaired emotion regulation, diminished heart rate variability, and dysregulated HPA axis activity [29].

Empirical studies of the integrated relationships between biochemical and physiological stress markers often employ advanced multivariate statistical techniques such as factor analysis, cluster analysis, and structural equation modeling. These approaches enable the identification of latent structures and causal relationships within complex data sets.

Recent research employing multimodal monitoring in ecological settings has revealed important insights into stress biomarker dynamics. Studies using wearable devices to simultaneously track autonomic parameters (HRV, electrodermal activity) and physical activity patterns, combined with biochemical sampling (cortisol, alpha-amylase), have demonstrated significant context-dependent variability in stress marker interrelationships. These findings

highlight how biomarker associations fluctuate based on situational factors, circadian rhythms, and individual characteristics, emphasizing both the value of personalized stress assessment approaches and the need to consider temporal patterns in stress physiology [28].

Clinical Significance of Complex Interactions

Understanding the complex interactions between biochemical and physiological stress markers holds significant clinical value for the diagnosis, risk stratification, and treatment of stress-related disorders.

First, comprehensive assessment of multiple stress biomarkers may enhance diagnostic accuracy and risk profiling. Research has demonstrated that composite indices incorporating diverse physiological markers - including neuroendocrine (cortisol, DHEA, catecholamines), autonomic (HRV, blood pressure), and metabolic (cholesterol, glycated hemoglobin) parameters - show superior predictive value for cardiovascular risk, cognitive impairment, and mortality compared to single biomarker approaches. These findings support the clinical utility of multidimensional stress profiling in preventive medicine and risk stratification.

Second, elucidating the mechanisms by which different physiological systems interact under stress may support the development of more effective therapeutic strategies. For instance, interventions aimed at improving HRV (e.g., biofeedback, meditation, physical exercise) may not only enhance autonomic function but also positively influence HPA axis regulation, oxidative status, and brain activity via neurovisceral integration mechanisms [30].

Third, monitoring complex stress biomarker interactions can contribute to the personalization of therapeutic approaches. Individual patients may exhibit distinct patterns of stress-system dysregulation, necessitating tailored interventions. For example, individuals with predominant sympathetic hyperactivation may benefit more from beta-blockers or relaxation techniques, whereas those with HPA axis dysregulation may respond better to antidepressants or cognitive-behavioral therapy [25].

Clinical Significance and Practical Applications

Diagnostic and Prognostic Value of Stress Biomarkers

Stress biomarkers – including cortisol, oxidative stress indicators, and physiological parameters – hold substantial promise for clinical use in the diagnosis, prognosis, and monitoring of stress-related conditions. A comprehensive evaluation of these biomarkers can provide a more nuanced understanding of the body's stress response and support the personalization of therapeutic strategies.

Diagnostic Value of Cortisol

Measurement of cortisol levels is widely employed in clinical practice to diagnose disorders of the hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis, such as Cushing's syndrome (hypercortisolism) and Addison's disease (hypocortisolism). However, interpreting cortisol values in the context of psychological stress poses challenges due to considerable intra- and interindividual variability, as well as fluctuations related to circadian rhythms and contextual influences [1].

To enhance the diagnostic utility of cortisol as a stress biomarker, several methodological approaches have been proposed. First, evaluating the circadian profile of cortisol secretion – including the cortisol awakening response (CAR) and diurnal variation – offers more informative insights than single-point measurements. Disruptions in cortisol rhythms have been observed in various stress-related conditions, such as depression, post-traumatic stress disorder (PTSD), and chronic fatigue syndrome [5].

Second, assessing cortisol reactivity to standardized stressors (e.g., the Trier Social Stress Test, TSST) can reveal regulatory impairments of the HPA axis that are not evident under baseline conditions. Blunted or exaggerated cortisol reactivity may serve as markers of

distinct psychopathological states. For instance, blunted reactivity is often found in individuals with PTSD and certain forms of depression, whereas heightened reactivity may be linked to anxiety disorders [3].

Third, measuring cortisol in hair offers a non-invasive means of evaluating cumulative exposure to the hormone over extended periods (weeks to months), making it especially valuable for studying chronic stress. Elevated hair cortisol levels have been associated with a range of stress-related conditions, including depression, metabolic syndrome, and cardiovascular disease. Meta-analyses suggest that hair cortisol concentration may serve as a useful biomarker for distinguishing endogenous depression from other psychiatric disorders [1].

Diagnostic Value of Oxidative Status

Assessment of oxidative status has potential diagnostic relevance for a variety of stress-associated disorders, including cardiovascular, neurodegenerative, metabolic, and psychiatric conditions. However, the clinical application of oxidative stress markers is limited by several factors, including a lack of standardized methodologies, high interindividual variability, and the non-specific nature of oxidative alterations across diverse pathologies [10].

Despite these limitations, certain oxidative stress markers have demonstrated diagnostic utility in specific clinical contexts. For instance, elevated levels of F2-isoprostanes in plasma or urine are considered reliable indicators of *in vivo* lipid peroxidation and have been linked to a range of cardiovascular diseases, including atherosclerosis, coronary artery disease, and hypertension. Meta-analyses suggest that F2-isoprostane levels may serve as useful biomarkers for risk stratification in patients with established cardiovascular disease [10].

Oxidized low-density lipoproteins (oxLDL) are important markers of oxidative stress, particularly in the context of atherosclerosis. Elevated oxLDL levels are associated with subclinical atherosclerosis, endothelial dysfunction, and increased risk of cardiovascular events. Studies have shown that oxLDL levels can serve as independent predictors of acute coronary syndrome in healthy middle-aged men, even after adjustment for conventional risk factors.

Markers of DNA oxidative damage, such as 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine (8-OHdG), also hold diagnostic promise for diseases involving oxidative stress, including cancer, neurodegenerative disorders, and diabetes. Meta-analytic evidence suggests that urinary 8-OHdG may serve as a useful biomarker for the early detection and monitoring of diabetic nephropathy progression [9].

Diagnostic Value of Physiological Parameters

Physiological parameters such as heart rate variability (HRV), brain activity, and peripheral blood flow have considerable clinical potential for diagnosing and predicting stress-related conditions.

HRV is one of the most extensively studied physiological markers of stress and has established diagnostic relevance for various cardiovascular and psychiatric disorders. Reduced HRV is observed in numerous pathological states, including ischemic heart disease, heart failure, hypertension, diabetes, depression, anxiety disorders, and PTSD. Meta-analytic evidence indicates that decreased HRV is associated with an elevated risk of cardiovascular events and mortality in both clinical and general populations [11].

To enhance the diagnostic utility of HRV, a comprehensive approach is recommended, encompassing time-domain, frequency-domain, and non-linear indices. For example, SDNN and total spectral power reflect overall HRV; RMSSD and the high-frequency (HF) component reflect parasympathetic activity; and the low-frequency/high-frequency (LF/HF) ratio is commonly interpreted as a marker of sympathovagal balance. Non-linear parameters, such as entropy and fractal dimension, provide additional insight into the complexity and unpredictability of heart rhythm dynamics [13].

Brain activity, assessed through electroencephalography (EEG), functional magnetic resonance imaging (fMRI), and other neuroimaging techniques, also holds diagnostic potential for stress-related psychiatric disorders. For instance, specific activation patterns in the amygdala, prefrontal cortex, and other limbic structures in response to emotional stimuli may aid in the differential diagnosis of depression, anxiety disorders, and PTSD. A meta-analysis has shown that amygdala hyperactivation and prefrontal hypoactivation in response to negative emotional stimuli are reliable neuroimaging markers of depression [16].

Peripheral blood flow and endothelial function have well-established diagnostic relevance for cardiovascular disease. Endothelial dysfunction – assessed by flow-mediated dilation (FMD) of the brachial artery or peripheral arterial tonometry (PAT) – serves as an early marker of atherosclerosis and a predictor of cardiovascular events. Meta-analytic findings suggest that reduced FMD is associated with increased cardiovascular risk in both clinical populations and the general public [27].

Integrated Biomarker Assessment and Allostatic Load

A comprehensive evaluation of multiple stress biomarkers may enhance diagnostic and prognostic accuracy compared to single-marker approaches. The concept of allostatic load provides a theoretical framework for such integrative assessment, where the cumulative burden of chronic stress is quantified through multi-system biomarkers. The Allostatic Load Index (ALI), which incorporates neuroendocrine, autonomic, metabolic, and inflammatory markers, has been shown to be a more robust predictor of adverse health outcomes than individual biomarkers alone.

Research demonstrates that an Allostatic Load Index (ALI) incorporating biomarkers from multiple physiological systems – including neuroendocrine (cortisol, DHEA), autonomic (catecholamines, HRV), cardiovascular (blood pressure), metabolic (glucose, lipids), and inflammatory (CRP, cytokines) parameters – shows strong predictive validity for various adverse health outcomes. Longitudinal studies have revealed that elevated ALI scores significantly predict future declines in both physical and cognitive functioning among aging populations, even after controlling for demographic factors and baseline health status. These findings highlight the clinical value of multi-system physiological assessment in identifying individuals at elevated risk for age-related health deterioration.

Other integrative approaches include assessing the “metabolic signature” of stress via metabolomics, the “immune signature” via cytomics, and the “epigenetic signature” via epigenomic profiling. These emerging methodologies may offer a more comprehensive view of molecular and cellular alterations associated with stress and facilitate the identification of novel biomarkers and therapeutic targets [28].

Therapeutic Approaches Based on Stress Biomarkers

Understanding the interactions between biochemical stress markers and physiological parameters opens new avenues for the development of therapeutic strategies aimed at normalizing the function of stress-regulatory systems. These strategies may include pharmacological and non-pharmacological interventions, as well as their combinations.

Pharmacological approaches to stress management involve agents targeting various components of the stress response, including the hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis, the sympathetic nervous system, serotonergic and noradrenergic systems, and oxidative stress pathways.

Several classes of pharmacological agents target HPA axis regulation, including glucocorticoid receptor antagonists (e.g., mifepristone), cortisol synthesis inhibitors (e.g., metyrapone), and corticotropin-releasing hormone (CRH) receptor antagonists. These medications show therapeutic potential for conditions characterized by HPA axis

hyperactivity, such as depression, anxiety disorders, and metabolic syndrome. Clinical evidence suggests these agents may improve cognitive function and reduce psychiatric symptoms in certain patient populations. However, their clinical application remains limited due to significant side effects and the need for further therapeutic optimization [31].

Pharmacological agents targeting the sympathetic nervous system include beta-blockers (e.g., propranolol), alpha-blockers (e.g., prazosin), and central sympatholytics (e.g., clonidine). These medications are effective in treating conditions associated with sympathetic hyperactivation, such as hypertension, anxiety disorders, and post-traumatic stress disorder (PTSD). Clinical studies have demonstrated that prazosin significantly reduces nightmares and sleep disturbances in patients with PTSD. Beta-blockers have also shown efficacy in preventing stress-induced cardiovascular events in patients with pre-existing heart disease [31].

Antidepressants, particularly SSRIs and SNRIs, are first-line treatments for depression and anxiety disorders associated with chronic stress. These medications normalize HPA axis activity, increase HRV, and reduce oxidative stress through monoaminergic modulation. Clinical studies demonstrate that SSRI/SNRI-induced HRV improvements correlate with symptom reduction [31].

Antioxidants including vitamins C and E, N-acetylcysteine (NAC), coenzyme Q10, and polyphenols may reduce oxidative stress associated with psychological stress by protecting cells from oxidative damage and improving endothelial function. Clinical studies report that NAC administration reduces depressive and anxiety symptoms in mood disorders, accompanied by decreased oxidative stress markers. However, clinical trials show inconsistent efficacy of antioxidant therapies in stress-related conditions, potentially due to variations in dosing regimens, treatment duration, and baseline oxidative status [6].

Integrative Approaches

Integrative approaches that combine pharmacological and non-pharmacological interventions may be more effective than monotherapy, particularly in the management of complex stress-related conditions. For example, the combination of antidepressants with cognitive-behavioral therapy (CBT) has demonstrated greater efficacy in the treatment of depression and anxiety disorders compared to either modality alone. Similarly, combining antihypertensive medications with lifestyle modifications – such as physical exercise, dietary changes, and stress management techniques – has been shown to be more effective in reducing blood pressure and cardiovascular risk than pharmacotherapy alone [31].

Conclusion. This review provides a comprehensive analysis of the relationships between biochemical markers of stress (cortisol, oxidative status) and physiological parameters (heart rate variability, brain activity, peripheral blood flow). The literature analysis conducted here supports several key conclusions and highlights promising directions for future research.

Key Findings

Stress represents a complex, multi-level response involving numerous physiological systems and biochemical processes. The core components of the stress response include activation of the hypothalamic–pituitary–adrenal (HPA) axis with subsequent cortisol release, stimulation of the sympathetic nervous system, alterations in oxidative status, and modulation of cardiac function, brain activity, and peripheral circulation.

Cortisol, the primary glucocorticoid hormone in humans, plays a central role in the stress response by regulating metabolic, immune, and neuroendocrine processes. Acute stress induces a transient increase in cortisol levels as an adaptive response aimed at mobilizing energy resources and preparing the body to cope with a stressor. However, chronic stress can lead to HPA axis dysregulation, manifested as hyper- or hypocortisolism, disrupted circadian

secretion rhythms, and altered tissue sensitivity to glucocorticoids. These disturbances are associated with a range of pathological conditions, including depression, anxiety disorders, post-traumatic stress disorder (PTSD), metabolic syndrome, and cardiovascular disease [1].

Oxidative status, reflecting the balance between reactive oxygen species (ROS) production and antioxidant defenses, is also significantly modulated by stress. Psychological stress can induce oxidative stress via several mechanisms, including activation of the sympathetic nervous system, inflammation, mitochondrial dysfunction, and the direct effects of glucocorticoids. Chronic oxidative stress results in damage to cellular components – including lipids, proteins, and DNA – and plays a key role in the pathogenesis of stress-related disorders. Markers of oxidative stress, such as F2-isoprostanes, 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, and oxidized low-density lipoproteins (oxLDL), are elevated in various psychiatric and somatic conditions associated with stress [6].

Heart rate variability (HRV) is one of the most informative physiological markers of stress, reflecting the balance between sympathetic and parasympathetic regulation of cardiac activity. Acute stress typically leads to decreased HRV due to sympathetic activation and parasympathetic withdrawal. Chronic stress is associated with persistently reduced HRV, which is an independent predictor of cardiovascular morbidity and mortality. Different HRV indices – including time-domain (e.g., SDNN, RMSSD), frequency-domain (e.g., HF, LF, LF/HF), and nonlinear metrics (e.g., entropy, fractal dimension) – offer complementary insights into various aspects of autonomic regulation [11].

Brain activity, as measured by electroencephalography (EEG), functional magnetic resonance imaging (fMRI), and other techniques, is also significantly modulated by stress. Acute stress activates a specific neural network that includes the amygdala, hypothalamus, anterior cingulate cortex, and prefrontal cortex. Chronic stress may lead to structural and functional alterations in these regions, including amygdala hypertrophy, hippocampal and prefrontal cortical atrophy, and changes in functional connectivity across brain regions. These neural changes correlate with impairments in cognitive function, emotional regulation, and stress reactivity observed in various psychiatric disorders [16].

Peripheral blood flow and endothelial function are likewise modulated by stress through multiple mechanisms, including sympathetic nervous system activation, catecholamine and cortisol release, oxidative stress, and inflammation. Acute stress typically induces vasoconstriction and reduced peripheral blood flow as part of the classic "fight or flight" response. Chronic stress is associated with endothelial dysfunction, characterized by decreased nitric oxide bioavailability, increased expression of adhesion molecules and pro-inflammatory cytokines, and a prothrombotic state. These alterations contribute to the pathogenesis of atherosclerosis, hypertension, and other cardiovascular diseases [27].

Correlational Insights and Clinical Implications

Analysis of correlational studies has revealed significant relationships between biochemical markers of stress and physiological parameters. Cortisol levels are negatively correlated with heart rate variability (HRV), particularly with parasympathetic indicators such as RMSSD and HF, reflecting reciprocal interactions between the HPA axis and the autonomic nervous system. Oxidative stress markers are also negatively associated with HRV, potentially mediated by the direct effects of reactive oxygen species (ROS) on the sinoatrial node and autonomic nerve fibers, as well as indirect pathways involving inflammation and endothelial dysfunction. Cortisol and oxidative stress markers correlate with changes in brain activity, especially in regions rich in glucocorticoid receptors and vulnerable to oxidative damage, such as the hippocampus, amygdala, and prefrontal cortex. Finally, both cortisol and oxidative stress are associated with endothelial dysfunction and impairments in peripheral blood flow,

which may arise from direct effects on endothelial cells or through inflammatory and metabolic pathways [25].

These associations are not unidirectional but instead represent a complex network of interactions with numerous feedback loops. For instance, reduced HRV may lead to increased cortisol levels due to diminished parasympathetic inhibition of the HPA axis. Oxidative stress may decrease HRV by damaging autonomic fibers and the sinoatrial node. Alterations in brain activity – particularly in regions regulating the HPA axis and autonomic nervous system – can influence cortisol levels, HRV, and oxidative status. Endothelial dysfunction and impaired peripheral circulation can cause tissue hypoxia, oxidative stress, and inflammation, which in turn may affect the HPA axis, autonomic regulation, and neural activity [28].

Understanding these interconnected systems holds substantial clinical relevance for the diagnosis, prognosis, and treatment of stress-related disorders. A comprehensive assessment of stress biomarkers – including cortisol, oxidative stress indicators, HRV, brain activity, and endothelial function – can provide a more holistic view of the stress response and help identify patients at elevated risk for stress-related pathologies. Therapeutic approaches aimed at restoring balance across these systems – including pharmacological interventions (e.g., antidepressants, beta-blockers, antioxidants) and non-pharmacological strategies (e.g., psychotherapy, physical exercise, relaxation techniques) – may be most effective when personalized according to individual biomarker profiles [31].

Limitations and Methodological Challenges

Despite significant advances in understanding the relationships between biochemical stress markers and physiological parameters, several limitations and methodological issues must be considered when interpreting research findings and applying them clinically.

First, most studies employ cross-sectional designs, which limit the ability to infer causal relationships between different stress biomarkers. Longitudinal studies with repeated assessments over extended periods are necessary to better understand the temporal dynamics and causality within the stress response system [28].

Second, there is considerable heterogeneity in the methods used to assess stress biomarkers, which complicates the comparison of findings across studies. For example, cortisol can be measured in various biological fluids (saliva, blood, urine) and tissues (hair, nails), each reflecting different facets of HPA axis function. Similarly, numerous oxidative stress markers capture diverse aspects of oxidative damage and antioxidant defense. HRV may be evaluated using a range of time-domain, frequency-domain, and nonlinear indices, each representing different aspects of autonomic control. Standardization of measurement protocols is essential for improving the comparability of findings across studies [1].

Current research often examines a narrow range of stress biomarkers, which limits comprehensive understanding of stress physiology. A more complete assessment requires simultaneous evaluation of multiple biomarkers across different physiological systems to fully characterize stress response mechanisms. The allostatic load framework provides a theoretical basis for such integrative approaches, though its practical implementation and clinical validation present ongoing challenges [28].

Fourth, substantial individual variability exists in stress reactivity and vulnerability to stress-related disorders, influenced by genetic, epigenetic, developmental, and psychosocial factors. This variability can obscure or modify the relationships between stress biomarkers at the group level. A personalized approach that takes individual differences in stress reactivity into account is crucial for enhancing diagnostic accuracy and treatment efficacy [31].

Finally, the majority of studies are conducted under controlled laboratory conditions using standardized stressors, which may not adequately reflect real-life stress experiences.

Ecologically valid methods of stress assessment – such as Ecological Momentary Assessment (EMA) and ambulatory physiological monitoring – are needed to gain a more accurate understanding of stress responses in naturalistic settings [32].

Future Research Directions

Despite the aforementioned limitations, research on the interrelationships between biochemical stress markers and physiological parameters remains a promising field with important clinical implications.

One key priority is the implementation of longitudinal studies with repeated assessments of multiple stress biomarkers over extended periods. Such research would allow for a better understanding of the temporal dynamics and causal relationships among various components of the stress response, as well as the identification of early biomarkers of risk for developing stress-related disorders. Studies beginning in childhood or adolescence and continuing into adulthood are of particular interest, as they may elucidate the ontogenetic aspects of stress reactivity and vulnerability to stress-related diseases [28].

Another important direction involves the development and validation of composite stress biomarker panels that include markers from multiple physiological systems. These panels may provide a more comprehensive profile of the body's stress response and improve diagnostic and prognostic precision for stress-related conditions. The allostatic load framework offers a strong theoretical basis for such an approach, although further research is needed to operationalize and validate it in diverse clinical settings. Advanced multivariate data analysis techniques such as machine learning and network analysis may aid in identifying the most informative biomarker combinations for various clinical applications [28].

Research into genetic, epigenetic, and psychosocial factors that modulate the relationships between biochemical and physiological stress markers is also of great interest. Such studies may clarify the mechanisms underlying individual variability in stress reactivity and disease susceptibility, and assist in identifying potential therapeutic targets. In particular, research on epigenetic mechanisms mediating the long-term effects of early-life stress on adult stress-regulatory systems holds considerable promise [31].

The development and validation of ecologically valid methods for assessing stress and stress biomarkers in daily life is another critical future direction. Approaches such as Ecological Momentary Assessment (EMA), ambulatory physiological monitoring, and wearable technologies for continuous tracking of stress biomarkers may provide more realistic insights into stress responses in naturalistic contexts and improve ecological validity. Integrating these approaches with conventional laboratory assessments can yield complementary insights into different facets of stress physiology [32].

Finally, there is growing clinical interest in evaluating the efficacy of personalized therapeutic interventions based on individual biomarker profiles. Such studies could support the optimization of treatment strategies for a range of stress-related conditions and enhance the effectiveness of preventive measures in at-risk populations. Especially valuable would be studies comparing the effectiveness of pharmacological and non-pharmacological interventions in patients with different patterns of stress system dysregulation, as well as investigations into the prognostic value of changes in stress biomarkers for long-term health outcomes [31].

REFERENCES

1. Stalder T., Kirschbaum C., Kudielka B.M. et al. Assessment of the cortisol awakening response: Expert consensus guidelines // *Psychoneuroendocrinology*. – 2016. – Vol. 63. – P. 414–432.
2. Hellhammer D.H., Wüst S., Kudielka B.M. Salivary cortisol as a biomarker in stress research // *Psychoneuroendocrinology*. – 2009. – Vol. 34, No 2. – P. 163–171.

3. Allen A.P., Kennedy P.J., Cryan J.F. et al. Biological and psychological markers of stress in humans: Focus on the Trier Social Stress Test // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2014. – Vol. 38. – P. 94–124.
4. Miller G.E., Chen E., Zhou E.S. If it goes up, must it come down? Chronic stress and the hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis in humans // *Psychological Bulletin*. – 2007. – Vol. 133, No 1. – P. 25–45.
5. Adam E.K., Quinn M.E., Tavernier R. et al. Diurnal cortisol slopes and mental and physical health outcomes: A systematic review and meta-analysis // *Psychoneuroendocrinology*. – 2017. – Vol. 83. – P. 25–41.
6. Sies H., Berndt C., Jones D.P. Oxidative stress // *Annual Review of Biochemistry*. – 2017. – Vol. 86. – P. 715–748.
7. Pizzino G., Irrera N., Cucinotta M. et al. Oxidative stress: Harms and benefits for human health // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. – 2017. – Article ID 8416763.
8. Schieber M., Chandel N.S. ROS function in redox signaling and oxidative stress // *Current Biology*. – 2014. – Vol. 24, No 10. – P. R453–R462.
9. Liguori I., Russo G., Curcio F. et al. Oxidative stress, aging, and diseases // *Clinical Interventions in Aging*. – 2018. – Vol. 13. – P. 757–772.
10. Marrocco I., Altieri F., Peluso I. Measurement and clinical significance of biomarkers of oxidative stress in humans // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. – 2017. – Article ID 6501046.
11. Shaffer F., Ginsberg J.P. An overview of heart rate variability metrics and norms // *Frontiers in Public Health*. – 2017. – Vol. 5. – Article ID 258.
12. Thayer J.F., Åhs F., Fredrikson M. et al. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2012. – Vol. 36, No 2. – P. 747–756.
13. Laborde S., Mosley E., Thayer J.F. Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research – recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting // *Frontiers in Psychology*. – 2017. – Vol. 8. – Article ID 213.
14. Kim H.G., Cheon E.J., Bai D.S. et al. Stress and heart rate variability: A meta-analysis and review of the literature // *Psychiatry Investigation*. – 2018. – Vol. 15, No 3. – P. 235–245.
15. Jarczok M.N., Jarczok M., Mauss D. et al. Autonomic nervous system activity and workplace stressors – A systematic review // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2013. – Vol. 37, No 8. – P. 1810–1823.
16. Dedovic K., Duchesne A., Andrews J. et al. The brain and the stress axis: The neural correlates of cortisol regulation in response to stress // *NeuroImage*. – 2009. – Vol. 47, No 3. – P. 864–871.
17. Hermans E.J., Henckens M.J., Joëls M., Fernández G. Dynamic adaptation of large-scale brain networks in response to acute stressors // *Trends in Neurosciences*. – 2014. – Vol. 37, No 6. – P. 304–314.
18. McEwen B.S., Morrison J.H. The brain on stress: Vulnerability and plasticity of the prefrontal cortex over the life course // *Neuron*. – 2013. – Vol. 79, No 1. – P. 16–29.
19. Arnsten A.F. Stress weakens prefrontal networks: molecular insults to higher cognition // *Nature Neuroscience*. – 2015. – Vol. 18, No 10. – P. 1376–1385.
20. Ulrich-Lai Y.M., Herman J.P. Neural regulation of endocrine and autonomic stress responses // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2009. – Vol. 10, No 6. – P. 397–409.
21. Kim J.H., Almuwaqqat Z., Hammadah M. et al. Peripheral vasoconstriction during mental stress and adverse cardiovascular outcomes in patients with coronary artery disease // *Circulation Research*. – 2019. – Vol. 125, No 10. – P. 874–883.
22. Carter J.R., Ray C.A. Sympathetic neural responses to mental stress: Responders, nonresponders and sex differences // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. – 2009. – Vol. 296, No 3. – P. H847–H853.
23. Toda N., Nakanishi-Toda M. How mental stress affects endothelial function // *Pflügers Archiv – European Journal of Physiology*. – 2011. – Vol. 462, No 6. – P. 779–794.
24. Ghiadoni L., Donald A.E., Cropley M. et al. Mental stress induces transient endothelial dysfunction in humans // *Circulation*. – 2000. – Vol. 102, No 20. – P. 2473–2478.
25. Thayer J.F., Sternberg E.M. Beyond heart rate variability: Vagal regulation of allostatic systems // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 2006. – Vol. 1088, No 1. – P. 361–372.
26. McEwen B.S. Neurobiological and systemic effects of chronic stress // *Chronic Stress*. – 2017. – Vol. 1. – Article ID 2470547017692328.
27. Incalza M.A., D’Oria R., Natalicchio A. et al. Oxidative stress and reactive oxygen species in endothelial dysfunction associated with cardiovascular and metabolic diseases // *Vascular Pharmacology*. – 2018. – Vol. 100. – P. 1–19.
28. Picard M., McEwen B.S., Epel E.S., Sandi C. An energetic view of stress: Focus on mitochondria // *Frontiers in Neuroendocrinology*. – 2018. – Vol. 49. – P. 72–85.

29. Johnsen B.H., Hansen A.L., Murison R. et al. Heart rate variability and cortisol responses during attentional and working memory tasks in naval cadets // *International Maritime Health*. – 2012. – Vol. 63, No 4. – P. 181–187.
30. Lehrer P.M., Gevirtz R. Heart rate variability biofeedback: How and why does it work? // *Frontiers in Psychology*. – 2014. – Vol. 5. – Article ID 756.
31. Jurueña M.F., Eror F., Cleare A.J., Young A.H. The role of early life stress in HPA axis and anxiety // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. – 2020. – Vol. 1191. – P. 141–153.
32. Smyth J.M., Zawadzki M.J., Juth V., Sciamanna C.N. Global life satisfaction predicts ambulatory affect, stress, and cortisol in daily life in working adults // *Journal of Behavioral Medicine*. – 2018. – Vol. 41, No 4. – P. 556–569.

Received March 27, 2025

ВЗАИМОСВЯЗЬ БИОХИМИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ СТРЕССА И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ РЕГУЛЯЦИИ

К. Тодороски

В данной статье исследуется взаимосвязь между биохимическими маркерами стресса (кортизол, показатели окислительного статуса) и физиологическими параметрами автономной регуляции (вариабельность сердечного ритма, активность головного мозга, периферический кровоток). Современные методы оценки этих параметров анализируются в рамках концепции «ось мозг–сердце». На основе актуальных научных данных представлены механизмы взаимодействия различных регуляторных систем организма при стрессе и обсуждается их клиническая значимость. Обзор основан на системном анализе современных исследований.

Ключевые слова: стресс; кортизол; вариабельность сердечного ритма; активность мозга; периферический кровоток; окислительный стресс; вегетативная нервная система; биомаркеры; нейровисцеральная интеграция; физиология.

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 University, Moscow, RF.
E-mail: todoroski@mgpu.ru
ORCID: 0000-0003-4908-4316
AuthorID: 1129667

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия А: Естественные науки**

2025. – № 2

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>
