

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

**Вестник
Донецкого
национального
университета**



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

1 / 2026

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. Вардуни*; д-р физ.-мат. наук, проф. *Вал.В. Волчков*; д-р физ.-мат. наук, проф. *Вит.В. Волчков*; д-р биол. наук, проф. *А.З. Глухов*; д-р физ.-мат. наук, проф. *А.С. Гольцев*; д-р биол. наук, доц. *С.Н. Горбов*; д-р хим. наук, проф. *А.В. Гулевская*; д-р биол. наук, доц. *Т.В. Денисова*; д-р хим. наук, проф. *В.Д. Дяченко*; д-р физ.-мат. наук, доц. *В.П. Заставный*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А.В. Зыза*; д-р геогр. наук, проф. *К.Ш. Казеев*; д-р биол. наук, проф. *В.Н. Калаев*; канд. биол. наук, доц. *Е.А. Калаева*; д-р физ.-мат. наук, проф. *С.А. Калоеров*; д-р биол. наук, с.н.с. *О.Е. Клименко*; д-р с-х наук, проф. *С.И. Колесников*; д-р физ.-мат. наук, доц. *Б.И. Коносевиц*; канд. биол. наук *В.О. Корниенко*; д-р хим. наук, проф. *Т.П. Кустова*; д-р биол. наук, доц. *Е.В. Лопатина*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А.В. Мазнев*; д-р хим. наук, проф. *В.М. Михальчук*; д-р физ.-мат. наук, доц. *И.А. Моисеенко*; д-р биол. наук, проф. *И.В. Мухина*; д-р физ.-мат. наук, доц. *Р.Н. Нескородев*; д-р биол. наук, проф. *В.Б. Павленко*; д-р биол. наук, доц. *С.В. Погодина*; канд. биол. наук, доц. *А.И. Сафонов*; д-р биол. наук, проф. *В.И. Соболев*; д-р техн. наук, проф. *В.И. Сторожев*; д-р биол. наук, доц. *В.В. Труш*; д-р хим. наук *Т.Г. Тюринна*; д-р биол. наук, доц. *М.Г. Холявка*; д-р хим. наук, доц. *И.Н. Щербак*.

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

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

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

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

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

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

Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92. **E-mail:** vestnikdonnu_a@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikA>, <http://dongu-vestnik01.ru>

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

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

Журнал включен в перечень **РИНЦ** (Лицензионный договор № 230-11/2025 от 17 ноября 2025 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 № 4 от 06.04.2026 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Механика

<i>Калоеров С. А.</i> Комплексные потенциалы задачи о плоском изгибе анизотропной пластинки	3
<i>Калоеров С. А., Мироненко А. Б.</i> Точное решение задач о плоском изгибе пластинки с эллиптическим отверстием или трещиной	14
<i>Полянский М. А.</i> Решение задачи электромагнитоупругости для многосвязной пьезоплоскости	23

Химические науки

<i>Кочетова Л. Б., Кустова Т. П.</i> Влияние растворителя вода – 1,4-диоксан на кинетические закономерности реакций α -аминокислот с 4-нитрофениловым эфиром уксусной кислоты	33
--	----

Биологические науки

<i>Иванов А. С., Дерюгина А. В., Ястребов П. В., Бояринов Г. А.</i> Влияние рыбьего жира и озонированного рыбьего жира на показатели микроциркуляции кровотока при моделировании физической нагрузки	45
<i>Иванова Т. А., Кураченко Н. Л., Кондакова М. С.</i> Морфогенетическая характеристика черноземов неиспользуемой пашни Канской лесостепи	56
<i>Казюлин Л. Ф., Кураченко Н. Л.</i> Гидротермический режим агрочернозема Красноярской лесостепи при применении удобрений	65
<i>Обыденных Е. В., Мячина О. В., Паишков А. Н., Парфенова Н. В., Чепрасова А. А.</i> Влияние условий освещенности и темноты на процессы адаптации у городских жителей	76
<i>Рагимов А. О., Чугай Н. В.</i> Влияние противогололедных реагентов на физико-химические свойства почв на территориях различной антропогенной нагрузки	86
<i>Смолянкин Д. А., Хмель А. О., Якупова Т. Г., Гизатуллина А. А., Хуснутдинова Н. Ю., Ретина Э. Ф., Рябова Ю. В., Каримов Д. О., Гимадиева А. Р.</i> Динамика показателей липидного обмена при хронической интоксикации тиацетамидом и на фоне коррекции у крыс	101
<i>Теймуров А. А., Астамирова М. А.-М., Тайсумов М. А.</i> Анализ видового состава семейства <i>Asteraceae</i> Bercht. & J. Presl во флоре Чеченской Республики	117
<i>Труш В. В., Соболев В. И.</i> Эффективность L-карнитина в компенсации электрофизиологических проявлений дексаметазон-индуцированной миопатии в экспериментах на животных	137

Информационная рубрика

<u>Антонина Сергеевна Алемасова (10.07.1953 – 20.03.2026)</u>	153
<u>Валерий Иванович Сторожев (03.07.1952 – 03.04.2026)</u>	155

CONTENTS

Mechanics

- Kaloerov S. A.* Complex potentials in the problem of plane bending of an anisotropic plate 3
Kaloerov S. A., Mironenko A. B. Precise solving of problems about plane bending of a plate with an elliptical hole or crack 14
Polianskii M. A. Solution to the electromagnetoelasticity problem for a multiconnected piezo-half-plane 23

Chemical sciences

- Kochetova L. B., Kustova T. P.* The effect of water-1,4-dioxane solvent on the kinetics of reactions of α -aminoacids with 4-nitrophenyl ester of acetic acid 33

Biological sciences

- Ivanov A. S., Deryugina A. V., Yastrebov P. V., Boyarinov G. A.* The effect of fish oil and ozonated fish oil on blood flow microcirculation parameters during modeled physical exercise 45
Ivanova T. A., Kurachenko N. L., Kondakova M. S. Morphogenetic characteristics of the chernozems of unused arable land in the Kansk forest-steppe 56
Kazyulin L. F., Kurachenko N. L. Hydrothermal regime of agrochernozem of the Krasnoyarsk forest-steppe under the application of fertilizers 65
Obydennykh E. V., Myachina O. V., Pashkov A. N., Parfenova N. V., Cheprasova A. A. The influence of light and dark conditions on adaptation processes of urban residents 76
Ragimov A. O., Chygai N. V. Influence of anti-ice reagents on physicochemical properties of soils in areas of various anthropogenic load 86
Smolyankin D. A., Khmel A. O., Yakupova T. G., Gizatullina A. A., Khusnutdinova N. Yu., Repina E. F., Ryabova Yu. V., Karimov D. O., Gimadieva A. R. Dynamics of lipid metabolism indicators in rats under chronic intoxication with thioacetamide and against the background of correction 101
Teimurov A. A., Astamirova M. A.-M., Taisumov M. A. An analysis of the *Asteraceae* Bercht. & J. Presl in the flora of the Chechen Republic 117
Trush V. V., Sobolev V. I. Effectiveness of L-carnitine in compensation of electrophysiological manifestations of dexamethasone-induced myopathy in experiments on animals 137

Information section

- Antonina Sergeevna Alemasova (10.07.1953 – 20.03.2026) 153
Valeriy Ivanovich Storozhev (03.07.1952 – 03.04.2026) 155

М Е Х А Н И К А



УДК 539.3

DOI: 10.5281/zenodo.19179345

EDN: EXZBPQ

**КОМПЛЕКСНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ЗАДАЧИ О ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ
АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНКИ**

© 2026. С. А. Калоеров

Для случая плоского изгиба анизотропной пластинки введены комплексные потенциалы, получены выражения через них напряжений и перемещений, граничные условия для их определения, общие представления функций для произвольной многосвязной пластинки. Найдены системы линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов квадратичных членов этих функций, представления входящих в них голоморфных функций в случае многосвязных пластин с произвольными отверстиями и трещинами. Даны формулы для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений.

Ключевые слова: плоский изгиб, комплексные потенциалы, анизотропная пластинка, отверстия и трещины, коэффициенты интенсивности напряжений.

Введение. Элементы большинства современных конструкций изготавливаются из прямолинейно анизотропных композиционных материалов. Зачастую они по техническим или эксплуатационным причинам имеют отверстия или трещины, около которых в процессе эксплуатации возникают высокие концентрации напряжений, которые могут приводить к их разрушению, что нужно учитывать при проектировании таких конструкций. В связи с этим нужно иметь надежные методы определения напряженно-деформированного состояния многосвязных анизотропных тел.

Первые решения задач теории упругости для анизотропного тела еще в середине XIX века были даны в работах Геринга Ф.Д. [1] и Буссенеска Ж.В. [2]. Но они не получили должного развития, и лишь 20-х годах XX века появились работы Губера М.Т. [3–5], где был сделан следующий шаг по решению таких задач. Начало же широкомасштабным исследованиям напряженно-деформированного состояния анизотропных тел положили работы Лехницкого С.Г. В 1937 г. Им была опубликована работа [6], где для плоской задачи были введены комплексные потенциалы теории упругости анизотропного тела, получено характеристическое уравнение для определения комплексных параметров задачи, доказана невещественность его корней, получены через комплексные потенциалы выражения напряжений и перемещений, найдены граничные условия для определения этих функций. Хотя в те же годы наряду с комплексными потенциалами решения задач для анизотропных тел Михлином С.Г. [7] и Шерманом Д.И. [8] проводились их сведением к решениям интегральных уравнений, но наиболее эффективным в этом отношении и до сих пор остается метод комплексных потенциалов Лехницкого С.Г. Во второй половине XX века этим методом были проведены различные исследования, опубликованные в многочисленных статьях, в монографиях, среди которых монографии Лехницкого С.Г. [9], Савина Г.Н. [10], Космодамианского А.С. [11].

В наших работах [12, 13] дан общий вид комплексных потенциалов для анизотропных пластин при наличии ряда трещин вдоль одной прямой, с выбором искомого функций с корневыми особенностями в концах прямолинейных разрезотрещин и определением голоморфных функций решением задач линейного сопряжения. В статье [14] для случая двумерной (следовательно, и плоской в частном

случае) задачи теории упругости многосвязного анизотропного тела с произвольно расположенными отверстиями и прямолинейными разрезами-трещинами, как частными случаями эллипсов, приведены общие представления комплексных потенциалов, разложенных в ряды Лорана с неизвестными коэффициентами, определяемыми из граничных условий на контурах отверстий и разрезов-трещин дискретным методом наименьших квадратов. Начиная со статьи [15], в наших работах, для определения неизвестных коэффициентов рядов используется обобщенный метод наименьших квадратов (ОМНК). Таким подходом к настоящему времени решено множество плоских задач для конечной и бесконечной многосвязной пластинки, полуплоскости и полосы с отверстиями и трещинами, в том числе с пересекающимися контурами (выемами и краевыми трещинами) с подробными исследованиями распределения в них напряжений. Аналогичные исследования проведены для антиплоской деформации и кручения анизотропных тел. В работе [16] получены общие представления комплексных потенциалов теории изгиба тонких анизотропных плит (пластин, под действием сил поперечного изгиба), указаны на ошибки в ранее полученных аналогичных представлениях для случая загрузки плиты по верхнему основанию [17, 18]. Для плоского изгиба пластинки, под которым будем понимать плоскую задачу при действии на пластинку линейно зависящих от координат усилий, общие представления комплексных потенциалов до сих пор не были получены.

В данной статье даны общие представления комплексных потенциалов для плоского изгиба многосвязной анизотропной пластинки. Для отличия основных соотношений для общепринятой плоской задачи и плоского изгиба использованы соответственно понятия «классической плоской задачи» и плоского изгиба пластинки.

Плоский изгиб анизотропной пластинки. Под плоским изгибом пластинки понимается напряженное состояние пластинки, возникающее от действия усилий, линейно зависящих от координат и приводящих к линейным напряжениям. Такое напряженное состояние возникает, например, в сплошной прямоугольной пластинке, загруженной нормальными усилиями $\sigma_x = py$ по сторонам, перпендикулярным к оси Ox прямоугольной системы координат Oxy с началом в центре прямоугольника и направлениями осей в направлениях его сторон, при свободных других сторонах (рис. 1) В этом случае во всей пластинке возникают напряжения [19]

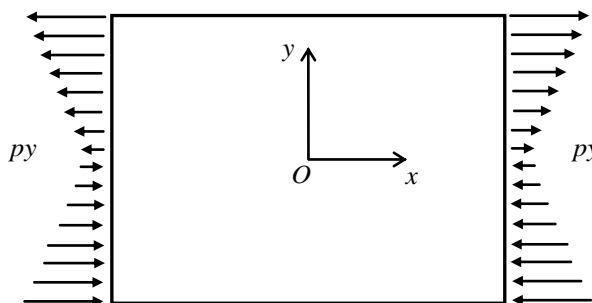


Рис. 1

$$\sigma_x = py, \quad \sigma_y = \tau_{xy} = 0. \quad (1)$$

В этом случае из уравнений обобщенного закона Гука получим выражения деформаций

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy} = a_{11}py, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy} = a_{12}py, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy} = a_{16}py, \end{aligned} \quad (2)$$

интегрированием которых найдем перемещения и угол поворота точек пластинки [19]

$$\begin{aligned} u &= a_{11}pxy + \frac{a_{16}P}{2}y^2 - \omega_3^0y + u_0, \\ v &= \frac{a_{12}P}{2}y^2 - \frac{a_{11}P}{2}x^2 + \omega_3^0x + v_0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} (-2a_{11}Px - a_{16}Py) + \omega_3^0. \quad (4)$$

Здесь u_0 , v_0 и ω_3^0 – постоянные, равные координатам поступательного перемещения и повороту всей пластинки, как целой.

Заметим, что приведенное нагружение пластинки означает ее изгиб моментом $M_x = py$ по сторонам, перпендикулярным к оси Ox (рис. 2).

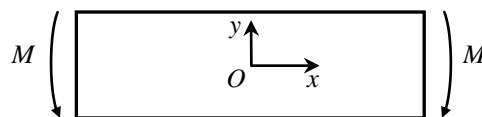


Рис. 2

Если рассмотренная прямоугольная пластинка одновременно нагружена и нормальными линейными усилиями $\sigma_y = qx$ по сторонам, перпендикулярным к оси Oy , то по аналогии с приведенным будем иметь

$$\sigma_x = py, \quad \sigma_y = qx, \quad \tau_{xy} = 0; \quad (5)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy} = a_{11}py + a_{12}qx,$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy} = a_{12}py + a_{22}qx,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy} = a_{16}py + a_{26}qx; \quad (6)$$

$$u = a_{11}pxy + \frac{a_{12}q}{2}x^2 + \frac{a_{16}P - a_{22}q}{2}y^2 - \omega_3^0y + u_0,$$

$$v = a_{22}qxy + \frac{a_{12}P}{2}y^2 + \frac{a_{26}q - a_{11}P}{2}x^2 + \omega_3^0x + v_0; \quad (7)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} ((a_{26}q - 2a_{11}P)x - (a_{16}P - 2a_{22}q)y) + \omega_3^0. \quad (8)$$

Легко получить общие выражения деформаций, перемещений и угла поворота для самого общего случая, когда на сторонах пластинки, кроме нормальных напряжений σ_x , σ_y , действуют касательные напряжения $\tau_{xy} = \tau$.

Но такие простые решения задачи о плоском изгибе пластинки получаются только в случае сплошной пластинки. При наличии же отверстий и трещин достаточно простые решения получаются при использовании комплексных потенциалов.

Комплексные потенциалы для плоского изгиба пластинки можно ввести и использовать таким же образом, как при решении аналогичных задач «классической плоской задачи». Поэтому, прежде чем переходить к комплексным потенциалам плоского изгиба, приведем основные соотношения для этих функций в случае «классической плоской задачи».

Основные соотношения для комплексных потенциалов «классической плоской задачи» теории упругости анизотропного тела. Если задачу теории упругости о напряженном состоянии анизотропной пластинки для различных способов

ее нагружения, кроме плоского изгиба, решать с помощью комплексных потенциалов Лехницкого С.Г. [7, 8], то ее решение сводится к определению из соответствующих граничных условий функций $\Phi_k(z_k)$ ($k = \overline{1, 2}$) обобщенных комплексных переменных

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (9)$$

где μ_k – корни характеристического уравнения

$$a_{11}\mu^4 - 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0, \quad (10)$$

a_{12} – коэффициенты деформаций материала пластинки. Причем в силу вещественности коэффициентов этого уравнения его корни не могут быть вещественными [7], являются комплексными и попарно сопряженными. Обозначим их через $\mu_1, \mu_2, \bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2$ и будем считать их неравными.

Если комплексные потенциалы определены, то в любой точке пластинки можно найти напряжения, перемещения и угол поворота

$$(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (\mu_k^2, 1, -\mu_k) \Phi'_k(z_k), \quad (11)$$

$$(u, v) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k) \Phi_k(z_k) + (-\omega_3^0 y + u_0, \omega_3^0 x + v_0), \quad (12)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (q_k - \mu_k p_k) \Phi'_k(z_k) + \omega_3^0, \quad (13)$$

где

$$p_k = a_{11}\mu_k^2 + a_{12} - a_{16}\mu_k, \quad q_k = a_{12}\mu_k + \frac{a_{22}}{\mu_k} - a_{26}. \quad (14)$$

На границах области функции $\Phi_k(z_k)$ должны удовлетворять определенным граничным условиям. Так, если на границе области заданы внешние усилия с компонентами X_n, Y_n (первая основная задача), то эти условия имеют вид

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (1, -\mu_k) \Phi_k(z_k) = \mp \int_0^s (Y_n, X_n) ds + (c_1, c_2), \quad (15)$$

где c_1, c_2 – произвольные постоянные, которые для одного из контуров можно полагать равными нулю. Если на границе заданы перемещения $u = u^*, v = v^*$ (вторая основная задача), то граничные условия будут такими:

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k) \Phi_k(z_k) = (u^* - \omega_3 y - u_0, v^* + \omega_3 x - v_0). \quad (16)$$

Условия (15) и (16) можно записать и в виде

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (g_{1k}, g_{2k}) \Phi_k(z_k) = (f_1(t), f_2(t)), \quad (17)$$

в котором для первой основной задачи

$$g_{1k} = 1, \quad g_{2k} = -\mu_k,$$

$$f_1(t) = \mp \int_0^s Y_n ds + c_1, \quad f_2(t) = \mp \int_0^s X_n ds + c_2, \quad (18)$$

в случае второй основной задачи

$$g_{1k} = p_k, \quad g_{2k} = q_k,$$

$$f_1(t) = u^* - \omega_3 y - u_0, \quad f_2(t) = v^* + \omega_3 x - v_0. \quad (19)$$

Пусть две пластинки с областями S и $S^{(l)}$ находятся между собой в идеальном упругом контакте так, что точки их соприкосновения перемещаются совместно. Например, пусть в отверстие пластинки-матрицы S без предварительного натяжения вклеено или впаяно упругое включение с областью $S^{(l)}$ из другого материала. В точках контура сая L действие включения на матрицу характеризуются усилиями X_n, Y_n , а действие матрицы на включение – усилиями $X_n^{(l)}, Y_n^{(l)}$ (рис. 3). Из условий равновесия следует, что эти усилия равны по величине и противоположны по знаку. Кроме того, для точек контакта перемещения u, v пластинки и перемещения $u^{(l)}, v^{(l)}$ включения равны друг другу, т. е.

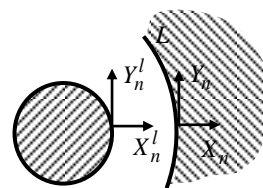


Рис. 3

$$X_n = -X_n^{(l)}, \quad Y_n = -Y_n^{(l)}, \quad u = u^{(l)}, \quad v = v^{(l)}. \quad (20)$$

Учитывая формулы (15) и (16), условия (20) запишем в виде 4-х равенств

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left[(1, -\mu_k, p_k, q_k) \Phi_k(z_k) - (1, -\mu_k^{(l)}, p_k^{(l)}, q_k^{(l)}) \Phi_k^{(l)}(z_k^{(l)}) \right] = (c_{11}, c_{12}, 0, 0). \quad (21)$$

При этом $\Phi_k^{(l)}(z_k^{(l)})$ – функции обобщенных комплексных переменных

$$z_k^{(l)} = x + \mu_k^{(l)} y, \quad (22)$$

где $\mu_k^{(l)}$ – корни характеристического уравнения

$$a_{11}^{(l)} \mu^4 - 2a_{16}^{(l)} \mu^3 + (2a_{12}^{(l)} + a_{66}^{(l)}) \mu^2 - a_{26}^{(l)} \mu + a_{22}^{(l)} = 0; \quad (23)$$

$a_{ij}^{(l)}$ – коэффициенты деформации включения с областью $S^{(l)}$;

$$p_k^{(l)} = a_{11}^{(l)} \mu_k^{(l)2} + a_{12}^{(l)} - a_{16}^{(l)} \mu_k^{(l)},$$

$$q_k^{(l)} = a_{12}^{(l)} \mu_k^{(l)} + \frac{a_{22}^{(l)}}{\mu_k^{(l)}} - a_{26}^{(l)}; \quad (24)$$

c_{li} – постоянные, произвольные для контакта пластинки S с одной из включений с областью $S^{(l)}$, если последних пластин более одной.

При записи первых двух равенств (21) учтено, что контур спая для пластинки является внутренним, для ядра – внешним, поэтому в правых частях (21) для них выбраны противоположные знаки; при записи вторых двух равенств (21) учтено, что жесткие перемещения (поступательные перемещения и угол жесткого поворота) для пластинки и ядра в силу их идеального контакта одинаковы.

Если пластинка занимает многосвязную область S , ограниченную внешним контуром L_0 и контурами L_l ($l = \overline{1, \mathcal{L}}$) эллиптических отверстий (в частном случае трещин) с полуосями a_l, b_l , так что в локальных системах координат $O_l x_l y_l$ с началами в центрах эллипсов L_l и направлениями осей вдоль осей эллипсов (рис. 4) их параметрические уравнения имеют вид

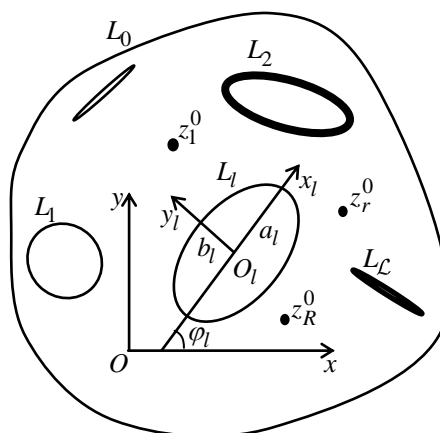


Рис. 4

$$x_l = a_l \cos \theta, \quad y_l = b_l \cos \theta, \quad (25)$$

а в основной системе координат Oxy будут такими:

$$\begin{aligned} x &= x_{0l} + x_l \cos \varphi_l - y_l \sin \varphi_l, \\ y &= y_{0l} + x_l \sin \varphi_l + y_l \cos \varphi_l, \end{aligned} \quad (26)$$

где θ – параметр параметрического задания эллипса, изменяющийся от 0 до 2π ; x_{0l}, y_{0l} – координаты начал локальных систем координат $O_l x_l y_l$ в основной системе координат Oxy ; φ_l – угол между направлениями осей Ox и $O_l x_l$, отсчитываемый от Ox против часовой стрелки, на контурах отверстий действуют внешние усилия с главными векторами (X_l, Y_l) , во внутренних точках z_r^0 ($r = \overline{1, R}$) области S действуют сосредоточенные силы $P_r^0(X_r^0, Y_r^0)$, то комплексные потенциалы имеют вид [14]

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_k z_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} A_{kl} \ln(z_k - z_{kl}) + \sum_{r=1}^R A_{kr}^0 \ln(z_k - z_{kr}^0) + \sum_{l=g}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} a_{kln} \varphi_{kln}(z_k), \quad (27)$$

в котором Γ_k – постоянные, определяемые решением системы уравнений

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(\mu_k^2, 1, -\mu_k, q_k - \mu_k p_k \right) \Gamma_k = \left(\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty, 2\omega_3^\infty \right) \quad (28)$$

или

$$\begin{aligned} & 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \right) \Gamma_k = \\ & = \left(\sigma_y^\infty, -\tau_{xy}^\infty, \sigma_x^\infty, \frac{2\omega_3^\infty + 3a_{26}\sigma_y^\infty + (2a_{12} + a_{66})\tau_{xy}^\infty + a_{16}\sigma_x^\infty}{2a_{22}} \right), \end{aligned} \quad (29)$$

где σ_x^∞ , σ_y^∞ , τ_{xy}^∞ и ω_3^∞ – значения соответствующих напряжений и угла поворота на бесконечности; A_{kl} , A_{kr}^0 – постоянные, определяемые решениями систем линейных уравнений

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \right) i A_{kl} = \left(\frac{Y_l}{2\pi}, -\frac{X_l}{2\pi}, -\frac{a_{12}}{a_{11}} \frac{Y_l}{2\pi} - \frac{a_{16}}{a_{11}} \frac{X_l}{2\pi}, \frac{a_{26}}{a_{22}} \frac{Y_l}{2\pi} + \frac{a_{12}}{a_{22}} \frac{X_l}{2\pi} \right); \quad (30)$$

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \right) i A_{kr}^0 = \left(\frac{Y_r^0}{2\pi}, -\frac{X_r^0}{2\pi}, -\frac{a_{16}}{a_{11}} \frac{X_r^0}{2\pi} - \frac{a_{12}}{a_{11}} \frac{Y_r^0}{2\pi}, \frac{a_{26}}{a_{22}} \frac{Y_r^0}{2\pi} + \frac{a_{12}}{a_{22}} \frac{X_r^0}{2\pi} \right); \quad (31)$$

$\Phi_{kln}(z_k)$ – функции вида [14, 20]

$$\Phi_{k0n}(z_k) = \left(\frac{z_k - z_{k0}}{R_{k0}} \right)^n, \quad \Phi_{kln}(z_k) = \frac{1}{\zeta_{kl}^n} \quad (l = \overline{1, \mathcal{L}}); \quad (32)$$

ζ_{kl} – переменные, определяемые из конформных отображений внешностей единичных кругов $|\zeta_{kl}| \geq 1$ на внешности контуров отверстий L_{kl} [14]

$$z_k = z_{kl} + R_{kl} \left(\zeta_{kl} + \frac{m_{kl}}{\zeta_{kl}} \right); \quad (33)$$

$$z_{kl} = x_{0l} + \mu_k y_{0l},$$

$$R_{kl} = \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) + i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2},$$

$$m_{kl} = \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) - i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2 R_{kl}}; \quad (34)$$

a_{kln} – неизвестные коэффициенты рядов, которые определяются из граничных условий на контурах области L_l ($l = \overline{0, \mathcal{L}}$).

Соотношения (28) получены из условий того, что в окрестности бесконечно удаленной точки напряжения постоянны, поэтому в этой окрестности

$$\Phi'_k(z_k) = \Gamma_k + o(1/z_k), \quad (35)$$

а равенства (30), (31) следуют из условий однозначности напряжений и перемещений.

Основные соотношения для комплексных потенциалов плоского изгиба многосвязной анизотропной пластинки. Под плоским изгибом многосвязной пластинки будем понимать изгиб пластинки по внешнему контуру L_0 усилиями, линейно зависящими от координат, или изгиб бесконечной пластинки (когда внешний контур отсутствует) такими усилиями на бесконечности. В первом случае в представлениях комплексных потенциалов (когда $\Gamma_k = 0$) ничего не изменится, во втором нужно учитывать особенности распределения напряжений в окрестности бесконечно удаленной точки.

В случае плоского изгиба бесконечной многосвязной пластинки в окрестности бесконечно удаленной точки напряжения и деформации, следовательно, и производные

комплексных потенциалов $\Phi'_k(z_k)$ являются линейными функциями координат. Поэтому сами комплексные потенциалы должны быть квадратичными функциями и в общем случае они без учета логарифмических слагаемых выражений (27) имеют вид

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_{2k} z_k^2 + \Gamma_k z_k + \sum_{l=g}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} a_{kln} \varphi_{kln}(z_k), \quad (36)$$

где Γ_{2k}, Γ_k – постоянные, которые определяются из условий на бесконечности, где для $\Phi'_k(z_k)$ имеют место представления

$$\Phi'_k(z_k) = 2\Gamma_{2k} z_k + \Gamma_k + o(1/z_k)$$

и комбинации $2\Gamma_{2k} z_k + \Gamma_k$ на основе (29), где вместо Γ_k нужно взять $2\Gamma_{2k} z_k + \Gamma_k$ и учесть выражения напряжений (5) и угла поворота (8), должны удовлетворять условиям

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \right) (2\Gamma_{2k} z_k + \Gamma_k) = \left(qx, 0, py, \frac{(2a_{26}q - a_{11}p)x + a_{22}qy}{a_{22}} \right). \quad (37)$$

Учитывая, что $z_k = x + \mu_k y$ и приравнявая в этом соотношении слева и справа коэффициенты при x, y и свободные члены, получим системы для определения Γ_{2k} и Γ_k . Для определения Γ_k получается однородная система линейных алгебраических уравнений, из которой следует, что $\Gamma_k = 0$. Для Γ_{2k} на основе равенств (37) получаются система

$$\begin{aligned} 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \Gamma_{2k} &= q, & 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k \Gamma_{2k} &= 0, \\ 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k^2 \Gamma_{2k} &= 0, & 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\mu_k} \Gamma_{2k} &= \frac{2a_{26}q - a_{11}p}{a_{22}} \end{aligned} \quad (38)$$

из сравнения коэффициентов при x и система

$$\begin{aligned} 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k \Gamma_{2k} &= 0, & 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k^2 \Gamma_{2k} &= 0, \\ 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k^3 \Gamma_{2k} &= p, & 4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \Gamma_{2k} &= q \end{aligned} \quad (39)$$

из сравнения коэффициентов при y .

Из характеристического уравнения (10) имеем

$$\mu_k^3 - \frac{2a_{16}}{a_{11}} \mu_k^2 + \frac{(2a_{12} + a_{66})}{a_{11}} \mu_k - \frac{2a_{26}}{a_{11}} = -\frac{a_{22}}{a_{11} \mu_k}.$$

Учитывая это равенство и равенства (38), (39) для различных комбинаций Γ_{2k} , легко установить, что четвертое уравнение систем (38) и третье уравнение системы (39) совпадают (остальные уравнения этих систем одинаковы). Поэтому коэффициенты Γ_{2k} можно найти, решая систему (38) или систему (39).

Следовательно, для случая плоского изгиба бесконечной многосвязной пластинки с эллиптическими отверстиями комплексные потенциалы имеют вид

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_{2k} z_k^2 + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} A_{kl} \ln(z_k - z_{kl}) + \sum_{r=1}^R A_{kr}^0 \ln(z_k - z_{kr}^0) + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} a_{kln} \varphi_{kln}(z_k), \quad (40)$$

где Γ_{2k} – постоянные, определяемые решением системы уравнений (38) или (39). После определения этих коэффициентов, а из систем (30), (31) также коэффициентов A_{kl} , A_{kr}^0 , а затем из граничных условий на контурах отверстий и трещин и коэффициентов рядов a_{kln} можно в любой точке по формулам (11) найти основные напряжения, а по ним и нормальные и касательные напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \cos^2(nx) + \sigma_y \cos^2(ny) + 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \sigma_s &= \sigma_x \cos^2(ny) + \sigma_y \cos^2(nx) - 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \tau_{ns} &= (\sigma_y - \sigma_x) \cos(nx) \cos(ny) + \tau_{xy} (\cos^2(nx) - \cos^2(ny)) \end{aligned} \quad (41)$$

на любых площадках с нормалью n и касательной s . Если некоторый эллипс L_l является прямолинейным разрезом, то в его концов можно определить и коэффициенты интенсивности напряжений (КИН), используя формулы [21]

$$\begin{aligned} k_1^{\pm} &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left[\mu_k^2 \sin^2 \varphi_l + \cos^2 \varphi_l + 2\mu_k \sin \varphi_l \cos \varphi_l \right] M_{kl}, \\ k_2^{\pm} &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left[(1 - \mu_k^2) \cos \varphi_l \sin \varphi_l - \mu_k (\cos^2 \varphi_l - \sin^2 \varphi_l) \right] M_{kl}, \end{aligned} \quad (42)$$

где

$$M_{kl} = \mp \frac{\sqrt{a_l}}{2R_{kl}} \sum_{n=1}^{\infty} (\pm 1)^n n a_{kln}. \quad (43)$$

Здесь верхние знаки соответствуют к правому концу разреза в локальной системе координат $O_l x_l y_l$, нижний – к его левому концу.

Выводы. Таким образом, получен общий вид комплексных потенциалов плоской задачи об изгибе анизотропной пластинки с отверстиями и трещинами. В отличие от обычной «классической плоской задачи», эти функции содержат слагаемыми квадратичные члены, коэффициенты которых определяются через интенсивности напряжений на бесконечности. Используя эти представления и методы конформных отображений, можно решать различные задачи об изгибе конечных и бесконечных пластинок с отверстиями и трещинами, полуплоскости и полосы с отверстиями, трещинами и выемами.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (шифр FRRE-2026-0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gehring, F. De aequationibus differentialibus quibus aequilibrium et motus laminae crystallinae definiuntur. Ph.D. dissertation. – Berlin, 1860. – 32 p.

2. Boussinesque, J.V. Compliments a une etude sur la theorie de lequilibre et du mouvement des solides elastiques // *Journal de mathématiques pures et appliquées*. – 1879. – Ser. 3, Vol. 5. – P. 163-194, 329-344.
3. Huber, M.T. Teoria płyt prostokątne-różnokierunkowych wraz z technicznymi zastosowaniami do płyt betonowych, krat belkowych itp. – Lwów: Милитария Towarzystwa Naukowego, 1921. – 249 s.
4. Huber, M.T. Einige Anwendungen der Biegungstheorie orthotroper Platten // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. – 1926. – Bd. 6. – P. 228–231.
5. Huber, M.T. Probleme der statik technisch wichtiger orthotropen platten: gastvorlesungen in der eidgenössischen technischen hochschule zürich. – Warschau, 1929. – 165 p.
6. Лехницкий, С.Г. Плоская статическая задача теории упругости анизотропного тела // *Прикладная математика и механика*. Отдел технических наук. – 1937. – Т. 1, вып. 1. – С. 77-90.
7. Михлин, С.Г. Плоская деформация в анизотропной среде // *Труды Сейсмологического института*. – 1936. – № 76. – С. 1-19.
8. Шерман, Д.И. К решению плоской задачи теории упругости для анизотропной среды // *Прикладная математика и механика*. Отдел технических наук. – 1942. – Т. 6, вып. 6. – С. 509-515.
9. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
10. Савин, Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – К.: Наук. думка, 1968. – 888 с.
11. Космодамианский, А.С. Напряженное состояние анизотропных сред с отверстиями или полостями. – Киев-Донецк: Вища шк., 1976. – 200 с.
12. Калоеров, С.А. Напряженное состояние многосвязной анизотропной пластинки с трещинами // *Теоретическая и прикладная механика*. – 1983. – Вып. 14. – С. 25-33.
13. Калоеров, С.А. Комплексные потенциалы плоской задачи теории упругости для многосвязного тела с трещинами // *Теоретическая и прикладная механика*. – 1990. – Вып. 21. – С. 24-34.
14. Калоеров, С.А. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами / С.А. Калоеров, Е.С. Горянская // *Теоретическая и прикладная механика*. – 1995. – Вып. 25. – С. 45-56.
15. Калоеров, С.А. Термовязкоупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки / С.А. Калоеров, О.А. Паршикова // *Прикладная механика*. – 2012. – Т. 48, вып. 3. – С. 103-116.
16. Калоеров, С.А. Комплексные потенциалы теории изгиба многосвязных анизотропных плит // *Теоретическая и прикладная механика*. – 2012. – Вып. 4 (50). – С. 113-132.
17. Меглинский, В.В. Изгиб анизотропной эллиптической плиты с эллиптическим отверстием, подкрепленным жестким кольцом // *Некоторые задачи теории упругости о концентрации напряжений и деформации упругих тел*. – 1964. – Вып. 1. – С. 98-101.
18. Меглинский, В.В. Некоторые задачи изгиба тонких многосвязных анизотропных плит // *Некоторые задачи теории упругости о концентрации напряжений и деформации упругих тел*. – 1967. – Вып. 3. – С. 97-127.
19. Калоеров, С.А. Основы математической теории упругости и некоторые классы ее задач. – 2-е издание. – Донецк: Издат. дом «Эдит», 2025. – 212 с.
20. Космодамианский, А.С. Температурные напряжения в многосвязных пластинках / А.С. Космодамианский, С.А. Калоеров. – Киев-Донецк: Вища шк., 1983. – 160 с.
21. Калоеров, С.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений, индукции и напряженности для многосвязных сред // *Прикладная механика*. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 56-62.

REFERENCES

1. Gehring, F. (1860) *De aequationibus differentialibus quibus aequilibrium et motus laminae crystallinae definiuntur*. Ph. D. dissertation. Berlin. 32 p. (In German).
2. Boussinesque, J.V. (1879) [Compliments a une etude sur la theorie de lequilibre et du mouvement des solides elastiques] // *Journal de mathématiques pures et appliquees*. 3 (5), 163-194, 329-344. (In France).
3. Huber, M.T. (1921) [*Teoria płyt prostokątne-roznokierunkowych wraz z technicznymi zastosowaniami do płyt betonowych, krat belkowych itp*]. Lwow: Militaria Towarzystwa Naukowego. 249 p. (In Polish).
4. Huber, M.T. (1926) [Einige Anwendungen der Biegungstheorie orthotroper Platten] // *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*. 6, 228-231. (In German).
5. Huber, M.T. (1929) [Probleme der statik technisch wichtiger orthotropen platten: gastvorlesungen in der eidgenossischen technischen hochschule zurich]. Warsw. 165 p. (In German).
6. Lekhnitskii, S.G. (1937) [Plane static problem of theory elasticity of an anisotropic body]. *Applied mathematics and mechanics. Department of technical sciences*. 1 (1), 77-90. (In Russian).
7. Mikhlin, S.G. (1936) [Flat deformation in an anisotropic medium]. *Proceedings of the Seismological Institute*. 76, 1-19. (In Russian).

8. Sherman, D.I. (1942) [Solution of a plane elasticity problem for an anisotropic medium]. *Applied mathematics and mechanics. Department of technical sciences.* 6 (6), 509-515. (In Russian).
9. Lekhnitskii, S.G. (1977) *Theory of elasticity of an anisotropic body.* Moscow: Nauka. 416 p. (In Russian).
10. Savin, G.N. (1968) *Stress distribution around holes.* Kiev: Naukova Dumka. 888 p. (In Russian).
11. Kosmodamianskii, A.S. (1976) *Stressed state of anisotropic media with holes or cavities.* Kiev-Donetsk: Vyshcha Shkola. 200 p. (In Russian).
12. Kaloerov, S.A. (1983) [Stress state of a multiply connected anisotropic plate with cracks]. *Journal of theoretical and applied mechanics.* 14, 25-33. (In Russian).
13. Kaloerov, S.A. (1990) [Complex potentials of a plane elasticity problem for a multiply connected body with cracks]. *Journal of theoretical and applied mechanics.* 21, 24-34. (In Russian).
14. Kaloerov, S.A. & Goryanskaya, E.S. (1995) [Two-dimensional stress state of a multiply connected anisotropic body with cavities and cracks]. *Journal of theoretical and applied mechanics.* 25, 45-56. (In Russian).
15. Kaloerov, S.A. & Parshikova, O.A. (2012) Thermoviscoelastic state of multiply connected anisotropic plate. *International Applied Mechanics.* 48 (3), 103-116.
16. Kaloerov, S.A. (2012) Complex potentials of the theory of bending for multiply connected anisotropic plates. *Journal of theoretical and applied mechanics.* 4 (50), 113-132. (In Russian).
17. Meglinsky, V.V. (1964) [Bending of an anisotropic elliptical plate with an elliptical hole reinforced by a rigid ring]. *Some problems of elasticity theory on stress concentration and deformation of elastic bodies.* 1, 98-101. (In Russian)
18. Meglinsky, V.V. (1967) [Some problems of bending thin multiply connected anisotropic plates] *Some problems of elasticity theory on stress concentration and deformation of elastic bodies.* 3, 97-127. (In Russian)
19. Kaloerov, S.A. (2025) [Fundamentals of mathematical theory of elasticity and some classes of its problems]. 2nd ed. Donetsk: Publishing house "Edit". 212 p. (In Russian).
20. Kosmodamianskii, A.S. & Kaloerov, S.A. (1983) [Temperature stresses in multiply connected plates]. Kiev-Donetsk: Vyshcha Shkola. 160 p. (In Russian).
21. Kaloerov, S.A. (2007) Determining the intensity factors for stresses, electric-flux density, and electric-field strength in multiply connected electroelastic anisotropic media. *International Applied Mechanics.* 43 (6), 631-637.

COMPLEX POTENTIALS IN THE PROBLEM OF PLANE BENDING OF AN ANISOTROPIC PLATE

S. A. Kaloerov

For the case of plane bending of an anisotropic plate, complex potentials are introduced, expressions of stresses and displacements through them are obtained, boundary conditions for their determination, and general representations of functions for an arbitrary multiply connected plate. Systems of linear algebraic equations are found to determine the coefficients of the quadratic terms of these functions and to represent the holomorphic functions included in them in the case of multiply connected plates with arbitrary holes and cracks. Formulas for calculating stress intensity coefficients are given.

Keywords: plane bending, complex potentials, anisotropic plate, holes and cracks, stress intensity coefficients.

Поступила в редакцию 20.01.2026 г.

Калоеров Стефан Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теории упругости
и вычислительной математики им. акад.
А.С. Космодамианского, ФГБОУ ВО «Донецкий
государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: kaloerov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1339-6035
SPIN-код: 8113-1310
AuthorID: 1049003

Kaloerov Stefan Alekseevich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,
Full Professor,
Professor of the Department of Elasticity Theory and
Computational Mathematics,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ ПЛАСТИНКИ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЕМ ИЛИ ТРЕЩИНОЙ

© 2026. С. А. Калоеров, А. Б. Мироненко

Получено точное аналитическое решение задачи о плоском изгибе анизотропной пластинки с эллиптическим отверстием или трещиной. При этом для решения задачи использованы комплексные потенциалы плоского изгиба пластинки, методы конформных отображений, разложений функций в ряды Лорана и метод рядов для определения неизвестных коэффициентов рядов. Получены точные выражения для комплексных потенциалов, напряжений, коэффициентов интенсивности напряжений. Описаны результаты численных исследований, которыми установлены закономерности изменения напряженного состояния пластинки в зависимости от геометрических характеристик отверстия и физико-механических свойств материала.

Ключевые слова: плоский изгиб, комплексные потенциалы, анизотропная пластинка, отверстия, трещины, коэффициенты интенсивности напряжений.

Введение. Элементы многих конструкций современной техники изготавливаются из прямолинейно-анизотропных композиционных материалов. По различным конструкционным потребностям или эксплуатационным причинам они могут иметь отверстия или трещины, около которых в процессе эксплуатации конструкций возникают высокие концентрации напряжений, которые могут приводить к их разрушению, что нужно учитывать при их проектировании. В связи с этим нужно иметь эффективные методы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) многосвязных анизотропных тел. Такими методами в настоящее время являются методы решения плоской задачи теории упругости анизотропного тела, использующие комплексные потенциалы.

Комплексные потенциалы плоской задачи теории упругости анизотропного тела были введены Лехницким С.Г. [1] еще в 1937 году и вскоре получили широкое применение для исследований напряженно-деформированного состояния пластин в случае односвязных [2] и многосвязных [3, 4] пластин. С использованием этих же функций в наших работах методами интегралов типа Коши и рядов были решены различные задачи для многосвязной полуплоскости [5], полосы [6] и прямоугольника [7]. Но применение метода рядов для решения задач в случае многосвязных сред не приводит к достаточно приемлемым результатам. Здесь наиболее оптимальные решения получаются при использовании дискретного метода наименьших квадратов [8] или обобщенного метода наименьших квадратов [9]. А точными решениями могут быть только решения, полученные для односвязных (конечных или бесконечных) пластин с эллиптическими (в частных случаях круговыми или линейными) контурами.

В данной статье такое точное решение приводится для плоского изгиба бесконечной пластинки с отверстием или прямолинейным разрезом. Получены выражения комплексных потенциалов, содержащие по одному квадратичному члену лорановского разложения функций, выражения для напряжений и КИН. Описаны результаты численных исследований, связанные с закономерностями изменения напряженного состояния в зависимости от геометрических характеристик отверстия и физико-механических свойств материала пластинки.

Комплексные потенциалы задачи. Рассмотрим отнесенную к прямоугольной системе координат Oxy бесконечную анизотропную пластинку с эллиптическим

отверстием L_1 , полуосями a_1, b_1 , центром в начале координат (рис. 1) и углом наклона φ_1 полуоси a_1 к оси Ox . Выберем, кроме того, локальную систему координат Ox_1y_1 с осью Ox_1 вдоль полуоси a_1 . Тогда уравнения L_1 в локальной и основной системах координат имеют вид

$$x = a_1 \cos \theta, \quad y = b_1 \sin \theta, \quad (1)$$

$$x = x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1,$$

$$y = x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1, \quad (2)$$

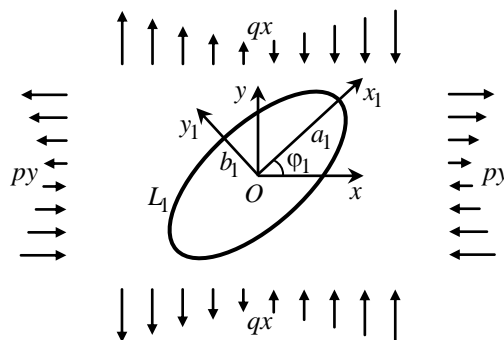


Рис. 1

где θ – параметр параметрического задания эллипса, изменяющийся от 0 до 2π . На бесконечности пластинка находится под действием усилий $\sigma_x^\infty = py, \sigma_y^\infty = -qx$, линейно зависящих от координат и приводящих к ее плоскому изгибу. Последнее условие на загрузку равносильно действию на бесконечности момента $M(0, 0, -py^2 - qx^2)$.

Если определение напряженно-деформированного состояния рассматриваемой пластинки проводить с использованием комплексных потенциалов плоского изгиба [10], то оно сводится к нахождению функций $\Phi_k(z_k)$ ($k = 1, 2$) обобщенных комплексных переменных

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (3)$$

где μ_k – корни характеристического уравнения [2]

$$a_{11}\mu^4 - 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0, \quad (4)$$

a_{ij} – коэффициенты деформации материала пластинки.

Комплексные потенциалы $\Phi_k(z_k)$ определены в областях S_k , получаемых из заданной бесконечной области S , ограниченной контуром L_1 . Исходя из общих представлений этих функций [10], $\Phi_k(z_k)$ в данном случае можно представить в виде

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_{2k} z_k^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{k1n}}{\zeta_{k1}^n}, \quad (5)$$

в котором Γ_{2k} – постоянные, вычисляемые из системы линейных уравнений

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \right) \Gamma_{2k} = \left(q, 0, 0, \frac{2a_{26}q - a_{11}p}{a_{22}} \right); \quad (6)$$

ζ_{k1} – переменные, определяемые из конформных отображений [8]

$$z_k = R_{k1} \left(\zeta_{k1} + \frac{m_{k1}}{\zeta_{k1}} \right) \quad (7)$$

внешностей единичных кругов $|\zeta_{k1}| \geq 1$ на внешности контуров L_{k1} областей S_k , соответствующих области S при аффинных преобразованиях (3);

$$R_{k1} = \frac{a_1 (\cos \varphi_1 + \mu_k \sin \varphi_1) + ib_1 (\sin \varphi_1 - \mu_k \cos \varphi_1)}{2},$$

$$m_{k1} = \frac{a_1 (\cos \varphi_1 + \mu_k \sin \varphi_1) - ib_1 (\sin \varphi_1 - \mu_k \cos \varphi_1)}{2R_{k1}}; \quad (8)$$

a_{k1n} – неизвестные коэффициенты рядов, которые определим из граничных условий на контуре отверстия L_1 [8]

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (g_{1k}, g_{2k}) \Phi_k(z_k) = (0, 0), \quad (9)$$

где для первой основной задачи

$$g_{1k} = 1, \quad g_{2k} = -\mu_k, \quad (10)$$

в случае второй основной задачи

$$g_{1k} = p_k, \quad g_{2k} = q_k, \quad (11)$$

$$p_k = a_{11}\mu_k^2 + a_{12} - a_{16}\mu_k, \quad q_k = a_{12}\mu_k + \frac{a_{22}}{\mu_k} - a_{26}. \quad (12)$$

Учитывая равенства

$$\cos \theta + i \sin \theta = e^{i\theta} = \sigma, \quad \bar{\sigma} = e^{-i\theta} = \frac{1}{\sigma},$$

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left(\sigma + \frac{1}{\sigma} \right), \quad \sin \theta = -\frac{i}{2} \left(\sigma - \frac{1}{\sigma} \right),$$

и что на контуре L_1

$$\zeta_{k1} = \sigma, \quad \bar{\zeta}_{k1} = \frac{1}{\sigma}, \quad z_k = R_{k1} \left(\sigma + \frac{m_{k1}}{\sigma} \right), \quad z_k^2 = R_{k1}^2 \left(\sigma^2 + \frac{m_{k1}^2}{\sigma^2} \right) + 2R_{k1}m_{k1}$$

и подставляя функции (5) в граничные условия (9), получим

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left((g_{1k}, g_{2k}) \frac{a_{k1n}}{\sigma^n} + (\bar{g}_{1k}, \bar{g}_{2k}) \overline{a_{k1n}} \sigma^n \right) =$$

$$= - \sum_{k=1}^2 \left[(g_{1k}, g_{2k}) \Gamma_{2k} R_{k1}^2 \left(\sigma^2 + \frac{m_{k1}^2}{\sigma^2} \right) + \right.$$

$$\left. + (\bar{g}_{1k}, \bar{g}_{2k}) \overline{\Gamma_{2k}} \overline{R_{k1}^2} \left(\frac{1}{\sigma^2} + \overline{m_{k1}^2} \sigma^2 \right) \right] + const. \quad (13)$$

Приравнивая в равенствах (13) коэффициенты при одинаковых ненулевых степенях произвольного параметра σ , приходим к равенствам $a_{k1n} = 0$ при $n \neq 2$ и системе линейных уравнений

$$\sum_{k=1}^2 g_{1k} a_{k12} = - \sum_{k=1}^2 \left(g_{1k} \Gamma_{2k} R_{k1}^2 m_{k1}^2 + \overline{g_{1k}} \overline{\Gamma_{2k}} \overline{R_{k1}^2} \right),$$

$$\sum_{k=1}^2 g_{2k} a_{k12} = - \sum_{k=1}^2 \left(g_{2k} \Gamma_{2k} R_{k1}^2 m_{k1}^2 + \overline{g_{2k}} \overline{\Gamma_{2k}} \overline{R_{k1}^2} \right),$$

которую можно записать и в виде

$$g_{1k} a_{k12} + g_{1k+1} a_{k+1,12} = - \sum_{j=1}^2 \left(g_{1j} \Gamma_{2j} R_{j1}^2 m_{j1}^2 + \overline{g_{1j}} \overline{\Gamma_{2j}} \overline{R_{j1}^2} \right),$$

$$g_{2,k} a_{k12} + g_{2,k+1} a_{k+1,12} = - \sum_{j=1}^2 \left(g_{2,j} \Gamma_{2j} R_{j1}^2 m_{j1}^2 + \overline{g_{2,j}} \overline{\Gamma_{2j}} \overline{R_{j1}^2} \right). \quad (14)$$

При этом k – индекс, принимающий значения 1 и 2, причем значение индекса $k + 1$ при $k = 2$ формально считается равным 1.

Решая систему уравнений (14), найдем

$$a_{k12} = - \frac{1}{g_{1k+1} g_{2,k} - g_{2,k+1} g_{1k}} \sum_{j=1}^2 \left[g_{1k+1} \left(g_{2,j} \Gamma_{2j} R_{j1}^2 m_{j1}^2 + \overline{g_{2,j}} \overline{\Gamma_{2j}} \overline{R_{j1}^2} \right) - g_{2,k+1} \left(g_{1j} \Gamma_{2j} R_{j1}^2 m_{j1}^2 + \overline{g_{1j}} \overline{\Gamma_{2j}} \overline{R_{j1}^2} \right) \right]. \quad (15)$$

Тогда функции (5) и их производные будут такими:

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_{2k} z_k^2 + \frac{a_{k12}}{\zeta_{k1}^2},$$

$$\Phi'_k(z_k) = 2\Gamma_{2k} z_k - \frac{2a_{k12}}{R_{k1} \zeta_{k1} (\zeta_{k1}^2 - m_{k1})}. \quad (16)$$

Учитывая выражения (16), для напряжений и перемещений находим

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

$$= 4 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (\mu_k^2, 1, -\mu_k) \left[\Gamma_{2k} z_k - \frac{a_{k12}}{R_{k1} \zeta_{k1} (\zeta_{k1}^2 - m_{k1})} \right]; \quad (17)$$

$$(u, v) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k) \Phi_k(z_k) = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k) \left[\Gamma_{2k} z_k^2 + \frac{a_{k12}}{\zeta_{k1}^2} \right]. \quad (18)$$

Здесь учтено, что

$$\frac{d\zeta_{k1}}{dz_k} = \frac{\zeta_{k1}^2}{R_{k1} (\zeta_{k1}^2 - m_{k1})}.$$

По основным напряжениям (17) можно найти также нормальные и касательные напряжения [2, 3, 11]

$$\begin{aligned}
 \sigma_n &= \sigma_x \cos^2(nx) + \sigma_y \cos^2(ny) + 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\
 \sigma_s &= \sigma_x \cos^2(ny) + \sigma_y \cos^2(nx) - 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\
 \tau_{ns} &= (\sigma_y - \sigma_x) \cos(nx) \cos(ny) + \tau_{xy} (\cos^2(nx) - \cos^2(ny))
 \end{aligned} \quad (19)$$

на любых площадках с нормалью n и касательной s . Для этих направлений можно найти и деформации

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_n &= \varepsilon_x \cos^2(nx) + \varepsilon_y \cos^2(ny) + \gamma_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\
 \varepsilon_s &= \varepsilon_x \cos^2(ny) + \varepsilon_y \cos^2(nx) - \gamma_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\
 \gamma_{ns} &= 2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cos(nx) \cos(ny) + \gamma_{xy} (\cos^2(nx) - \sin^2(ny)),
 \end{aligned} \quad (20)$$

в которых ε_x , ε_y , γ_{xy} – соответствующие деформации для основных направлений, вычисляемые по известным напряжениям на основе уравнений закона Гука

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy}, \\
 \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy}, \\
 \gamma_{xy} &= a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}.
 \end{aligned} \quad (21)$$

При этом, если эллипс L_1 переходит в прямолинейный разрез, то для его концов можно определять и коэффициенты интенсивности напряжений (КИН), используя формулы [12]

$$\begin{aligned}
 k_1^\pm &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left[\mu_k^2 \sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1 + 2\mu_k \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \right] M_{k1}, \\
 k_2^\pm &= 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left[(1 - \mu_k^2) \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 - \mu_k (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1) \right] M_{k1},
 \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$M_{k1} = \mp \frac{\sqrt{a_1}}{R_{k1}} a_{k12}, \quad (23)$$

верхние и нижние знаки относятся к правому и левому концам разреза.

Численные исследования. Проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния для пластинки из изотропного материала М1 и материала М2, обладающего «сильной» анизотропией. Для этих материалов технические постоянные такие [13]:

для М1: $E_1 = 71000 \text{ МПа}$, $E_2 = 71000,5 \text{ МПа}$, $G_{12} = 28400 \text{ МПа}$, $\nu_{21} = 0,25$;

для М2: $E_1 = 188800 \text{ МПа}$, $E_2 = 6000 \text{ МПа}$, $G_{12} = 2700 \text{ МПа}$, $\nu_{21} = 0,3$.

По этим техническим постоянным находятся коэффициенты деформации материалов

$$a_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad a_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad a_{12} = a_{21} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad a_{66} = \frac{1}{G_1}. \quad (24)$$

Пусть рассмотренная выше пластинка с эллиптическим отверстием изгибается

на бесконечности усилиями $\sigma_x^\infty = py$ (моментом $M(0, 0, -py^2)$) (рис. 2). В этом случае в приведенном решении нужно принять $q = 0$.

На рис. 3 для пластинки из М1 с круговым отверстием для некоторых значений угла φ_1 в зависимости от центрального угла θ , отсчитываемого от оси Ox против часовой стрелки, приведены графики распределения напряжений σ_s около контура отверстия L_1 на площадках, перпендикулярных к радиусу отверстия. На рис. 4 такие же графики изображены для пластинки из М2.

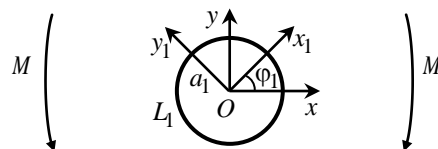


Рис. 2

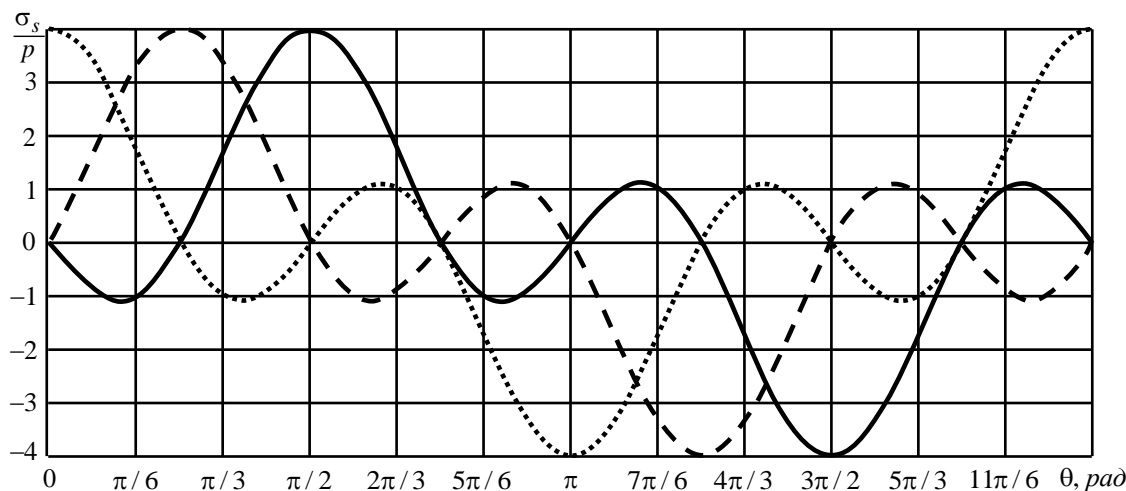


Рис. 3. Графики распределения σ_s около контура кругового отверстия в пластинке из М1 при $\varphi_1 = 0$ (сплошная линия), $\varphi_1 = \pi/4$ (штриховая линии) и $\varphi_1 = \pi/2$ (пунктирная линия)

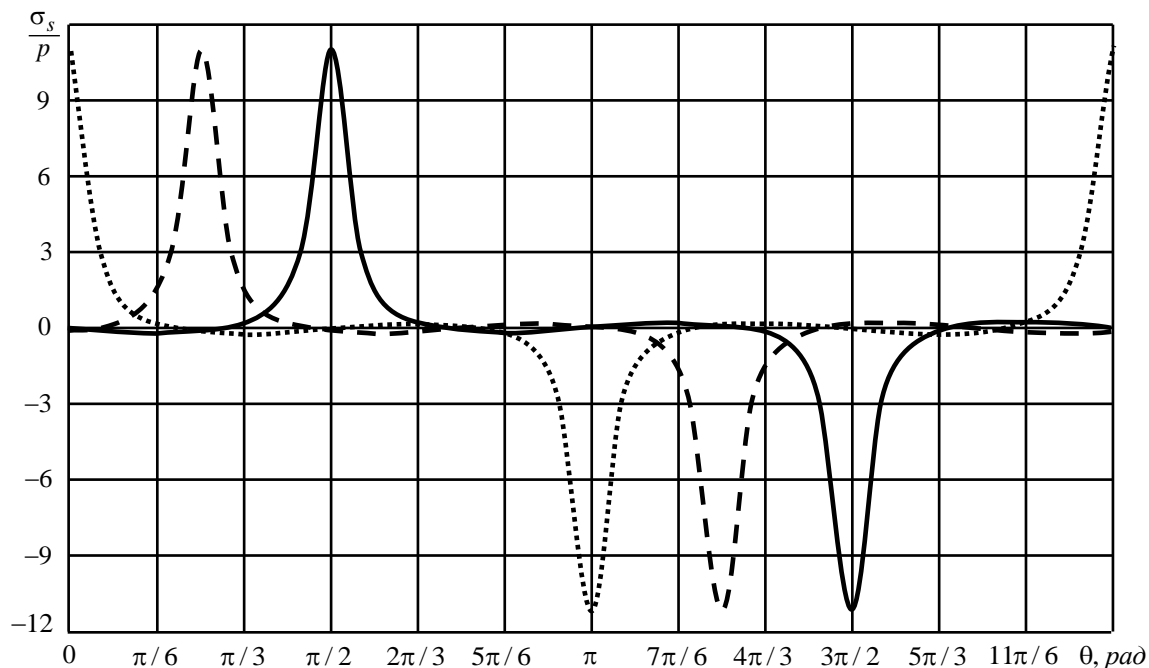


Рис. 4. Графики распределения напряжений σ_s около контура кругового отверстия в пластинке из М2 при $\varphi_1 = 0$ (сплошная линия), $\varphi_1 = \pi/4$ (штриховые линии) и $\varphi_1 = \pi/2$ (пунктирная линия)

Как видно из этих рисунков, при $\varphi_1 = 0$ в точках пластинки с круговым отверстием z и \bar{z} (симметричных относительно оси Ox) значения напряжений равны по величине и противоположны по знаку, в точках z и $-\bar{z}$ (симметричных относительно оси Oy) эти напряжения одинаковы. Это полностью согласуется с постановкой самой задачи о плоском изгибе пластинки при наличии соответствующей геометрической симметрии. Для других значений угла φ_1 в случае изотропной пластинки такая закономерность сохраняется относительно диаметра по углу φ_1 , для анизотропной пластинки с круговым отверстием указанная закономерность сохраняется.

Проведены численные исследования распределения напряжений и для случая жесткого подкрепления контура отверстия. Как следует из результатов этих исследований, подкрепление контура отверстия значительно снижает уровень концентрации напряжений около контура отверстия, причем, как и в других типах плоской задачи, для точек контура между нормальными напряжениями σ_n и σ_s на соответствующих площадках сохраняется связь $\sigma_s = \nu_{21}\sigma_n$, где ν_{21} – коэффициент Пуассона.

Как показывают расчеты, при $b_1/a_1 \rightarrow 0$ значения напряжений вблизи концов полуоси a_1 растут, стремясь к бесконечности, и при $b_1/a_1 \leq 10^{-4}$ эллипс можно считать прямолинейной трещиной (жестким линейным включением) длины $2a_1$ и вычислять для ее концов КИН.

Для случая изгиба моментом $M(0, 0, -py^2)$ пластинки с трещиной или линейным жестким включением (рис. 5) в таблице для материала М1 в зависимости от угла наклона φ_1 приведены значения КИН для правого конца трещины или жесткого линейного включения. В силу линейной зависимости напряжений от координат для левого конца эти значения такие же с противоположным знаком.

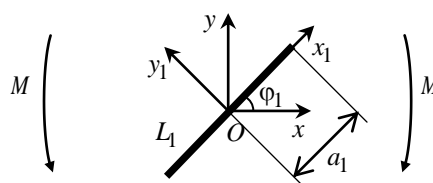


Рис. 5

Как видно, в пластинке с трещиной с ростом φ_1 от 0 до $\pi/2$ значения k_1^\pm растут от 0 до 1, значения k_2^\pm сначала растут по модулю, затем убывают. Заметим, что k_1^\pm все время положителен, k_2^\pm отрицателен, что согласуется с физическим смыслом плоского изгиба пластинки: при $y > 0$ происходит растяжение, при $y < 0$ – сжатие. Жесткое подкрепление уменьшает и значения КИН.

Таблица

Значения КИН для правого конца трещины или жесткого линейного включения

Случай	КИН	φ_1 , рад.						
		0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
Трещина	k_1^\pm	0	0,0173	0,1250	0,3536	0,6495	0,9012	1
	k_2^\pm	0	-0,0647	-0,2165	-0,3536	-0,3750	-0,2415	0
Включение	k_1^\pm	0	-0,0517	-0,0750	-0,0579	-0,0118	0,0350	0,0545
	k_2^\pm	-0,2182	-0,2284	-0,2480	-0,2507	-0,2114	-0,1223	0

Выводы. Таким образом, в статье приведено точное решение задачи о плоском изгибе пластинки с эллиптическим отверстием или трещиной. Решение построено с использованием комплексных потенциалов плоского изгиба анизотропной пластинки, разложений функций в ряды Лорана и использованием метода рядов для определения коэффициентов рядов из граничных условий задачи. Приведены формулы для вычисления напряжений, деформаций, перемещений и КИН. Для пластинки с круговым отверстием или прямолинейной трещиной с центрами в начале координат описаны закономерности распределения напряжений и изменения КИН в зависимости от угла наклона φ_1 . Как видно из решения, установленные закономерности несколько изменятся при других геометрических характеристиках и месте расположения отверстия и трещины. Жесткое подкрепление контура отверстия или трещины приводит к значительному уменьшению значений напряжений и КИН.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (шифр FRRE-2026-0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехницкий, С.Г. Плоская статическая задача теории упругости анизотропного тела // Прикладная математика и механика. Отдел технических наук. – 1937. – Т. 1, вып. 1. – С. 77-90.
2. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
3. Савин, Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – К.: Наук. думка, 1968. – 888 с.
4. Космодамианский, А.С. Напряженное состояние анизотропных сред с отверстиями или полостями. – Киев-Донецк: Вища шк., 1976. – 200 с.
5. Калоеров, С.А. Напряженное состояние анизотропной полуплоскости с конечным числом эллиптических отверстий // Прикладная механика. – 1966. – Т. 2, № 10. – С. 75-82.
6. Калоеров, С.А. Метод последовательных приближений для анизотропной полосы с эллиптическим отверстием // Прикладная механика. – 1977. – Т. 13, вып. 9. – С. 73-79.
7. Калоеров, С.А. Напряженное состояние прямоугольной ортотропной пластинки с эллиптическим отверстием // Теоретическая и прикладная механика. – 1979. – Вып. 10. – С. 14-18.
8. Калоеров, С.А. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами / С.А. Калоеров, Е.С. Горянская // Теоретическая и прикладная механика. – 1995. – № 25. – С. 45-56.
9. Калоеров, С.А. Термовязкоупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки / С.А. Калоеров, О.А. Паршикова // Прикладная механика. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 103-116.
10. Калоеров, С.А. Комплексные потенциалы задачи о плоском изгибе анизотропной пластинки // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2026. – № 1. – С. 3-13. – EDN: EXZBPQ. – DOI: 10.5281/zenodo.19179345.
11. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
12. Калоеров, С.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений, индукции и напряженности для многосвязных сред // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 56-62.
13. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

REFERENCES

1. Lekhnitskii, S.G. (1937) [Plane static problem of theory elasticity of an anisotropic body]. *Applied mathematics and mechanics. Department of technical sciences.* 1 (1), 77-90. (In Russian).
2. Lekhnitskii, S.G. (1977) *Theory of elasticity of an anisotropic body.* Moscow: Nauka. 416 p. (In Russian).
3. Savin, G.N. (1968) *Stress distribution around holes.* Kiev: Naukova Dumka. 888 p. (In Russian).
4. Kosmodamianskii, A.S. (1976) *Stressed state of anisotropic media with holes or cavities.* Kiev-Donetsk: Vyshcha Shkola. 200 p. (In Russian).
5. Kaloerov, S.A. (1966) Stress state of an anisotropic half-plane with a finite number of elliptic holes. *Soviet Applied Mechanics.* 2 (10), 75-82.
6. Kaloerov, S.A. (1977) Successive approximation of an anisotropic strip with an elliptical hole. *Soviet Applied Mechanics.* 13 (9), 909-914.

7. Kaloerov, S.A. (1979) [Stress state of a rectangular orthotropic plate with an elliptical hole]. *Journal of theoretical and applied mechanics*. 10, 14-18. (In Russian).
8. Kaloerov, S.A. & Goryanskaya, E.S. (1995) [Two-dimensional stress state of a multiply connected anisotropic body with cavities and cracks]. *Journal of theoretical and applied mechanics*. 25, 45-56. (In Russian).
9. Kaloerov, S.A. & Parshikova, O.A. (2012) Thermoviscoelastic state of multiply connected anisotropic plate. *International Applied Mechanics*. 48 (3), 103-116.
10. Kaloerov, S.A. (2026) [Complex potentials in the problem of plane bending of an anisotropic plate]. *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural sciences*. 1, 3-13. (In Russian).
11. Muskhelishvili N.I. (1966) *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. Moscow: Nauka. 708 p. (In Russian)
12. Kaloerov, S.A. (2007) Determining the intensity factors for stresses, electric-flux density, and electric-field strength in multiply connected electroelastic anisotropic media. *International Applied Mechanics*. 43 (6), 631-637.
13. Vasiliev V.V. & Protasov V.D. & Bolotin V.V., et al. (1990) *Composite Materials. Reference Book*. In Vasiliev V.V. & Tarnopolskii Yu.M. (eds.) Moscow: Mashinostroenie. 512 p. (in Russian).

PRECISE SOLVING OF PROBLEMS ABOUT PLANE BENDING OF A PLATE WITH AN ELLIPTICAL HOLE OR CRACK

S. A. Kaloerov, A. B. Mironenko

Precise analytical solution of the problem of plane bending of an anisotropic plate with an elliptical hole or crack has been obtained. To solve the problem, complex potentials of plate plane bending, methods of conformal mappings, expansions of functions into Laurent series, and the method of series for determining unknown series coefficients are used. Accurate expressions for complex potentials, stresses, and stress intensity factors have been obtained. The results of numerical studies are described, which establish the patterns of changes in the plate's stress state depending on the geometric characteristics of the hole and the physical and mechanical properties of the material.

Keywords: plane bending, complex potentials, anisotropic plate, holes, cracks, stress intensity coefficients.

Поступила в редакцию 31.01.2026 г.

Калоеров Стефан Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теории упругости
и вычислительной математики им. акад.
А.С. Космодамианского, ФГБОУ ВО «Донецкий
государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: kaloerov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1339-6035
SPIN-код: 8113-1310
AuthorID: 1049003

Kaloerov Stefan Alekseevich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,
Full Professor,
Professor of the Department of Elasticity Theory and
Computational Mathematics,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Мироненко Андрей Борисович

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: a.b.mironenko@mail.ru
ORCID: 0009-0002-1824-0136
SPIN-код: 8730-1244
AuthorID: 1183689

Mironenko Andrey Borisovich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Elasticity
Theory and Computational Mathematics,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГОСТИ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНОЙ ПЬЕЗОПОЛУПЛОСКОСТИ

© 2026. М. А. Полянский

Дано решение задачи электромагнитоупругости для пьезополуплоскости с эллиптическими отверстиями, которые независимо друг от друга могут переходить в прямолинейные разрезы, пересекать друг друга и прямолинейную границу, образуя выемки у границы полуплоскости. Решение построено с использованием комплексных потенциалов электромагнитоупругости. При этом функции, голоморфные вне отверстий, представлены рядами Лорана, соответствующими (после конформных отображений) заданным эллипсам, тогда как функции, голоморфные в нижних полуплоскостях, разложены в ряды Лорана, соответствующие воображаемым эллипсам верхних полуплоскостей, симметричным заданным эллипсам относительно границы полуплоскости. Определение неизвестных коэффициентов рядов Лорана сведено к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений, получаемой из граничных условий на контурах отверстий и на границе полуплоскости, и решаемой методом обобщенных наименьших квадратов. Приведены результаты численных исследований для полуплоскости с круговым отверстием (неподкрепленным или жестко подкрепленным контуром), в том числе выходящим на прямолинейную границу и образующим выем, для полуплоскости с отверстием и трещиной в перемычке, выходящим на контур отверстия и на границу полуплоскости. Изучены закономерности распределения напряжений в зависимости от геометрических характеристик рассматриваемых сред и физико-механических свойств их материалов.

Ключевые слова: электромагнитоупругость, полуплоскость, отверстия, комплексные потенциалы, обобщенный метод наименьших квадратов.

Введение. Пьезопластики с отверстиями и трещинами широко применяются в составе различных конструктивных элементов современной техники [1–4]. Под воздействием внешних механических нагрузок и электромагнитных полей в окрестностях таких отверстий и трещин возникают значительные концентрации напряжений, что требует учета при проектировании изделий. Наиболее достоверные данные по электромагнитоупругому состоянию (ЭМУС) пластин с отверстиями и трещинами получаются при решении задач методами, основанными на комплексных потенциалах электромагнитоупругости [5]. В случае моделирования пластины как полуплоскости эффективным способом строгого выполнения граничных условий на прямолинейной границе является применение интегралов типа Коши [6, 7], что обеспечивает их точное выполнение. Для удовлетворения граничных условий на контурах отверстий и трещин удобнее использовать обобщенный метод наименьших квадратов (ОМНК) [8–10], обеспечивающий высокую точность удовлетворения граничных условий. Вместе с тем применение интегралов Коши при удовлетворении граничным условиям на прямолинейной границе приводит к громоздким выражениям для функций, голоморфных в соответствующих нижних полуплоскостях. Но можно и граничным условиям на прямолинейной границе граничные условия удовлетворять ОМНК, что упрощает форму комплексных потенциалов [11]. В настоящей статье задача электромагнитоупругости для многосвязной полуплоскости с отверстиями и трещинами решена именно указанным подходом. Приведены результаты численных исследований для полуплоскости с круговым отверстием или выемкой, а также для конфигураций полуплоскости с круговым отверстием и трещиной, распложенной во внутренней области или выходящей на контур отверстия, на прямолинейную границу или на оба контура.

Постановка и решение задачи. Рассмотрим полубесконечную пьезопластинку, занимающую многосвязную область S с прямолинейной границей L^+ и контурами эллиптических отверстий L_l ($l = \overline{1, \mathcal{L}}$) с полуосями a_l, b_l (рис. 1). Отнесем пластинку к прямоугольной системе координат Oxy с началом в произвольной точке полуплоскости на расстоянии h^+ от границы L^+ и осью Ox , параллельной прямолинейной границе. Будем считать, что прямолинейная граница не нагружена, каждый из контуров отверстий не нагружен внешними воздействиями или жестко подкреплён, на бесконечности заданы напряжения σ_x^∞ и проекции векторов индукций D_x^∞, B_x^∞ , остальные напряжения, индукции и угол жесткого поворота полуплоскости, как целой, равны нулю, т. е. $\sigma_y^\infty = \tau_{xy}^\infty = D_y^\infty = B_y^\infty = \omega_3^\infty = 0$.

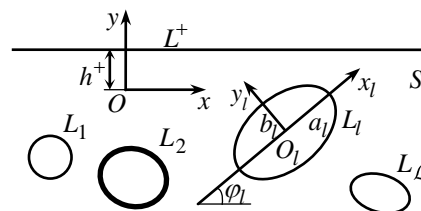


Рис. 1

Отнесем эллипсы L_l к локальным системам координат $O_l x_l y_l$ с началами в их центрах и направлениями осей $O_l x_l$ вдоль полуосей эллипсов a_l , так что в системе $O_l x_l y_l$ параметрические уравнения L_l имеют вид

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

а в основной системе Oxy будут такими:

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

где θ – параметр параметрического задания эллипса, изменяющийся от 0 до 2π ; x_{0l}, y_{0l} – координаты начала локальной системы координат $O_l x_l y_l$ в основной системе Oxy ; φ_l – угол между направлениями осей Ox и $O_l x_l$, отсчитываемый от оси Ox против часовой стрелки.

Если задачу об определении электромагнитоупругого состояния (ЭМУС) рассматриваемой полуплоскости решать методом комплексных потенциалов обобщенных комплексных переменных

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (3)$$

где μ_k – корни известного характеристического уравнения, то она сводится к нахождению функций $\Phi_k(z_k)$ из граничных условий на контурах (прямолинейной границы и контуров отверстий)

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ik} \Phi_k(t_k) = f_{il}(t) \quad (i = \overline{1, 4}), \quad (4)$$

в которых

$$\begin{aligned} g_{ik} &= (1, \mu_k, -\nu_k, -\rho_k), \\ (f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)) &= \mp \int_0^s (Y_n, X_n, D_n, B_n) ds + (c_1, c_2, c_3, c_4), \end{aligned} \quad (5)$$

если на контуре заданы (в том числе равные нулю) внешние усилия X_n, Y_n и индукции D_n, B_n ,

$$g_{ik} = (p_{k0}, q_{k0}, -v_k, -\rho_k),$$

$$(f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)) = \left(u^*, v^*, \mp \int_0^s (D_n, B_n) ds \right) + (c_1, c_2, c_3, c_4), \quad (6)$$

когда на контуре заданы перемещения u^*, v^* и индукции D_n, B_n ;

$$p_k = \mu_k^2 s_{11} - s_{16} \mu_k + (g_{11} \mu_k - g_{21}) v_k + (p_{11} \mu_k - p_{21}) \rho_k,$$

$$q_k = \frac{s_{22}}{\mu_k} - s_{26} + \left(g_{12} - \frac{g_{22}}{\mu_k} \right) v_k + \left(p_{12} - \frac{p_{22}}{\mu_k} \right) \rho_k; \quad (7)$$

s_{ij} – коэффициенты деформации материала пластинки, измеренные при постоянных индукциях электрического и магнитного полей; g_{ki} и p_{ki} – пьезоэлектрические и пьезомагнитные коэффициенты деформации и напряженностей электрического и магнитного полей, измеренные при постоянных напряжениях и индукциях; v_k, ρ_k – постоянные, которые выражаются через g_{ki}, p_{ki} , а также через коэффициенты диэлектрической, магнитной и электромагнитной восприимчивости, измеренные при постоянных значениях напряжений [5]; c_i – постоянные, произвольные на одном из контуров области S .

Функции $\Phi_k(z_k)$ определены и голоморфны в областях S_k , получаемых из заданной области S аффинными преобразованиями (3) и ограниченных прямолинейными границами L_k^+ и контурами L_{kl} , соответствующими заданным контурам L^+ и L_l при этих преобразованиях. Исходя из общих представлений комплексных потенциалов [5], в рассматриваемом случае эти функции можно представить в виде

$$\Phi_k(z_k) = \Gamma_k z_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{kln} \Phi_{kln}(z_k) + b_{kln} \Phi_{kln}^+(z_k) \right], \quad (8)$$

в котором Γ_k – постоянные, которые находятся решением системы линейных алгебраических уравнений

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left\{ 1, \mu_k, \mu_k^2, \frac{1}{\mu_k} \left[1 - \frac{v_k}{s_{22}} \left(g_{22} - \frac{2g_{12} + g_{26}}{2} \mu_k + \frac{g_{16}}{2} \mu_k^2 \right) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{\rho_k}{s_{22}} \left(p_{22} - \frac{2p_{12} + p_{26}}{2} \mu_k + \frac{p_{16}}{2} \mu_k^2 \right) \right], v_k, \mu_k v_k, \rho_k, \mu_k \rho_k \right\} \Gamma_k =$$

$$= \left\{ 0, 0, \sigma_x^\infty, \frac{s_{16} \sigma_x^\infty}{2s_{22}}, 0, D_x^\infty, 0, B_x^\infty \right\}; \quad (9)$$

$$\varphi_{kln}(z_k) = \frac{1}{\zeta_{kl}^n}, \quad \varphi_{kln}^+(z_k) = \frac{1}{(\zeta_{kl}^+)^n};$$

ζ_{kl} – переменные, определяемые из конформных отображений [12]

$$\begin{aligned} z_k &= z_{kl} + R_{kl} \left(\zeta_{kl} + \frac{m_{kl}}{\zeta_{kl}} \right), \\ z_{kl} &= x_{0l} + \mu_k y_{0l}, \\ R_{kl} &= \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) + ib_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2}, \\ m_{kl} &= \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) - ib_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2R_{kl}}; \end{aligned} \quad (10)$$

внешности единичных кругов $|\zeta_{kl}| \geq 1$ на внешности контуров L_{kl} ; ζ_{kl}^+ – переменные, определяемые из конформных отображений

$$z_k = \overline{z_{kl}} - (\overline{\mu_k} - \mu_k) h^+ + \overline{R_{kl}} \left(\zeta_{kl}^+ + \frac{\overline{m_{kl}}}{\zeta_{kl}^+} \right) \quad (11)$$

внешностей единичных кругов $|\zeta_{kl}^+| \geq 1$ на внешности контуров L_{kl}^+ верхней (относительно границы L_k^+) полуплоскости S_k^+ , симметричных относительно прямолинейных границ L_k^+ контурам L_{kl} ; a_{kln} , b_{kln} – неизвестные коэффициенты рядов, которые определим из граничных условий на прямолинейной границе L^+ и на контурах отверстий L_l ($l = \overline{1, \mathcal{L}}$). Для многосвязных областей эти условия удобнее использовать в дифференциальной форме, которая не будет содержать указанные выше комплексные постоянные c_l . При дифференцировании по дугам контуров области на основе (4) эти условия примут вид

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ik} \delta_{k,s} \Phi'_k(t_k) = \frac{df_i(t)}{ds}, \quad (12)$$

где $\delta_{k,s} = \frac{dt_k}{ds} = \frac{x' + \mu_k y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}$; x' , y' – производные переменных (2) по параметру θ

параметрического задания эллипсов; s – длина дуги контура, обходимого против часовой стрелки, причем для прямолинейной границы L^+ , где $f_i(t) = 0$ и производная

$\delta_{k,s} = 1$, правая часть уравнений $\frac{df_i(t)}{ds} = 0$;

$$\Phi'_k(z_k) = \Gamma_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\varphi'_{kln}(z_k) a_{kln} + \varphi'^+_{kln}(z_k) b_{kln} \right]; \quad (13)$$

$$\varphi'_{kln}(z_k) = -\frac{n}{\zeta_{kl}^{n-1} R_{kl} (\zeta_{kl}^2 - m_{kl})},$$

$$\varphi'^+_{kln}(z_k) = -\frac{n}{(\zeta_{kl}^+)^{n-1} \overline{R_{kl}} \left((\zeta_{kl}^+)^2 - \overline{m_{kl}} \right)}. \quad (14)$$

Граничным условиям (12) будем удовлетворять обобщенным методом наименьших квадратов [8–10]. Для этого выберем на прямолинейной границе и контурах отверстий заданной области S систему точек $M_m(x_m, y_m)$ ($m = \overline{1, M}$), в которых удовлетворим соответствующим граничным условиям, подставив в них функции (8). Тогда для определения неизвестных постоянных a_{kln} и b_{kln} получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} g_{ik} \delta_{k,s} \left[\varphi'_{kln}(t_{km}) a_{kln} + \varphi'_{kln}{}^+(t_{km}) b_{kln} \right] = -2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ik} \delta_{k,s} \Gamma_k \quad (i = \overline{1, 4}; m = \overline{1, M}). \quad (15)$$

Систему (15) будем решать методом сингулярного разложения [13, 14]. После нахождения псевдорешений этой системы производные комплексных потенциалов $\Phi'_k(z_k)$ станут известными. По ним можно вычислять основные характеристики ЭМУС (напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, индукции D_x, D_y, B_x, B_y , и напряженности E_x, E_y, H_x, H_y электрического и магнитного полей) [5]

$$(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k^2, 1, -\mu_k) \Phi'_k(z_k); \quad (16)$$

$$(D_x, D_y, E_x, E_y) = 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (v_k \mu_k, -v_k, r_k, \mu_k r_k) \Phi'_k(z_k); \quad (17)$$

$$(B_x, B_y, H_x, H_y) = 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\rho_k \mu_k, -\rho_k, h_k, \mu_k h_k) \Phi'_k(z_k). \quad (18)$$

Зная основные характеристики, можно найти также напряжения и индукции на произвольных площадках с нормалью n и касательной s по формулам [15, 16]

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \cos^2(nx) + \sigma_y \cos^2(ny) + 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \sigma_s &= \sigma_x \cos^2(ny) + \sigma_y \cos^2(nx) - 2\tau_{xy} \cos(nx) \cos(ny), \\ \tau_{ns} &= (\sigma_y - \sigma_x) \cos(nx) + \tau_{xy} (\cos^2(nx) - \cos^2(ny)), \\ D_n &= D_x \cos(nx) + D_y \cos(ny), \\ B_n &= B_x \cos(nx) + B_y \cos(ny); \end{aligned} \quad (19)$$

При этом, если некоторый эллипс L_l переходит в прямолинейный разрез-трещину, то для его концов можно вычислить также коэффициенты интенсивности напряжений, индукций и напряженностей (КИНИН) по формулам [17]

$$\begin{aligned} k_1^\pm &= 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left[\mu_k^2 \sin^2 \varphi_l + \cos^2 \varphi_l + 2\mu_k \sin \varphi_l \cos \varphi_l \right] M_{kl}, \\ k_2^\pm &= 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left[(1 - \mu_k^2) \cos \varphi_l \sin \varphi_l - \mu_k (\cos^2 \varphi_l - \sin^2 \varphi_l) \right] M_{kl}, \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$M_{kl} = -\frac{\sqrt{a_l}}{2R_{kl}} \sum_{n=1}^{\infty} (\pm 1)^n n a_{kln}. \quad (21)$$

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

Описание результатов численных исследований. Проведены численные исследования ЭМУС пьезополуплоскости из следующих материалов: композит на основе $BaTiO_3 - CoFe_2O_4$ (материал М1) [18, 19]; композит, упругие и электрические постоянные которого соответствуют селениду кадмия $CdSe$, а пьезомагнитные и магнитные – $BaTiO_3$ (М2) [20]; композит, упругие, пьезоэлектрические и электрические постоянные которого соответствуют $PZT-4$, а пьезомагнитные и магнитные – $CoFe_2O_4$ – (М3) [20]. Ниже описаны результаты численных исследований для полуплоскости из материала М3. Соответствующие значения основных характеристик ЭМУС в случае полуплоскости из М1 и М2 носят такой же характер, как для полуплоскости из М3.

При проведении численных исследований количество членов в рядах (13) для каждого отверстия L_p и количество точек M_p на этом контуре, для которых составлялись уравнения (15), увеличивалось до тех пор, пока граничные условия на контурах не удовлетворялись с достаточно высокой степенью точности (пока значения напряжений и индукций на площадках, касательных к контурам ($\sigma_n, \tau_{ns}, D_n, B_n$), не были менее 10^{-3} , а соответствующих деформаций ($\varepsilon_n, \gamma_{ns}$) не менее 10^{-10}). В описываемых ниже случаях для такого удовлетворения граничным условиям необходимо было в указанных рядах оставлять от 10 до 100 членов, и на каждом из контуров и на отрезке длины 2 диаметра отверстия брать от 100 до 1000 «коллокационных точек».

В табл. 1 для растяжения усилиями $\sigma_x^\infty = p$ полуплоскости из материала М3 с круговым отверстием с контуром L_1 и радиусом a_1 (рис. 2), с точностью до множителя p приведены значения напряжений в некоторых характерных точках полуплоскости в зависимости от отношения c/a_1 , где c – длина перемычки между контуром отверстия и прямолинейной границей. При этом характерными были точки $A(0, -a_1)$, $B(a_1, 0)$, $C(0, a_1)$, $D(0, a_1 + c/2)$, $E(0, a_1 + c)$, $L(a_1, a_1 + c)$, $M(2a_1, a_1 + c)$.

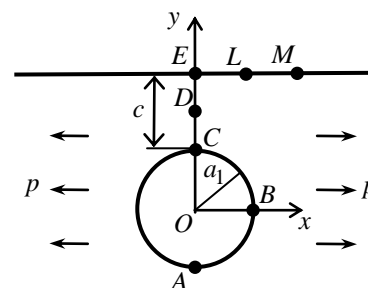


Рис. 2

Отрицательным значениям c/a_1 соответствуют случаи полуплоскости с выемом. Так, в случае $c/a_1 = -1$ глубина этого выема равна a_1 .

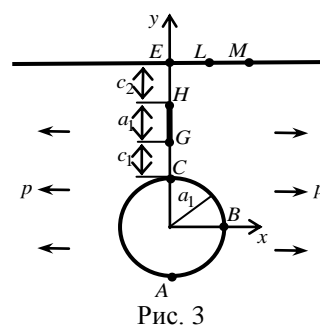
Как следует из табл. 1, с приближением отверстия к прямолинейной границе полуплоскости происходит резкое увеличение значений напряжений около контура отверстия и в зоне между отверстием и прямолинейной границей, за исключением весьма малой окрестности точки перемычки на прямолинейной границе, где эти напряжения и их изменения невелики. В случае же жестко подкрепленного отверстия, при приближении отверстия к прямолинейной границе происходит резкое снижение

значений напряжений около контура отверстия. В случае же, когда отверстие выходит на прямолинейную границу, наблюдаем увеличение значений напряжений около контура отверстия, а на прямолинейной границе возникают отрицательные значения напряжений – область сжатия; если на прямолинейную границу выходит отверстие с жестко подкрепленным контуром, то изменения значений напряжений незначительны как по контуру, так и по прямолинейной границе. В точках высокой концентрации напряжений велика и доля пьезосвойств на значения напряжений.

Таблица 1
Значения напряжений в точках полуплоскости с круговым отверстием

Точка	Величина	$c \setminus a_1$									
		∞	2	1	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,5	-1
С неподкрепленным контуром											
A	σ_x	3,133	3,246	3,352	3,484	3,665	3,786	4,104	4,016	3,736	3,198
B	σ_y	-0,866	-0,956	-1,012	-1,011	-0,879	-0,725	-0,097	-0,099	-0,095	–
C	σ_x	3,133	3,392	3,855	4,777	6,927	9,511	–	–	–	–
D	σ_x	1,000	1,239	1,570	2,109	3,248	4,581	–	–	–	–
E	σ_x	1,000	0,813	0,634	0,471	0,316	0,221	–	–	–	–
L	σ_x	1,000	1,042	1,473	2,195	2,808	2,678	-0,018	-0,002	0,001	–
M	σ_x	1,000	1,279	1,534	1,490	1,124	0,826	-0,075	-0,053	0,039	0,220
С жестко подкрепленным контуром											
A	σ_x	0,064	0,057	0,049	0,040	0,033	0,031	0,026	0,024	0,019	0,014
B	σ_y	0,097	0,104	0,118	0,138	0,157	0,165	0,181	0,190	0,221	–
C	σ_x	0,064	0,062	0,062	0,057	0,018	0,002	–	–	–	–
D	σ_x	1,000	0,818	0,619	0,370	0,097	0,015	–	–	–	–
E	σ_x	1,000	0,936	0,786	0,458	0,073	0,010	–	–	–	–
L	σ_x	1,000	0,883	0,736	0,680	0,693	0,702	0,730	0,750	0,863	–
M	σ_x	1,000	0,870	0,861	0,923	0,987	1,013	1,070	1,100	1,191	1,273

В табл. 2 для растяжения усилиями $\sigma_x^\infty = p$ полуплоскости с круговым отверстием с жестко подкрепленным контуром L_1 и радиусом a_1 ($b_1 = a_1$) на расстоянии $h = 2a_1$ от прямолинейной границы и разрезом с контуром L_2 длины a_1 (эллипсом, у которого $a_2 = a_1 / 2$, $b_2 = 0$) в перемычке на расстояниях c_1 и c_2 от контура отверстия и границы полуплоскости соответственно (рис. 3) с точностью до множителя p приведены значения напряжений в некоторых характерных точках полуплоскости и КИН для концов трещины в зависимости от отношения c_1 / a_1 . При этом $c_2 = 2a_1 - a_1 - c_1$ и характерными были точки $A(0, -a_1)$, $B(a_1, 0)$, $C(0, a_1)$, $G(0, a_1 + c_1)$, $H(0, 2a_1 + c_1)$, $E(0, 3a_1)$, $L(a_1, 3a_1)$, $M(2a_1, 3a_1)$. Значения, соответствующие $c_1 / a_1 = 0$ и $c_1 / a_1 = 1$, относятся к



полуплоскости с круговым отверстием и краевой трещиной длины a_1 из его контура отверстия и полуплоскости с круговым отверстием и разрезом длины a_1 из прямолинейной границы. Значения, соответствующие $c_1/a_1 = -0,5$ и $c_1/a_1 = 1,5$, носят к полуплоскости с круговым отверстием и разрезом длины $0,5a_1$ из контура отверстия и границы полуплоскости.

Таблица 2
Значения величин в точках полуплоскости с жестко подкрепленным отверстием и трещиной в перемычке

Точка	Величина	c_1/a_1								
		-0,5	-0,1	0	0,1	0,3	0,5	0,9	1	1,1
A	σ_x	0,060	0,076	0,079	0,047	0,060	0,067	0,075	0,089	0,093
B	σ_y	0,108	0,096	0,107	0,085	0,087	0,080	0,051	-0,023	0,013
C	σ_x	–	–	–	0,222	0,226	0,183	0,162	0,233	0,224
G	k_1^+	–	–	–	0,305	0,402	0,506	0,640	0,757	0,822
H	k_1^-	-1,320	0,438	0,475	0,523	0,559	0,611	0,850	–	–
E	σ_x	0,932	0,910	0,899	0,874	0,879	0,878	0,857	–	–
L	σ_x	0,893	0,934	0,951	0,970	0,999	1,008	0,712	0,196	-0,074
M	σ_x	0,876	0,887	0,888	0,872	0,865	0,835	0,714	0,549	0,504

Как видно из данных табл. 2, при приближении вертикальной трещины к границе полуплоскости значения напряжений в точках перемычки и КИН для ближайшей к границе полуплоскости растут.

Выводы. Таким образом, с использованием комплексных потенциалов решена задача об электромагнитоупругом состоянии полуплоскости с произвольно расположенными относительно друг друга и прямолинейной границы отверстиями и линейными разрезами, которые располагаются произвольно относительно друг друга и относительно границы полуплоскости, в том числе пересекаясь друг с другом и с границей полуплоскости. При этом голоморфные вне отверстий и разрезов функции представлены рядами Лорана, голоморфные в сплошных нижних полуплоскостях – рядами Лорана для воображаемых отверстий и разрезов в верхних полуплоскостях, симметричных заданным в нижних полуплоскостях. Определение неизвестных коэффициентов рядов из граничных условий на контурах отверстий и трещин и на прямолинейной границе обобщенным методом рядов сведено к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений. Описаны результаты численных исследований распределения напряжений в полуплоскости с круговым отверстием или выемом, с прямолинейным разрезом, с круговым отверстием и трещиной в перемычке, в том числе выходящей как на контур отверстия, так и на прямолинейную границу. Изучены закономерности влияния геометрических характеристик отверстий и трещин, их взаиморасположения, упругих и пьезосвойств материалов.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (шифр FRRE-2026-0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. – М.: Иностранная литература, 1949. – 717 с.
2. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – Т. 1, ч. А. – С. 204–326.
3. Магнитоэлектрические материалы / М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филиппов и др. – М.: Изд-во «Академия Естественных наук», 2006. – 296 с.
4. Пятаков А.П. Магнитоэлектрические материалы и их практическое применение // Бюллетень МАГО. – 2006. – Т. 5, № 2. – С. 1–3.
5. Калоеров С.А., Петренко А.В. Двумерные задачи электромагнитоупругости для многосвязных тел. – Донецк: Юго-Восток. – 2011. – 232 с.
6. Калоеров С.А. Напряженное состояние анизотропной полуплоскости с конечным числом эллиптических отверстий // Прикладная механика. – 1966. – Т. 2, № 10. – С. 75–82.
7. Калоеров С.А., Полянский М.А., Сероштанов А.В. Решение задачи электромагнитоупругости для полуплоскости с отверстиями и трещинами // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 2. – С. 90–107. – EDN: WCVSJK – DOI: 10.5281/zenodo.13744723
8. Калоеров С.А., Паршикова О.А. Термовязкоупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки // Прикладная механика. – 2012. – № 3 (48). – С. 103–116.
9. Воеводин В.В. Вычислительные основы линейной алгебры. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
10. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
11. Калоеров С.А., Сероштанов А.В. Решение задачи об изгибе многосвязной пьезополуплоскости с приближенным удовлетворением граничным условиям на прямолинейной границе // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 1. – С. 28–41. – EDN: BYCRBC. – DOI: 10.5281/zenodo.12527097
12. Калоеров С.А., Горянская Е.С. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами // Теорет. и прикладная механика. – 1995. – № 25. – С. 45–56.
13. Drmač Z., Veselić K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 1 // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1322–1342.
14. Drmač Z., Veselić K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 2 // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1343–1362.
15. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
16. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
17. Калоеров С.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений, индукции и напряженности для многосвязных сред // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 56–62.
18. Yamamoto Y., Miya K. Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures. – Amsterdam: Elsevier Science-North Holland, 1987. – 450 p.
19. Tian W.-Y., Gabbert U. Multiple crack interaction problem in magneto-electro-elastic solids // Europ. J. Mech. Part A. – 2004. – Vol. 23. – P. 599–614.
20. Hou P.F., Teng G.-H., Chen H.-R. Three-dimensional Greens function for a point heat source in two-phase transversely isotropic magneto-electro-thermo-elastic material // Mech. Mater. – 2009. – Vol. 41. – P. 329–338.

REFERENCES

1. Cady W. G. Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals. New York: McGraw-Hill Book Company, 1946. 806 p.
2. Berlincourt D., Curran D.R., Jaffe H. Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers. Ed. by W.P. Mason. New York: Academic Press, Physical Acoustics, 1964. P. 169-270.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Filippov D.A., et al., Magnetolectric Composites. Akad. Estestv., Moscow, 2006; Jenny Stanford Publishing, 2019.
4. Pyatakov A.P., Magnetolectric Materials and Their Application in Practice // Bul. Ros. Magnit. Obshchestva. 2006. Vol. 5, № 2. P. 1-3.
5. Kaloerov S. A. Two-dimensional problems of electromagnetic elasticity for multiply connected bodies monograph / S.A. Kaloerov, A.V. Petrenko; Ministry of Education and Science of Ukraine, Donetsk. National University. — Donetsk: Yugo-Vostok, 2011. — 231 p.; 21. — ISBN 978-966-374-576-3.
6. Kaloerov S.A. Stress state of an anisotropic half-plane with a finite number of elliptical holes // Applied Mechanics. – 1966. – V. 2, No. 10. - P. 75–82

7. *Kaloerov S.A., Polianskii M.A., Seroshtanov A.V.* Solution of the problem of electromagnetic elasticity for a half-plane with holes and cracks // *Vestn. DonNU. Series. A. Natural Sciences.* – 2024. – No. 2. – P. 90–107.
8. *Kaloerov S.A., Parshikova O.A.* Thermoviscoelastic state of multiply connected anisotropic plates // *International Applied Mechanics.* 2012. Vol. 48, № 3. P. 319-331. doi:10.1007/s10778-012-0523-0
9. *Voevodin V.V.* Vychislitel'nye osnovy lineinoi algebrы [Computational Basis of Linear Algebra]. Moskov, Nauka, 1977. 304 p.
10. *Forsythe G.E., Malcolm M.A., Moler C.B.* Computer methods for mathematical computations. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1977. XII, 259 p.
11. *Kaloerov S.A., Seroshtanov A.V.* Solving the problem of bending a multi-connected piezo half-plane with approximate satisfaction of boundary conditions on a rectilinear boundary // *Vestn. DonNU. Series. A. Natural Sciences.* – 2024. – No. 1. – P. 28–41.
12. *Kaloerov S. A., Goryanskaya E. S.* The two-dimensional stressed state of a multiconnected anisotropic body with cavities and cracks // *Journal of Mathematical Sciences.* 1997. Vol. 84, № 6, P. 1497-1504. doi:10.1007/BF02398809
13. *Drmač Z., Veselič K.* New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 1 // *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1322–1342.
14. *Drmač Z., Veselič K.* New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 2 // *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* – 2008. – Vol. 29, No. 4. – P. 1343–1362.
15. *Lekhnitsky S.G.* Theory of elasticity of an anisotropic body. – Moscow: Nauka, 1977. – 416 p.
16. *Muskhelishvili N.I.* Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. – M.: Nauka, 1966. – 708 p.
17. *Kaloerov S.A.* Determination of stress intensity factors, induction and stress for multiply connected media // *Applied Mechanics.* – 2007. – Vol. 43, No. 6. – P. 56–62.
18. *Yamamoto Y., Miya K.* Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures. – Amsterdam: Elsevier Science-North Holland, 1987. – 450 p.
19. *Tian W.-Y., Gabbert U.* Multiple crack interaction problem in magneto-electroelastic solids // *Europ. J. Mech. Part A.* – 2004. – Vol. 23. – P. 599–614.
20. *Hou P.F., Teng G.-H., Chen H.-R.* Three-dimensional Greens function for a point heat source in two-phase transversely isotropic magneto-electro-thermo-elastic material // *Mech. Mater.* – 2009. – Vol. 41. – P. 329–338.

SOLUTION TO THE ELECTROMAGNETOELASTICITY PROBLEM FOR A MULTICONNECTED PIEZO-HALF-PLANE

M. A. Polianskii

A solution is given to the electromagnetic elasticity problem for a piezoelectric half-plane with elliptical holes that can independently transform into straight cuts and intersect each other and the straight boundary, forming notches at the half-plane boundary. The solution is constructed using complex electromagnetic elasticity potentials. Functions holomorphic outside the holes are represented by Laurent series corresponding (after conformal mappings) to the given ellipses, while functions holomorphic in the lower half-planes are expanded into Laurent series corresponding to imaginary ellipses in the upper half-planes, symmetric to the given ellipses relative to the half-plane boundary. Determining the unknown coefficients of Laurent series is reduced to solving an overdetermined system of linear algebraic equations derived from boundary conditions on the contours of the holes and on the boundary of the half-plane, and solved using the generalized least squares method. The results of numerical studies are presented for a half-plane with a circular hole (unsupported or rigidly supported contour), including one extending to a rectilinear boundary and forming a cavity, and for a half-plane with a hole and a crack in a lintel extending to the contour of the hole and the boundary of the half-plane. The stress distribution patterns are studied depending on the geometric characteristics of the media under consideration and the physical and mechanical properties of their materials.

Keywords: electromagnetic elasticity, half-plane, holes, complex potentials, generalized least squares method.

Поступила в редакцию 03.02.2026 г.

Полянский Максим Алексеевич,
аспирант, стажер-исследователь,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, РФ.
ORCID: 0009-0007-2281-3220.
SPIN-код: 8098-8862
E-mail: m4xpolyan@yandex.ru

Polianskii Maksim Alekseevich,
Postgraduate student, research intern,
Donetsk State University, Donetsk, RF.

Х И М И Ч Е С К И Е Н А У К И

УДК 544.4+544.18

DOI: 10.5281/zenodo.19179429

EDN: MТМНУН

**ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИТЕЛЯ ВОДА – 1,4-ДИОКСАН НА КИНЕТИЧЕСКИЕ
ЗАКОНОМЕРНОСТИ РЕАКЦИЙ α -АМИНОКИСЛОТ С
4-НИТРОФЕНИЛОВЫМ ЭФИРОМ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ**

© 2026. Л. Б. Кочетова, Т. П. Кустова

Исследована кинетика реакций Gly, L-Pro, DL-Val с 4-нитрофенилацетатом в системе вода (0,671–0,911 мол. %) – 1,4-диоксан. Установлено, что константы скорости реакций нелинейно возрастают с увеличением содержания воды в растворителе. Проведено квантово-химическое моделирование сольватных комплексов анионной формы глицина с компонентами бинарного растворителя. Установлено, что в качестве дескрипторов электронной структуры сольватов могут использоваться величины энергий их ВЗМО. Показано, что нелинейные зависимости констант скорости ацилирования α -аминокислот от состава бинарного растворителя обусловлены особенностями специфической сольватации α -аминокислот.

Ключевые слова: кинетика; N-ацилирование; α -аминокислоты; водный 1,4-диоксан; 4-нитрофенилацетат; сольватация; квантово-химическое моделирование.

Введение. Реакции N-ацилирования аминосоединений, в частности, α -аминокислот, представляют закономерный и постоянный интерес для исследований в связи с тем, что *in vivo* на них основан важнейший процесс биосинтеза белков, а также пост-трансляционная модификация белков и ряд метаболических процессов [1–7]. Посредством ацилирования аминокислот осуществляется наращивание пептидной цепи в химическом синтезе полипептидов, а также защита концевых и боковых функциональных групп α -аминокислот. N-ациламиноокислоты, образующиеся в результате ацилирования, проявляют широкий спектр фармакологической активности в сочетании с низкой токсичностью и отсутствием побочных эффектов [8, 9]. Фармацевтические препараты на основе N-ациламиноокислот способны оказывать сосудорасширяющее, нейропротекторное и обезболивающее действие [1, 2], индуцировать или ингибировать пролиферацию T-лимфоцитов *in vitro* [2], уменьшать пролиферацию клеточных линий ректальной карциномы [3], индуцировать секрецию инсулина [4], предотвращать старение кожи [7].

N-ациламиноокислоты используются также при создании гигиенических и косметических средств, в качестве гербицидов и фунгицидов, которые легко разрушаются в окружающей среде и могут быть малотоксичными для животных, нефитотоксичными и ускорять рост растений [10].

Для развития промышленных способов получения ациламиноокислот требуются данные по кинетике ацилирования α -аминокислот в различных водно-органических растворителях, которые, как показано в ряде исследований [10, 11], оптимальны для промышленного синтеза этих соединений. Однако количество таких данных в литературе ограничено.

В работах [12–17] исследованы кинетические закономерности реакций N-ацилирования α -аминокислот в водно-органических средах и установлено, что состав

растворителей оказывает существенное влияние на скорость процессов. В [12] показано, что увеличение содержания воды в смеси вода – 1,4-диоксан уменьшает реакционную способность α -аминокислот по отношению к бензоилхлориду, а при увеличении доли воды в водных спиртах и водном ацетонитриле константы скорости реакций α -аминокислот с эфирами бензойной [14, 18] и уксусной кислот [19] растут.

Кинетика реакций α -аминокислот со сложными эфирами исследована достаточно полно в водном 2-пропаноле [14–17], тогда как в водном 1,4-диоксане она изучена в меньшей степени. Вместе с тем, эти данные представляют интерес, т.к. по полярности, диэлектрической проницаемости и др. свойствам водные растворы 1,4-диоксана ближе к биологическим жидкостям, чем вода [20–22], кинетические данные реакций ацилирования α -аминокислот в данном растворителе могут быть использованы для объяснения механизмов процессов, протекающих в живых организмах. Ранее нами было неоднократно показано, что оптическая изомерия не вносит существенного вклада в кинетику N-ацилирования, поскольку используемые нами ацилирующие агенты оптически не активны [14].

В наших предыдущих работах [23–26] была изучена кинетика ряда реакций производных α -аминокислот со сложными эфирами в водном 1,4-диоксане и предпринята попытка квантово-химической интерпретации полученных данных путем расчета методом HF/6-31G(d) небольших сольватных комплексов глицина и глицинат-иона, содержащих не более 4 молекул растворителя. В продолжение проводимых исследований, целью настоящей работы стало исследование влияния состава бинарной смеси вода (0,671–0,911 мол. %) – 1,4-диоксан на реакционную способность глицина, L-пролина и DL-валина при взаимодействии с 4-нитрофенилацетатом и их интерпретация с позиций квантовой химии, путем расчета сольватных комплексов глицинат-иона, содержащих много молекул растворителя более высокоуровневым методом, чем ранее использованный.

Методика эксперимента. Выбор диапазона составов бинарного растворителя, используемого при проведении эксперимента, обусловлен, с одной стороны, недостаточной растворимостью α -аминокислот и продуктов реакции при уменьшении доли воды в системе, а с другой – сильным гидролизом 4-нитрофенилацетата при ее повышении.

α -Аминокислоты: Gly «ч.», DL-Val «ч.», L-Pro «ч.д.а.» перед приготовлением растворов сушили в течение 1 часа при температуре 373 К и использовали без дополнительной очистки.

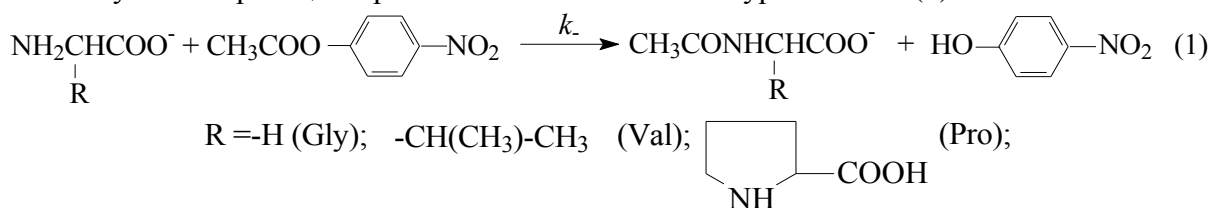
4-Нитрофенилацетат синтезировали в нашей лаборатории.

Гидроксид натрия «ч.д.а.» применяли без дополнительной очистки.

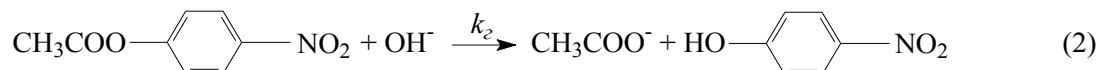
1,4-Диоксан «ч.» выдерживали в течение нескольких дней над КОН и перегоняли на колонке над металлическим натрием.

Бидистиллят для приготовления водно-диоксанового растворителя получали на деионизаторе воды ДВ-1. Физико-химические характеристики всех используемых веществ соответствовали справочным данным [27, 28].

Изучаемые реакции протекают в соответствии с уравнением (1).



Параллельно с N-ацилированием в использованных средах может протекать щелочной гидролиз сложного эфира (2):



Кинетику реакций N-ацилирования α -аминокислот изучали индикаторным спектрофотометрическим методом, где индикатором являлся побочный продукт – 4-нитрофенол, который в условиях эксперимента (pH=8–9) превращался 4-нитрофенолят-анион, окрашенный в желтый цвет. За скоростью реакций следили по уменьшению пропускания светового потока через раствор при $\lambda = 400$ нм с помощью спектрофотометра СФ-56 и термостатируемой ячейкой для кювет. Подробная методика исследования представлена в [18].

Квантово-химическое моделирование сольватных комплексов аниона глицина проводили методом DFT//B3LYP/6-311G(d,p)+ с использованием программного пакета Firefly 7.1.g [29]. Проведено моделирование двух рядов сольватов: с аминогруппой, выступающей в качестве Н-донора, и аминогруппой – Н-акцептором, состава: $(\text{Gly}^-) \cdot (\text{H}_2\text{O})_m \cdot (\text{Diox})_n$, где $m = 1-10$, $n = 0-2$. При оптимизации геометрии молекулярных систем принадлежность структур истинным минимумам ППЭ подтверждали отсутствием мнимых частот в колебательном спектре.

В зависимости от кислотности среды, α -аминокислоты могут существовать в растворах в четырех различных формах: катионной, анионной, цвиттерионной и незаряженной молекулярной, из которых только две – анионная и молекулярная, обладающие непротонированной аминогруппой, могут взаимодействовать со сложными эфирами. При проведении эксперимента создавались условия, в которых единственной реакционноспособной формой α -аминокислот в растворе была анионная, тогда как концентрация молекул α -аминокислот и их вклад в кинетику N-ацилирования был ничтожно мал по сравнению со вкладом их анионов [30].

Общая концентрация всех форм α -аминокислоты в системе не менее чем в 100 раз превышала концентрацию ацилирующего агента. В условиях эксперимента скорость изменения концентрации ацилирующего агента (c_{au}), с учетом возможного протекания его гидролиза по реакции (2), описывается уравнением (3):

$$-\frac{dc_{au}}{d\tau} = [k_2 + (k_{-} \alpha) c_0] c_{au} = k_n c_{au} \quad (3)$$

где α – доля концентрации анионной формы α -аминокислот от их общей концентрации в растворе c_0 ; k (л·моль⁻¹·с⁻¹) – константа скорости N-ацилирования анионной формы α -аминокислоты; k_2 (с⁻¹) – константа скорости гидролиза сложного эфира; k_n (с⁻¹) – наблюдаемая константа скорости реакции первого порядка. Величина k_n определялась выражением (4):

$$k_n = k_2 + k_{-} \cdot C_{-} \quad (4)$$

где, C_{-} – концентрация анионной формы α -аминокислоты в растворе, равная концентрации добавленной щелочи ($C_{-} = c_{\text{NaOH}}$); доля анионной формы в растворе α определялась выражением (5):

$$\alpha_{-} = c_{\text{NaOH}} / c_0 = c / c_0 \quad (5)$$

В ряде работ [14–17] показано, что в условиях кинетического эксперимента (pH=8–9) скорость гидролиза 4-нитрофениловых эфиров бензойной и уксусной кислот

пренебрежимо мала по сравнению со скоростью N-ацилирования α -аминокислот, и ее вклад в общую скорость реакции можно не учитывать ($k_2 \approx 0$). В этом случае уравнение (4) будет иметь вид (6):

$$k_n = k_- \cdot C_- \quad (6)$$

Следовательно, константы скорости реакций второго порядка анионов α -аминокислот с (IV) можно вычислить по уравнению (7):

$$k_- = \frac{k_n}{C_-} \quad (7)$$

Анализ результатов. Рассчитанные нами по уравнению (7) значения констант скорости N-ацилирования реакции (1) k_- были практически неизменны при варьировании C_- , что указывает на незначительный вклад гидролиза эфира по реакции (2) в общую скорость процесса. Полученные нами кинетические данные взаимодействия глицина, DL-валина и L-пролина с 4-нитрофенилацетатом по реакции (1) при изменении состава растворителя вода – 1,4-диоксан приведены в табл. 1.

Таблица 1
Кинетические данные реакций α -аминокислот с 4-нитрофенилацетатом в растворителе вода – 1,4-диоксан; 298 К; X_1 - молярная доля воды

Gly		DL-Val		L-Pro	
X_1	$k_-, \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	X_1	$k_-, \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	X_1	$k_-, \text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
0,671	0,835±0,007	0,754	0,712±0,007	0,723	9,5±0,4
0,765	1,05±0,02	0,765	0,73±0,03	0,805	11,1±0,01
0,805	1,13±0,03	0,805	0,797±0,004	0,835	11,8±0,7
0,835	1,33±0,07	0,835	0,868±0,009	0,870	13±1
0,870	1,73±0,06	0,870	0,97±0,02	0,911	14,8±0,6
0,911	3,6±0,5				

Из данных табл. 1 видно, что при увеличении доли воды в 1,4-диоксане константы скорости k_- реакций эфира уксусной кислоты с изученными α -аминокислотами монотонно возрастают; аналогичная картина, согласно данным [18] наблюдается в водном 2-пропанол. Для всех изученных реакций зависимости констант скорости от состава растворителя имеют сложный характер, по-видимому, связанный с особенностями специфической сольватации реагентов.

Нами показано, что влияние растворителя на кинетику N-ацилирования α -аминокислот в водно-органических средах определяется, в первую очередь, специфической сольватацией аминогруппы [31]. Аминогруппа в сольватных комплексах может выступать как в качестве Н-акцептора, образуя водородную связь $\text{N} \cdots \text{H}$ с компонентами бинарного растворителя за счет неподеленной электронной пары атома азота, так и в качестве Н-донора, взаимодействуя с атомами кислорода воды или 1,4-диоксана ($\text{O} \cdots \text{H}$).

С целью уточнения роли специфической сольватации α -аминокислот в кинетике их реакций со сложными эфирами нами было проведено квантово-химическое моделирование сольватных комплексов глицинат-иона с компонентами растворителя вода-1,4-диоксан. Были рассмотрены сольваты разного строения с составами $(\text{Gly}^-) \cdot (\text{H}_2\text{O})_m \cdot (\text{Diox})_n$ где $m = 1-10$, $n = 0-2$ (табл. 2); для комплексов одного состава моделировались два вида структуры. В комплексах первого вида аминогруппа выступала донором Н-связи. Эти комплексы должны быть более реакционноспособны

в N-ацилировании, поскольку для образования атомом азота α -аминокислоты связи с карбонильным углеродом ацилирующего агента за счет неподеленной электронной пары не требуется затрат энергии на разрыв Н-связи с молекулой растворителя. В комплексах второго вида аминогруппа являлась Н-акцептором. Такие комплексы должны быть менее реакционноспособны, т.к. образование ковалентной связи атомом азота α -аминокислоты с углеродом сложного эфира должен предварять разрыв Н-связи с молекулой растворителя, что увеличивает энергозатраты на протекание процесса. В комплексах, содержащих молекулы 1,4-диоксана, последние располагали вокруг аминогруппы таким образом, чтобы один из атомов кислорода 1,4-диоксана образовывал водородную связь с водородом аминогруппы.

Таблица 2

Квантово-химические характеристики сольваток комплексов глицинат-иона с компонентами растворителя вода – 1,4-диоксан, DFT//B3LYP/6-311G(d,p)+

№	Комплекс	X_{solv}	$-\Delta E_{кс}$, кДж/моль	$\varphi_{p_2}(N)$	$q(NH_2)$, а.е.з.	$-q(N)$, а.е.з.	$r(N-H)$, Å	$r_{N...H}$, Å	$r_{ODiox...H}$, Å	$-E_{ВЗМО}$, эВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Аминогруппа – Н-акцептор										
	Gly^-		-	1,220	-0,193	0,478	1,019	-	-	10,012
1	$(Gly^-) \cdot (H_2O) \cdot (Diox)$	0,500	107,54	1,148	-0,153	0,520	1,020	1,836	2,200	10,036
2	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2 \cdot (Diox)$	0,667	196,72	1,189	-0,211	0,545	1,019	1,837	2,090	10,047
3	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3 \cdot (Diox)$	0,750	259,68	1,111	-0,199	0,536	1,019	1,836	2,112	10,060
4	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4 \cdot (Diox)$	0,800	314,76	1,458	-0,189	0,534	1,019	1,839	2,117	10,073
5	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5 \cdot (Diox)$	0,833	414,43	1,520	-0,222	0,529	1,019	1,894	2,177	10,079
6	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6 \cdot (Diox)$	0,857	490,50	1,187	-0,233	0,550	1,019	1,743	2,147	10,087
7	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7 \cdot (Diox)$	0,875	548,20	1,566	-0,258	0,521	1,018	1,978	2,214	10,084
8	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8 \cdot (Diox)$	0,889	619,03	1,599	-0,254	0,515	1,018	2,021	2,332	10,090
9	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9 \cdot (Diox)$	0,900	689,85	1,584	-0,313	0,561	1,019	2,180 1,974	2,356	10,096
10	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10} \cdot (Diox)$	0,909	755,42	1,496	-0,304	0,561	1,019	2,208 1,974	2,326	10,105
11	$(Gly^-) \cdot (H_2O) \cdot (Diox)_2$	0,333	146,89	1,126	-0,176	0,536	1,018	1,829	2,207; 2,149	10,045
12	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2 \cdot (Diox)_2$	0,500	222,95	1,238	-0,194	0,554	1,019	1,707	2,200; 2,152	10,056
13	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3 \cdot (Diox)_2$	0,600	317,38	1,289	-0,184	0,562	1,021	1,724	2,340; 2,198	10,076
14	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4 \cdot (Diox)_2$	0,667	398,69	1,282	-0,178	0,562	1,020	1,735	2,169; 2,155	10,083
15	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5 \cdot (Diox)_2$	0,714	461,65	1,244	-0,183	0,565	1,020	1,719	2,204; 2,191	10,090
16	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6 \cdot (Diox)_2$	0,750	550,83	1,253	-0,236	0,537	1,019	1,810	2,393; 2,375	10,097
17	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7 \cdot (Diox)_2$	0,778	613,78	1,247	-0,208	0,537	1,020	1,773	2,324; 2,337	10,101
18	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8 \cdot (Diox)_2$	0,800	658,37	1,135	-0,194	0,552	1,020	1,692	2,273; 2,161	10,111
19	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9 \cdot (Diox)_2$	0,818	726,57	1,200	-0,237	0,555	1,018	1,703	2,097; 2,128	10,104
20	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10} \cdot (Diox)_2$	0,833	800,01	1,229	-0,251	0,563	1,019	1,634	2,153; 2,057	10,106
21	$(Gly^-) \cdot (H_2O)$	1	70,82	1,189	-0,172	0,517	1,027 1,018	1,320	-	10,034
22	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2$	1	152,13	1,156	-0,202	0,518	1,018 1,020	1,848	-	10,049
23	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3$	1	230,82	1,156	-0,173	0,515	1,017 1,020	1,865	-	10,062
24	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4$	1	285,91	1,173	-0,164	0,513	1,017 1,020	1,859	-	10,076
25	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5$	1	372,46	1,154	-0,184	0,508	1,017 1,022	1,878	-	10,082
26	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6$	1	435,42	1,185	-0,203	0,531	1,018 1,022	1,742	-	10,088

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7$	1	511,48	1,138	-0,214	0,498	1,017 1,019	2,018	–	10,088
28	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8$	1	569,19	1,240	-0,233	0,495	1,015 1,016	2,051	–	10,090
29	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9$	1	668,86	1,240	-0,306	0,531	1,018 1,019	1,917	–	10,096
30	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10}$	1	781,65	1,193	-0,289	0,521	1,018 1,019	1,911	–	10,103
Аминогруппа –Н-донор										
31	$(Gly^-) \cdot (H_2O) \cdot (Diox)$	0,500	152,13	1,421	-0,137	0,456	1,016	–	2,347	10,031
32	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2 \cdot (Diox)$	0,667	262,30	1,539	-0,196	0,466	1,017	–	2,384	10,043
33	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3 \cdot (Diox)$	0,750	396,07	1,353	-0,161	0,474	1,016	–	2,333	10,064
34	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4 \cdot (Diox)$	0,800	400,50	1,635	-0,170	0,460	1,016	–	2,333	10,064
35	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5 \cdot (Diox)$	0,833	419,68	1,602	-0,154	0,460	1,018	–	2,339	10,073
36	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6 \cdot (Diox)$	0,857	482,63	1,619	-0,188	0,449	1,019	–	2,494	10,078
37	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7 \cdot (Diox)$	0,875	537,71	1,616	-0,204	0,446	1,017	–	2,591	10,081
38	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8 \cdot (Diox)$	0,889	616,40	1,583	-0,181	0,443	1,017	–	2,410	10,086
39	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9 \cdot (Diox)$	0,900	975,75	1,659	-0,152	0,436	1,016	–	2,369	10,094
40	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10} \cdot (Diox)$	0,909	1106,90	1,653	-0,132	0,439	1,016	–	2,326	10,097
41	$(Gly^-) \cdot (H_2O) \cdot (Diox)_2$	0,333	178,36	1,486	-0,135	0,464	1,018	–	2,607; 2,325	10,057
42	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2 \cdot (Diox)_2$	0,500	257,05	1,449	-0,128	0,459	1,018	–	2,412; 2,452	10,060
43	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3 \cdot (Diox)_2$	0,600	327,87	1,493	-0,157	0,447	1,017	–	2,413; 2,458	10,067
44	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4 \cdot (Diox)_2$	0,667	403,94	1,414	-0,188	0,457	1,018	–	2,418; 2,440	10,075
45	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5 \cdot (Diox)_2$	0,714	469,52	1,350	-0,181	0,452	1,018	–	2,395; 2,435	10,080
46	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6 \cdot (Diox)_2$	0,750	542,96	1,346	-0,202	0,493	1,019	–	2,389; 2,245	10,089
47	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7 \cdot (Diox)_2$	0,778	605,91	1,330	-0,141	0,445	1,017	–	2,339; 2,346	10,095
48	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8 \cdot (Diox)_2$	0,800	939,03	1,441	-0,155	0,448	1,017	–	2,319 2,378	10,099
49	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9 \cdot (Diox)_2$	0,818	1017,72	1,462	-0,126	0,458	1,016	–	2,329 2,166	10,101
50	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10} \cdot (Diox)_2$	0,833	1148,87	1,417	-0,115	0,453	1,017	–	2,361 2,183	10,109
51	$(Gly^-) \cdot (H_2O)$	1	86,56	1,123	-0,204	0,461	1,019 1,019	–	–	10,029
52	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_2$	1	157,38	1,680	-0,223	0,469	1,018 1,018	–	–	10,039
53	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_3$	1	257,05	1,129	-0,133	0,447	1,016 1,019	–	–	10,058
54	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_4$	1	322,63	1,198	-0,154	0,445	1,016 1,018	–	–	10,062
55	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_5$	1	380,33	1,171	-0,171	0,447	1,017 1,017	–	–	10,066
56	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_6$	1	453,78	1,157	-0,182	0,443	1,015 1,019	–	–	10,070
57	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_7$	1	506,24	1,523	-0,197	0,419	1,014 1,015	–	–	10,074
58	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_8$	1	624,27	1,230	-0,103	0,450	1,016 1,021	–	–	10,090
59	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_9$	1	666,24	1,692	-0,095	0,455	1,016 1,022	–	–	10,100
60	$(Gly^-) \cdot (H_2O)_{10}$	1	744,93	1,432	-0,069	0,445	1,015 1,020	–	–	10,103

Некоторые результаты расчетов представлены в табл. 2. В результате оптимизации геометрических параметров сольватоккомплексов было установлено, что в водном 1,4-диоксане анион глицина может образовывать Н-комплексы по аминогруппе с обоими компонентами бинарного растворителя. Молекулы 1,4-диоксана в составе комплексов образуют Н-связи за счет атома кислорода, донором водорода в них

выступает аминокгруппа. Молекулы воды могут образовывать водородные связи как с атомами водорода аминокгруппы, так и с неподеленной парой электронов атома азота.

Из данных табл. 2 видно, что все моделируемые структуры весьма устойчивы, о чем свидетельствуют величины энергий комплексообразования (ΔE_k), рассчитанные как разности полных энергий комплексов и полных энергий изолированных молекул. Прочность комплексов повышается при увеличении числа молекул растворителя в сольватной оболочке, на что указывает понижение величины ΔE_k . У комплексов одинакового состава с разным строением, за редким исключением, несколько более устойчивыми являются те, в которых аминокгруппа выступает Н-донором. Замена молекулы воды в составе комплекса на молекулу 1,4-диоксана существенно уменьшает устойчивость сольвата. Так, в ряду комплексов, с тремя молекулами растворителя, где аминокгруппа является Н-акцептором: $(Gly^-) \cdot (H_2O)_3$, $(Gly^-) \cdot (H_2O)_2 \cdot (Diox)$ и $(Gly^-) \cdot (H_2O) \cdot (Diox)_2$ – абсолютная величина ΔE_k уменьшается: 230,82 кДж/моль; 196,72 кДж/моль; 146,89 кДж/моль, соответственно. Аналогично, в ряду комплексов, содержащих по 6 молекул растворителя, где аминокгруппа является Н-донором: $(Gly^-) \cdot (H_2O)_6$, $(Gly^-) \cdot (H_2O)_5 \cdot (Diox)$ и $(Gly^-) \cdot (H_2O)_4 \cdot (Diox)_2$, значение ΔE_k также уменьшается: 453,78 кДж/моль; 419,68 кДж/моль; 403,94 кДж/моль.

Во всех комплексах длина водородной связи $O_{Diox} \cdots H$ существенно превышает длину связи $N \cdots H$ (табл. 2), что говорит о большей прочности последней. Ранее [31], путем моделирования сольватных комплексов глицина, содержащих 1–4 молекулы растворителя, методом HF/6-31G(d), нами было найдено, что 1,4-диоксан в составе небольших комплексов не участвует в образовании сольватов с глицинат-ионом. Однако, расчет более высокоуровневым методом, проведенный в настоящей работе, свидетельствует о том, что в используемом растворителе все же образуются слабые Н-связи глицинат-аниона с молекулами 1,4-диоксана.

Длины связей N-H в аминокгруппе аниона глицина мало зависят от состава комплекса и изменяются в довольно узком диапазоне: $r(N-H) = 1,016 \div 1,022 \text{ \AA}$. Изменение зарядов на аминокгруппе и атоме азота более существенно: $q(NH_2) = -(0,128 \div 0,313)$, $q(N) = 0,443 \div 0,565$. Образование сольватных комплексов, в которых аминокгруппа глицинат-аниона является Н-акцептором, вызывает существенное снижение заряда на атоме азота $q(N)$ по сравнению с несольватированным анионом глицина. Повышение нуклеофильности азота должно повышать реакционную способность глицинат-аниона в составе сольватов данного вида в N-ацилировании, по сравнению с несольватированным анионом глицина. В комплексах, в которых аминокгруппа является Н-донором, заряд на азоте, напротив, несколько увеличивается по сравнению с несольватированным глицинат-анионом, что должно указывать на сниженную нуклеофильность и реакционную способность в N-ацилировании таких сольватов по сравнению с несольватированным глицинат-анионом и сольватами, в которых аминокгруппа является Н-акцептором. В то же время, никаких корреляционных зависимостей между величинами зарядов на атомах азота глицинат-аниона в составе сольватов и мольной долей воды в сольвате X_{solv} (которая, в свою очередь, может коррелировать с мольной долей воды в растворителе X_I , на основании чего можно было бы судить о связи зарядов на азоте с кинетическими характеристиками реакции) не обнаруживается.

Заряд на аминокгруппе в целом $q(NH_2)$ меняется бессистемно в сольватах обоих видов. Заселенности $2p_z$ -атомной орбитали, ранее использовавшиеся нами как дескрипторы реакционной способности сольватоккомплексов аминоксоединений, в данном случае также изменяются бессистемно. Таким образом, указанные характеристики не могут рассматриваться в качестве дескрипторов электронной

структуры рассматриваемых сольватных комплексов. Такой характеристикой может являться величина энергии ВЗМО ($E_{ВЗМО}$) сольватов. В рядах комплексов 1-10, 11-20, 21-30, 31-40, 41-50, 51-60 она монотонно увеличивается с ростом мольной доли воды в сольватной оболочке X_{solv} . При этом наиболее низкие $E_{ВЗМО}$ – у комплексов, в состав которых входит 2 молекулы 1,4-диоксана, поэтому они должны быть наименее реакционноспособными в N-ацилировании. С учетом наиболее низкой устойчивости и наиболее высоких $E_{ВЗМО}$ самыми реакционноспособными могут быть комплексы, не содержащие молекул 1,4-диоксана, включающие минимальное число молекул воды и комплексы, состава $(Gly)^-(H_2O)_n(Diox)$ с $n=1\div 2$. При этом минимальной устойчивостью обладают комплексы, в которых аминогруппа является N-акцептором, а более высокими $E_{ВЗМО}$ – сольваты с аминогруппой N-донором. Если же учитывать весьма небольшую разницу в $E_{ВЗМО}$ у комплексов одинакового состава и разного строения и нуклеофильные свойства сольватов, выражаемые величиной отрицательного заряда на атоме азота, то можно утверждать, что участвовать в реакции, в первую очередь, будут комплексы, указанного выше состава, с аминогруппой N-акцептором.

Возвращаясь к нелинейной зависимости константы скорости реакций изученных α -аминокислот от мольной доли воды в растворителе, можно предположить, что на ее начальном участке при X_1 от 0,671 до 0,835, скорость мало увеличивается с увеличением содержания воды в растворителе, т.к. в нем присутствует большое количество малореакционноспособных сольватов, содержащих 1,4-диоксан. С ростом X_1 до 0,870-0,911 в растворе снижается количество малореакционноспособных сольватов, содержащих 2 молекулы диоксана, и растет содержание гидратов и комплексов с одной молекулой 1,4-диоксана.

Таким образом, полученные результаты подтверждают сделанный нами ранее [31] вывод о том, что в бинарных смесях содержатся сольватные комплексы различного строения, проявляющие разную реакционную способность в N-ацилировании. При увеличении содержания воды в бинарном растворителе смещается существующее в системе равновесие между комплексами разного состава, что ведет к уменьшению концентрации сольватов, содержащих 1,4-диоксан, и увеличению концентрации комплексов, содержащих больше воды.

Выводы. Исследование кинетики взаимодействия глицина, DL-валина и L-пролина с 4-нитрофениловым эфиром уксусной кислоты в растворителе вода (0,671–0,911 мол. %)-1,4-диоксан позволило установить, что константы скорости изучаемых процессов монотонно возрастают с ростом содержания воды в бинарной смеси. Зависимости констант скорости от состава растворителя имеют сложный характер. Установлено, что анион глицина может образовывать N-комплексы по аминогруппе с обоими компонентами водного 1,4-диоксана; их прочность повышается при увеличении числа молекул растворителя в сольватной оболочке. Комплексы, в которых аминогруппа выступает N-донором, несколько более устойчивы; замена молекулы воды в составе комплекса на молекулу 1,4-диоксана уменьшает устойчивость сольвата. В качестве дескрипторов электронной структуры сольватных комплексов могут использоваться энергии ВЗМО: они монотонно увеличиваются с ростом мольной доли воды в сольватной оболочке глицинат-аниона. Наименее реакционноспособны в ацилировании комплексы, содержащие 2 молекулы 1,4-диоксана, а наиболее реакционноспособны – гидраты и комплексы, состава $(Gly)^-(H_2O)_n(Diox)$ с $n=1\div 2$ с аминогруппой N-акцептором. Нелинейные зависимости констант скорости изученных реакций от мольной доли воды в растворителе объясняются смещением равновесия между комплексами разного состава, с увеличением содержания воды в бинарной системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hanuš, L. N-Acyl amino acids and their impact on biological processes / L. Hanuš, E. Shohami, I. Bab, R. Mechoulam // *Biofactors*. – 2014. – V. 40, No 4. – P. 381-388.
2. Burstein, S.H. Oxidative metabolism of anandamide / S. H. Burstein, R. G. Rossetti, B. Yagen, R. B. Zurier // *Prost. Lipid Mediat.* – 2000. – V. 61, No 1-2. – P. 29-41.
3. Gustafsson, S. B. Cannabinoid receptor-independent cytotoxic effects of cannabinoids in human colorectal carcinoma cells: synergism with 5-fluorouracil / S. B. Gustafsson, T. Lindgren, M. Jonsson, S. O. P. Jacobsson // *Cancer Chemother. Pharmacol.* – 2009. – V. 63, No 4. – P. 691-701.
4. Ikeda, Y. Identification of N-arachidonoylglycine, U18666A, and 4-androstene-3,17-dione as novel insulin secretagogues / Y. Ikeda, H. Iguchi, M. Nakata, R. X. Ioka, T. Tanaka, S. Iwasak, K. Magoori, S. Takayasu, T. T. Yamamoto, T. Kodama, T. Yada, T. Sakurai, M. Yanagisawa, J. Sakai // *Biochem. Biophys. Res. Comm.* – 2005. – V. 333, No 3. – P. 778-786.
5. Dumont, S. Two new lipoamino acids with complementary modes of action: new prospects to fight out against skin ageing / S. Dumont, L. Cattuzzato, G. Trouve, N. Chevrot, C. Stolz // *Int. J. Cosmet. Sci.* – 2010. – V. 32, No 1. – P. 9-27.
6. Waluk, D. P. Biosynthesis and physiological functions of N-acyl amino acids: Doctoral thesis / Waluk Dominic Pavel. – Stockholm, 2012. – 58 p.
7. Struhl, K. Histone acetylation and transcriptional regulatory mechanisms / K. Struhl // *Genes Dev.* – 1998. – V. 12, No 5. – P. 599-606.
8. Машковский, М. Д. Лекарственные средства / М. Д. Машковский. – 15-е изд. – М.: Новая Волна, 2006. – 1206 с.
9. Merck Index / Ed. by Budavari S. – 11th ed. – N. Y.: Merck&Co., Rahway, 1989. – P. 1400-1416.
10. Михалкин, А.П. Получение, свойства и применение N-ацил- α -аминокислот / А.П. Михалкин // *Успехи химии*. – 1995. – Т. 64, № 3. – С. 275-292.
11. Гершкович, А.А. Химический синтез пептидов / А.А. Гершкович, В.К. Кибирев. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 640 с.
12. Курицын, Л.В. Кинетика N-ацилирования глицина бензоилхлоридом в растворителе вода – диоксан / Л.В. Курицын, Н.В. Калинина, А.К. Кампал // *Журнал органической химии*. – 1988. – Т. 24, вып. 12. – С. 2562-2567.
13. Курицын, Л.В. Реакционная способность аминогрупп α -аминокислот и дипептидов в реакции с бензоилхлоридом в растворителе диоксан вода / Л.В. Курицын, Н.В. Калинина // *Журнал органической химии*. – 1994. – Т. 30, вып. 5. – С. 723-725.
14. Курицын, Л. В. Кинетика реакций ацильного переноса / Л. В. Курицын, Т. П. Кустова, А. И. Садовников, Н. В. Калинина, М. В. Клюев. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2006. – 260 с.
15. Хрипкова, Л.Н. Кинетика N-ацилирования α -аминокислот 4-нитрофениловым эфиром бензойной кислоты в растворителе вода – 2-пропанол / Л.Н. Хрипкова, Л.В. Курицын, Н.В. Калинина // *Журнал общей химии*. – 2004. – Т. 74, вып. 10. – С. 1665-1668.
16. Курицын, Л.В. Кинетика реакции N-ацилирования глицина и L-пролина 4-нитрофениловым эфиром 4-нитробензойной кислоты в водно-органических средах / Л.В. Курицын, А.Ю. Лебедухо, А.И. Садовников // *Журнал общей химии*. – 2003. – Т. 73, вып. 4. – С. 600-602.
17. Курицын, Л.В. Влияние pH водно-органического растворителя на кинетику N-ацилирования α -аминокислот сложными эфирами бензойной кислоты / Л.В. Курицын, А.И. Садовников, Л.Н. Хрипкова, Н.В. Калинина, Ю.С. Щербакова // *Журнал общей химии*. – 2006. – Т. 75, № 1. – С. 49-53.
18. Хрипкова, Л. Н. Термодинамика диссоциации и кинетика N-ацилирования α -аминокислот 4-нитрофениловым эфиром бензойной кислоты в растворителе вода – пропанол-2: дис... канд. хим. наук: защищена 22.12.03: утв. 09.04.04 / Хрипкова Лариса Николаевна. – Иваново, 2003. – 139 с. – Библиогр.: с. 125-137.
19. Um, I. H. The effect of solvent on reactions of p-nitrophenyl acetate with alicyclic secondary amines and with anionic nucleophiles in MeCN-H₂O mixtures of varying compositions / I.-H. Um, E.H. Shin, D.S. Kwon // *Bull. Korean Chem. Soc.* – 1996. – V. 17, No 3. – P. 234-239.
20. Gutman, V. The donor-acceptor approach to molecular interaction / V. Gutman. - N. Y.: Plenum Press, 1978. – 279 p.
21. Потапов, А. А. Диэлектрические свойства водно-диоксанового раствора / А. А. Потапов // *Журнал общей химии*. – 1998. – Т. 68, вып. 4. – С. 556-561.
22. Ahn-Ercan, G. Structural and dielectric properties of 1,4-dioxane – water mixtures / G. Ahn-Ercan, H. Krienke, G. Schmeer // *J. Mol. Liquids*. – 2006. – V. 129, No 1-2. – P. 75-79.

23. Кустова, Т.П. Реакционная способность этилового эфира лейцина в бензоилировании в водно-органических средах / Т.П. Кустова, Л.Б. Кочетова // Известия вузов. Серия химия и химическая технология. – 2023. – Т. 66, вып.12. – С. 41-48.
24. Кустова, Т.П. Бензоилирование дипептидов Gly-Leu и Ala-Val в водно-органических растворителях / Т.П. Кустова, Л.Б. Кочетова // Известия АН. Серия химическая. – 2024. – Т. 73, № 11. – С. 3335-3341.
25. Кустова, Т. П. N-ацилирование β -аланил- β -аланина нитрофениловыми эфирами бензойной кислоты в растворителе вода-диоксан / Т. П. Кустова, Л.Б. Кочетова // Известия АН. Серия химическая. – 2025. – Т. 74, № 10. – С. 2980-2987.
26. Кочетова, Л.Б. Ацилирование амидов, гидразидов, аминокислот и дипептидов / Л.Б. Кочетова, Т.П. Кустова, Н.В. Калинина. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 163 с.
27. Справочник химика / Под ред. Б. П. Никольского. – М.; Л.: Химия, 1964. – Т. 2. – 1162 с.
28. Свойства органических соединений: справочник / Под ред. А. А. Потехина. – Л.: Химия, 1984. – 520 с.
29. Granovsky, A.A. Firefly version 7.1.G. www <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
30. Курицын, Л.В. Учет различных ионных форм аминокислот при расчете константы скорости N-ацилирования /Л.В. Курицын, Н.В.Калинина // Журнал физической химии. – 1996. – Т. 70, вып. 12. – С. 2168-2170.
31. Кустова, Т.П. Квантовохимическое моделирование специфической сольватации глицина в растворителях вода–1,4-диоксан и вода–пропан-2-ол / Т.П. Кустова, Л.Б. Кочетова, Н.В. Калинина // Журнал общей химии. – 2009. – Т.79, вып.5. – С. 713-718.

REFERENCES

1. Hanuš, L., Shohami, E., Bab, I. & Mechoulam R. (2014) N-Acyl amino acids and their impact on biological processes. *Biofactors*. 40 (4), 381-388.
2. Burstein, S.H., Rossetti, R. G., Yagen, B. & Zurier, R. B. (2000) Oxidative metabolism of anandamide. *Prostaglandins and Other Lipid Mediators*. 61 (1-2), 29-41.
3. Gustafsson, S. B., Lindgren, T., Jonsson, M. & Jacobsson, S. O. P. (2009) Cannabinoid receptor-independent cytotoxic effects of cannabinoids in human colorectal carcinoma cells: synergism with 5-fluorouracil. *Cancer Chemotherapy and Pharmacology*. 63 (4), 691-701.
4. Ikeda, Y., Iguchi, H., Nakata, M., Ioka, R. X., Tanaka, T., Iwasak, S., Magoori, K., Takayasu, S., Yamamoto, T. T., Kodama, T., Yada, T., Sakurai, T., Yanagisawa, M. & Sakai J. (2005) Identification of N-arachidonylglycine, U18666A, and 4-androstene-3,17-dione as novel insulin secretagogues. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 333 (3), 778-786.
5. Dumont, S., Cattuzzato, L., Trouve, G., Chevrot, N. & Stolz, C. (2010) Two new lipoamino acids with complementary modes of action: new prospects to fight out against skin ageing. *International Journal of Cosmetic Science*. 32 (1), 9-27.
6. Waluk, D. P. (2012) *Biosynthesis and physiological functions of N-acyl amino acids: Doctoral thesis*. Stockholm. 58 p.
7. Struhl, K. (1998) Histone acetylation and transcriptional regulatory mechanisms. *Genes and Development*. 12 (5), 599-606.
8. Mashkovskiy, M. D. (2006) *Medicines*. 15th ed. Moscow: New Wave. 1206 p. (In Russian).
9. Budavari, S. (Ed.) (1989) *Merck Index*. 11th ed. N. Y., Merck&Co., Rahway, pp. 1400-1416.
10. Mikhalkin, A.P. (1995) [Production, properties and application of N-acyl- α -amino acids]. *Uspekhi Khimii = Russian Chemical Reviews*. 64 (3), 275-292. (In Russian).
11. Gershkovitch, A.A. & Kibirev, V.K. (1992) *Chemical peptide synthesis*. Kiev: Naukova Dumka. 640 p. (In Russian).
12. Kuritsyn, L.V., Kalinina, N.V. & Kampal, A.K. (1988) [Kinetics of N-acylation of glycine with benzoyl chloride in the solvent water-dioxan]. *Zhurnal organicheskoi khimii = Journal of organic chemistry*. 24 (12), 2562-2567. (In Russian).
13. Kuritsyn, L.V. & Kalinina, N.V. (1994) [Reactivity of amine groups of α -amino acids and dipeptides in reaction with benzoyl chloride in the solvent dioxane water]. *Zhurnal organicheskoi khimii = Journal of organic chemistry*. 30 (5), 723-725. (In Russian).
14. Kuritsyn, L.V., Kustova, T.P., Sadovnikov, A.I., Kalinina, N.V. & Klyuev, M.V. (2006) *Kinetics of acyl transfer reactions*. Ivanovo: Ivanovo State University. 260 с. (In Russian).
15. Khripkova, L.N., Kuritsyn, L.V. & Kalinina, N.V. (2004) [Kinetics of N-acylation of α -amino acids with 4-nitrophenyl ester of benzoic acid in the solvent water – 2-propanol]. *Zhurnal obshchey khimii = Journal of general chemistry*. 74 (10), 1665-1668. (In Russian).

16. Kuritsyn, L.V., Lebedukho, A. Yu. & Sadovnikov, A.I. (2003) [Kinetics of the reaction of N-acylation of glycine and L-proline with 4-nitrophenyl ester of 4-nitrobenzoic acid in water-organic media]. *Zhurnal obshchey khimii = Journal of general chemistry*. 73 (4), 600-602. (In Russian).
17. Kuritsyn, L.V., Sadovnikov, A.I., Khripkova, L.N., Kalinina, N.V. & Shcherbakova Yu.S. (2006) [Influence of pH of water-organic solvent on kinetics of N-acylation of α -amino acids with esters of benzoic acid]. *Zhurnal obshchey khimii = Journal of general chemistry*. 75 (1), 49-53. (In Russian).
18. Khripkova, L.N. (2003) *Thermodynamics of dissociation and kinetics of N-acylation of α -amino acids with 4-nitrophenyl ester of benzoic acid in a water – 2-propanol solvent: diss... Cand. of Chemical Sciences: Ivanovo*. 139 p. (In Russian).
19. Um, I. H., Shin, E.H. & Kwon D.S. (1996) The effect of solvent on reactions of p-nitrophenyl acetate with alicyclic secondary amines and with anionic nucleophiles in MeCN-H₂O mixtures of varying compositions. *Bull. Korean Chem. Soc.* 17 (3), 234-239.
20. Gutman, V. (1978) *The donor-acceptor approach to molecular interaction*. N. Y., Plenum Press. 279 p.
21. Potapov, A. A. (1998) [Dielectrical properties of water-dioxan solution]. *Zhurnal obshchey khimii = Journal of general chemistry*. 68 (4), 556-561. (In Russian).
22. Ahn-Ercan, G., Krienke, H. & Schmeer, G. (2006) Structural and dielectric properties of 1,4-dioxane – water mixtures. *Journal of Molecular Liquids*. 129 (1-2), 75-79.
23. Kustova, T.P. & Kochetova, L.B. (2023) [Reactivity of ethyl ester of leucine in benzylation in water-organic media]. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedeni. Khimia i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*. 66 (12), 41-48. (In Russian).
24. Kustova, T.P. & Kochetova, L.B. (2024) [Benzylation of the dipeptides Gly-Leu and Ala-Val in water-organic solvents]. *Izvestia Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya = Russian Chemical Bulletin*. 73 (11), 3335-3341. (In Russian).
25. Kustova, T.P. & Kochetova, L.B. (2025) [N-acylation of β -alanyl- β -alanine with nitrophenyl esters of benzoic acid in the solvent water-dioxan]. *Izvestia Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya = Russian Chemical Bulletin*. 74 (10), 2980-2987. (In Russian).
26. Kochetova, L.B., Kustova, T.P. & Kalinina, N.V. (2024) *Acylation of amides, hydrazides, amino acids and dipeptides*. Moscow: Direct-Media. 163 p. (In Russian).
27. Nikolsky, B. P. (Ed.). (1964). *Chemist's handbook*. (Vol. 2). Moscow., Leningrad: Khimiya. 1162 p. (In Russian).
28. Potekhin, A.A. (1984) *Properties of organic compounds: handbook*. Leningrad: Khimiya. 520 p.
29. Granovsky, A.A. *Firefly version 7.1.G*. [www http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html](http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html)
30. Kuritsyn, L.V. & Kalinina, N.V. (1996) [Accounting for different ionic forms of amino acids when calculating rate constant of N-acylation]. *Zhurnal fizicheskoy khimii = Journal of physical chemistry*. 70 (12), 2168-2170. (In Russian).
31. Kustova, T.P., Kochetova, L.B. & Kalinina, N.V. (2009) [Quantum chemical modeling of specific solvation of glycine in the solvents water–1,4-dioxan and water–propan-2-ol]. *Zhurnal obshchey khimii = Journal of general chemistry*. 79 (5), 713-718. (In Russian).

THE EFFECT OF WATER-1,4-DIOXANE SOLVENT ON THE KINETICS OF REACTIONS OF α -AMINOACIDS WITH 4-NITROPHENYL ESTER OF ACETIC ACID

L. B. Kochetova, T. P. Kustova

The kinetics of the reactions of Gly, L-Pro, and DL-Val with 4-nitrophenyl acetate in the water (0.671–0.911 mol.%)–1,4-dioxane system was studied. It was found that the reaction rate constants increase nonlinearly with increasing water content in the solvent. Quantum-chemical modeling of solvate complexes of the anionic form of glycine with binary solvent components was performed. It was found that the energies of their HOMO can be used as descriptors of the electronic structure of solvates. It is shown that the nonlinear dependences of the amino acid acylation rate constants on the binary solvent composition are due to the peculiarities of the specific solvation of α -amino acids.

Keywords: kinetics; N-acylation; α -amino acids; aqueous 1,4-dioxane; 4-nitrophenyl acetate; solvation; quantum chemical modeling.

Поступила в редакцию 25.02.2026 г.

Кочетова Людмила Борисовна

доктор химических наук, доцент, профессор кафедры фундаментальной и прикладной химии ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», г. Иваново, РФ.
E-mail: kochetova_lb@mail.ru
ORCID 0000-0001-9609-0757
SPIN-код: 4613-4497
AuthorID 53443

Kochetova Ludmila Borisovna

Doctor of Chemical Sciences, Docent, Professor at the Department of Fundamental and Applied Chemistry, Ivanovo State University, Ivanovo, RF.

Кустова Татьяна Петровна

доктор химических наук, профессор, директор Института математики, информационных технологий и естественных наук, заведующий кафедрой фундаментальной и прикладной химии ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», г. Иваново, РФ.
E-mail: kustovatp@ivanovo.ac.ru
ORCID 0000-0001-5683-6470
SPIN-код: 1331-5782
AuthorID 49254

Kustova Tat'yana Petrovna

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Director of the Institute of Mathematics, Information Technology and Natural Sciences, Head of the Department of Fundamental and Applied Chemistry, Ivanovo State University, Ivanovo, RF.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 591.112

DOI: 10.5281/zenodo.19179454

EDN: MXXRVO

ВЛИЯНИЕ РЫБЬЕГО ЖИРА И ОЗОНИРОВАННОГО РЫБЬЕГО ЖИРА НА ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВОТОКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

© 2026. *А. С. Иванов, А. В. Дерюгина, П. В. Ястребов, Г. А. Бояринов*

Представлены результаты исследования влияния рыбьего жира (РЖ) и озонированного рыбьего жира (ОРЖ с озонидными числами 1500 и 3000, ОРЖ 1500 и ОРЖ 3000 соответственно) на регуляцию микроциркуляции при моделировании физической нагрузки «до отказа». Моделирование физической нагрузки до отказа проводилось путем подвешивания груза массой 10 % от массы крысы на основание хвоста и погружение особи в бассейн до момента отказа от всплытия на поверхность вследствие усталости. Вклад компонентов регуляции сосудистого тонуса получали при анализе ЛДФ-грамм. В результате физическая нагрузка «до отказа» вызывала снижение вклада эндотелиального и миогенного компонента при росте дыхательного и сердечного компонентов. При действии РЖ и ОРЖ на фоне физических нагрузок «до отказа» регистрировалось снижение вклада эндотелиального, нейрогенного и сердечного компонентов регуляции при увеличении вклада миогенного и дыхательного компонентов по сравнению с контрольной группой. Согласно полученным результатам исследования пероральное введение РЖ и в большей степени ОРЖ с озонидным числом 1500 при высокоинтенсивных физических нагрузках способствует оптимизации работы сердца и микроциркуляции.

Ключевые слова: физическая нагрузка; рыбий жир; озонированный рыбий жир; компоненты регуляции сосудистого тонуса; показатель микроциркуляции.

Введение. Возникающие во время физических нагрузок затраты энергетических и пластических резервов организма приводят к формированию физиологических компенсаторных реакций со стороны сердечно-сосудистой системы, приводящих к развитию срочной или долгосрочной адаптации. Наиболее важной частью сердечно-сосудистой системы является система микроциркуляторного русла, обеспечивающая поддержание гомеостаза тканей за счет транскапиллярного обмена [1]. Макро- и микронутриенты, поступающие в организм с пищей, жизненно необходимы для протекания нормального метаболизма клетки и поддержания клеточных мембран в физиологически нормальном состоянии. Длительные и регулярные физические нагрузки сопровождаются усилением работы сердечно-сосудистой системы, усилением процессов окислительного стресса, а также физическими повреждениями мышц. С целью ускорения восстановления организма и развития долговременных адаптаций целесообразно употреблять пищевые добавки, повышающие устойчивость организма к физическим нагрузкам [2–4].

Длинноцепочечные полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), обильно входящие в состав рыбьего жира, оказывают благоприятный эффект на сердечно-сосудистую систему, уменьшают агрегацию тромбоцитов, снижают уровень триглицеридов, усиливают синтез оксида азота (NO), оказывают противовоспалительный эффект на сосудистую стенку, препятствуя образованию атеросклеротических изменений в стенках сосудов [5–9]. Однако на текущий момент вопрос влияния рыбьего жира и его озонированных модификаций на показатели микроциркуляции во время физических нагрузок все еще остается малоизученным, что определяет актуальность исследования. Также не изучены механизмы регуляции

изменений микроциркуляции при физической активности при использовании рыбьего жира и его озонированной формы при повышенных физических нагрузках.

Цель – исследовать влияние рыбьего жира и его озонированных модификаций на показатели регуляции микроциркуляторного тонуса при моделировании физической нагрузки «до отказа».

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось на (n=32) белых крысах линии SD (Sprague Dawley) с массой 235±15 г. Животные содержались в виварии, оборудованном согласно требованиям «Санитарных правил по устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (вивариев)» №1045-73. Исследования проводились в соответствии с правилами проведения работ и использования экспериментальных животных (Приложение к Приказу МЗ СССР №775 от 12.08.77), Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях» от 18 марта 1986 г. и ФЗ РФ «О защите животных от жестокого обращения» от 01.01.1997. Животных содержали в боксах по 4 особи с естественной 12-часовой сменой света и темноты, влажностью воздуха 60 % и его температурой 22 ± 2 °С, со свободным доступом к воде и пище.

Животных разделили на четыре группы по 10 особей в каждой:

- К группе «Контроль» относились животные с моделированной физической нагрузкой, получавшие физ. раствор.
- Группу «РЖ» составили животные с моделированной физической нагрузкой, получавшие перорально рыбий жир.
- Группу «ОРЖ 3000» составили животные с моделированной физической нагрузкой, получавшие перорально озонированный рыбий жир с озонидным числом – 3000.
- Группу «ОРЖ 1500» составили животные с моделированной физической нагрузкой, получавшие перорально препарат озонированного рыбьего жира с озонидным числом 1500.

Озонированный рыбий жир получали путем озонолиза рыбьего жира в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний» г. Москва, протокол испытаний № 20423 от 01.02.2018 г. Озонолиз проводили путем окислительного разрыва двойных связей [10, 11]. Контроль озонированной модификации осуществляли по пероксидному числу (ПЧ, мэкв/кг). Показатель оценивали в соответствии с Фармакопеями. При определении ПЧ в образцах озонированного рыбьего жира дополнительно были включены в условия проведения анализа температура и количество жира. Пероксидные числа, определяемые с такими дополнениями, называют озонидными числами [12]. Пероксидное число возрастает от количества активных форм кислорода. Чем оно выше, тем больше в объекте активных форм кислорода [13].

Моделирование физической нагрузки до отказа проводилось путем подвешивания груза массой 10 % от массы крысы на основание хвоста и погружение особи в бассейн с термокомфортной температурой воды (28 °С) до момента отказа от всплытия на поверхность вследствие выраженного утомления [14]. С целью предупреждения возможной стресс-реакции за 15–20 минут до начала тестирования животных к крысам фиксировали подобранный груз.

В период постнагрузочного восстановления крысы получали перорально исследуемые препараты в зависимости от группы. Исследуемые препараты вводили в дозе 35 мг/кг через рот с помощью зонда 1 раз в сутки в течение 5 дней. Расчет дозы концентрата для крыс производился с учетом коэффициентов межвидового пересчета

[8]. Определение показателей проводили до тестов (исходный), после нагрузочных тестов (4 раза) и после отмены препаратов (на 3 день).

Оценку амплитудно-частотных характеристик проводили лазерным диагностическим аппаратом "ЛАЗМА-СТ" (НПО «Лазма», Россия). Лазерный зонд размещали сразу после моделирования физической нагрузки в области основания хвоста тщательно высушенной полотенцем крысы, длительность записи ЛДФ-граммы составила 8 минут. Компоненты регуляции сосудистого тонуса получали при анализе ЛДФ-грамм. Амплитудно-частотный спектр регистрируемых ЛДФ-грамм был получен встроенным в ПО математическим аппаратом вейвлет-преобразования, позволяющего таким образом оценить вклад каждого компонента модуляции кровотока на уровне микрососудистого русла.

Этапы исследования:

1-й этап покоя – проводили замер исходных показателей.

2-й этап – В первые пять дней до выполнения теста «до отказа» крысы ежедневно получали перорально в исследуемых группах расчетную дозу изучаемого препарата, а в контрольной группе эквивалентное количество физраствора. Накануне проведения теста «до отказа» животных на ночь оставляли без корма при свободном доступе к воде. В день проведения теста «до отказа» (4-ый день) животным за 1 ч до нагрузки перорально вводили в исследуемых группах расчетную дозу изучаемого препарата, а в контрольной группе - эквивалентное количество физраствора.

3-й этап – тест «до отказа» (1-ый нагрузочный тест на 6 день 1 недели кормления).

4-й этап – период постнагрузочного восстановления. Аналогично животные в первые пять дней второй недели получали ежедневно перорально в исследуемых группах расчетную дозу изучаемого препарата, а в контрольной группе эквивалентное количество физраствора.

5-й этап – тест «до отказа» (2-й нагрузочный тест).

6-й этап – период постнагрузочного восстановления.

7-й этап – тест «до отказа» (3-й нагрузочный тест).

8-й этап – период постнагрузочного восстановления.

9-й этап – тест «до отказа» (4-й нагрузочный тест).

10-й этап – период остаточного действия препаратов на исследуемые показатели (после отмены препаратов на 3-й день после 4-го нагрузочного теста).

Полученные данные статистически обработали с использованием пакета электронных таблиц Microsoft Excel. Было рассчитано среднее арифметическое выборочной совокупности и стандартное отклонение по критерию Стьюдента. Различия считали достоверными при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ амплитудно-частотных характеристик микроциркуляции при физической активности «до отказа» выявил снижение вклада эндотелиального компонента на начальных этапах исследования, уменьшение миогенного компонента на всех этапах нагрузочных тестов при росте дыхательного компонента с 3 нагрузочного теста и сердечного компонента с 1 нагрузочного теста (рис. 1–5). На рисунках используются следующие обозначения: 1 – после 1 нагрузочного теста, 2 – после 2 нагрузочного теста, 3 – после 3 нагрузочного теста, 4 – после 4 нагрузочного теста, 5 – после отмены препаратов в исследуемых группах. К – контроль, РЖ – рыбий жир, ОРЖ 3000 – озонированный рыбий жир, с озонидным числом 3000; ОРЖ 1500 – озонированный рыбий жир, с озонидным числом 1500; «*» – статистически значимые различия к исходным показателям ($p \leq 0,05$), «#» – статистически значимые различия к контрольной группе ($p \leq 0,05$), «**» – статистически значимые различия РЖ к ОРЖ, 1500 ($p \leq 0,05$); 100 % – значения исходных показателей.

Использование РЖ и ОРЖ показало сохранение, так же как и в контрольной группе, пониженных показателей, характеризующих вклад эндотелиального компонента (рис. 1). Абсолютные значения в группах при использовании РЖ и ОРЖ 1500 были ниже, чем в контрольной группе после всех нагрузочных тестов на 53 % и 76 % соответственно, а также сохранялся пониженным на 55 % после отмены препаратов только в группе с ОРЖ 1500.

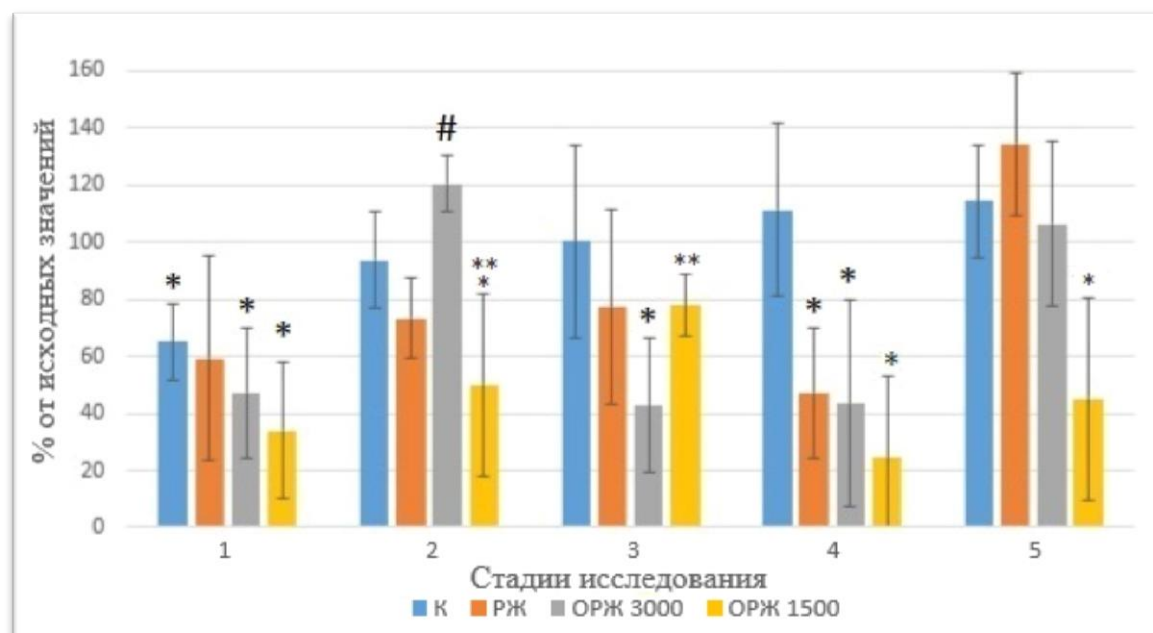


Рис. 1. Динамика изменения вклада эндотелиального компонента у групп по отношению к исходному показателю до воздействия.

Физическая нагрузка не оказала статистически значимого влияния на нейрогенный показатель у контрольной группы на протяжении всего эксперимента (рис. 2). Остальные группы характеризовались снижением вклада относительно исходных значений, что сохранялось и после отмены препаратов на 34 %, 32 % и 30 % в группах РЖ, ОРЖ 3000 и ОРЖ 1500 соответственно.

Сниженный вклад миогенного компонента в контрольной группе нивелировался использованием РЖ и ОРЖ (рис. 3). Действие РЖ и ОРЖ 1500 привело к наибольшему росту показателя в течение эксперимента. Действие ОРЖ 3000 привело к значительному снижению показателя на 24 % после отмены препарата относительно контрольной группы.

Изменения дыхательного компонента характеризовались стабильным повышением показателя в среднем на 34 % при использовании ОРЖ 1500 на протяжении всех этапов исследования, при использовании ОРЖ 3000 – ростом показателя на 61 % после 3 нагрузочного теста и при действии РЖ – после 4 нагрузочного теста на 40 %, с восстановлением до исходного значения после отмены препаратов при действии РЖ и ОРЖ 3000 (рис. 4).

Вклад сердечного компонента сразу после начала нагрузочного теста возрос во всех группах, однако абсолютные значения были различные (рис. 5). Действие РЖ, ОРЖ 1500 и ОРЖ 3000 характеризовалось менее выраженным увеличением показателя относительно группы контроля. На всех этапах нагрузочных тестов наиболее эффективным в восстановлении показателя были РЖ и ОРЖ 1500 в среднем на 45 % и 40 % соответственно.

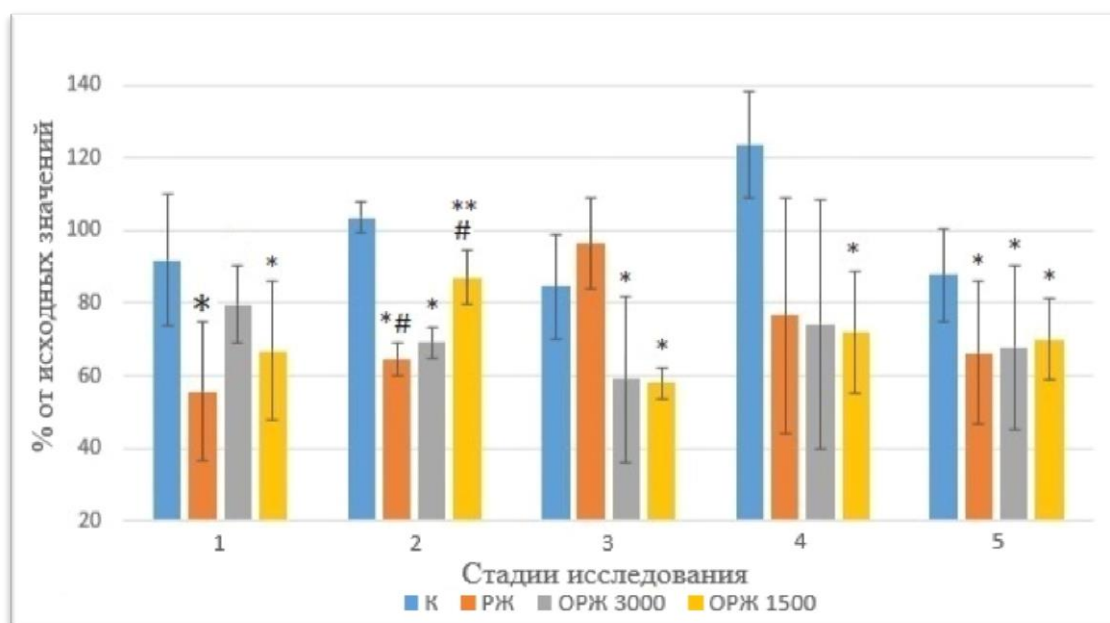


Рис. 2. Динамика изменения вклада нейрогенного компонента у групп по отношению к исходному показателю до воздействия.

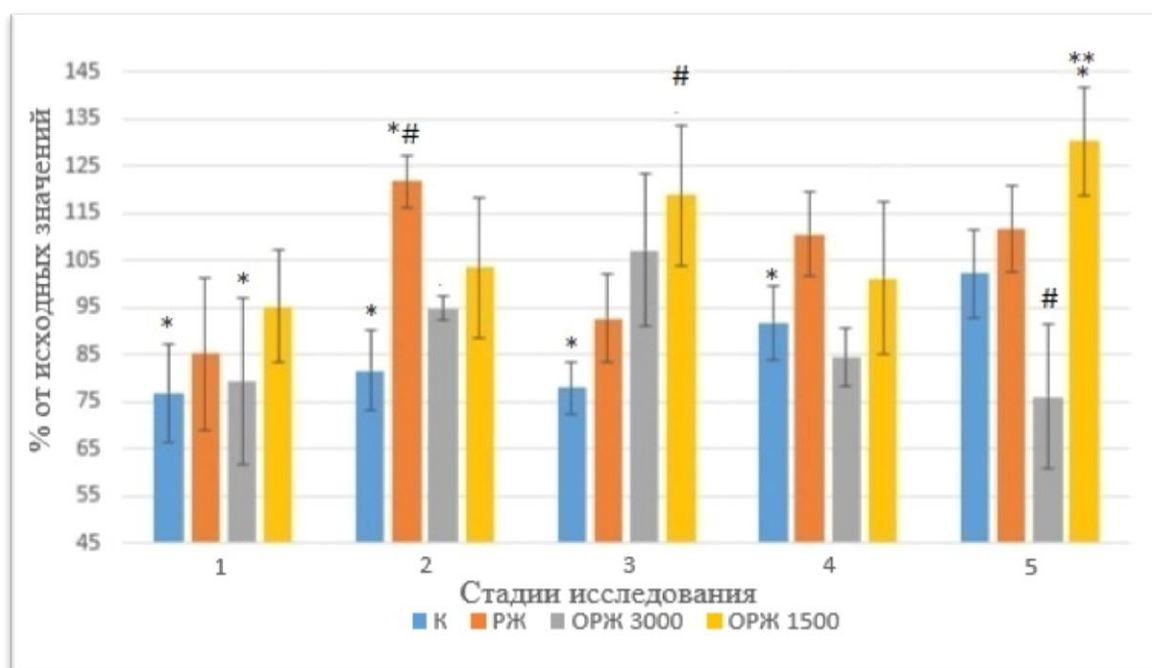


Рис. 3. Динамика изменения вклада миогенного компонента у групп по отношению к исходному показателю до воздействия.

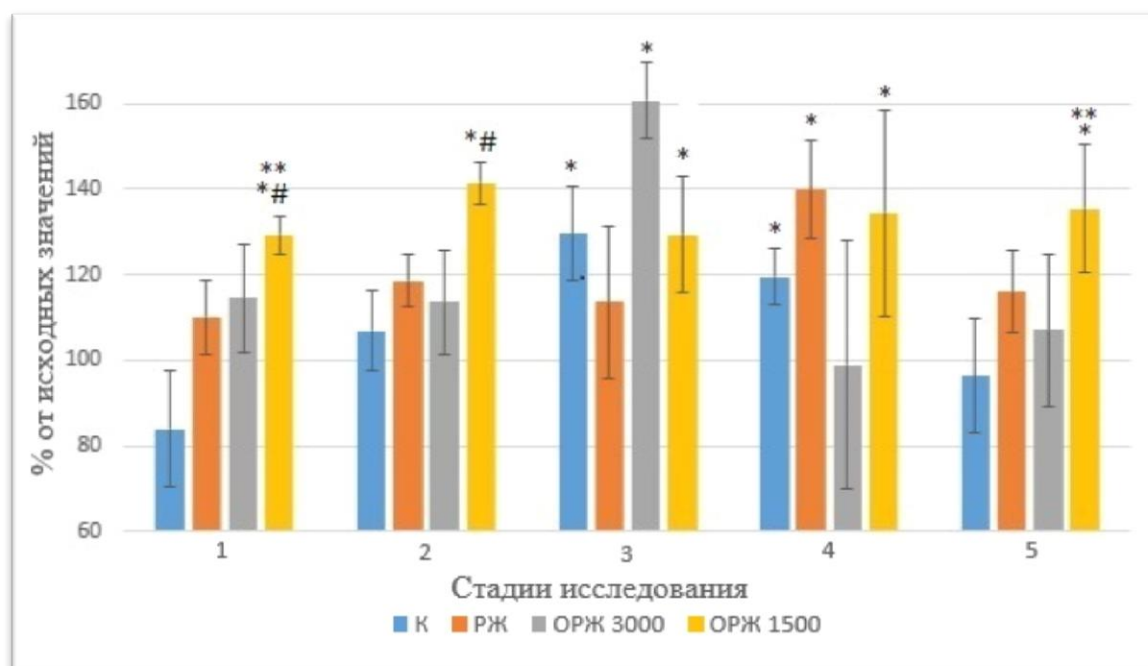


Рис. 4. Динамика изменения вклада дыхательного компонента у групп по отношению к исходному показателю до воздействия.

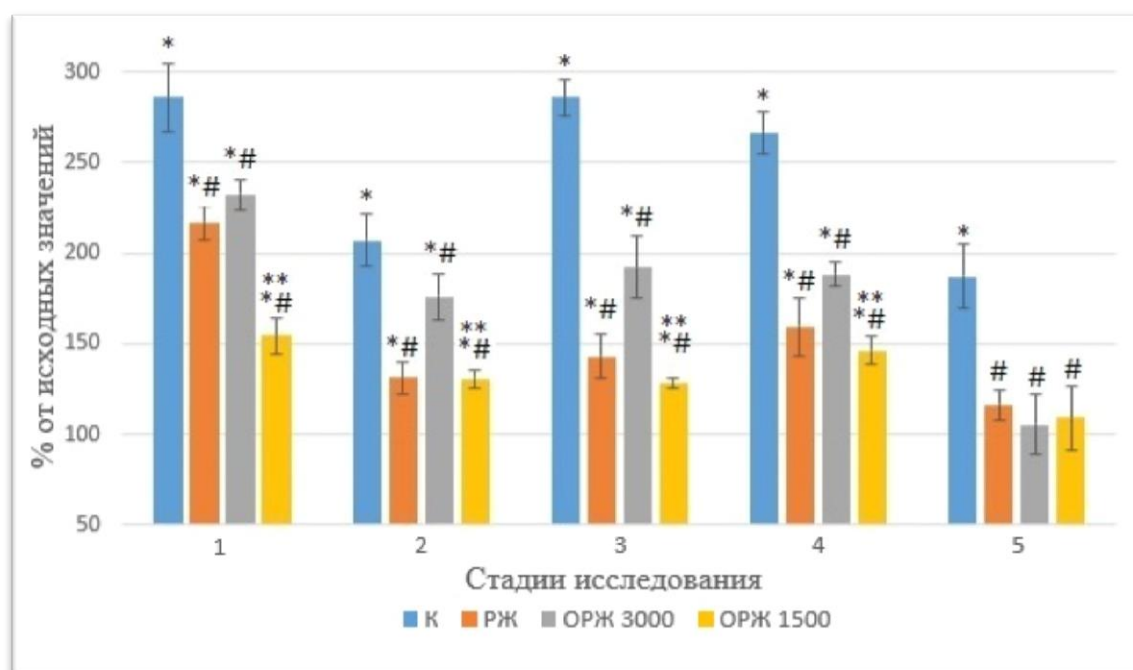


Рис. 5. Динамика изменения вклада сердечного компонента у групп по отношению к исходному показателю до воздействия.

Анализ результатов спектрального анализа свидетельствует о снижении вклада эндотелиального и нейрогенного компонентов регуляции при увеличении вклада миогенного компонента регуляции кровотока при использовании РЖ и ОРЖ на фоне физических нагрузок «до отказа». Поскольку природа эндотелиального компонента связана в большей степени с действием NO, нейрогенного – с активностью

адренорецепторов [10, 15, 16] понижение вклада выявленных компонентов, по всей видимости, компенсируется повышением вклада миогенного компонента, что, в свою очередь, направлено на поддержание оптимального тонуса сосудов за счет повышения мышечного сопротивления [15, 17]. В противном случае уменьшение тонуса резистивных сосудов и снижение вклада симпатических вазомоторных волокон могли бы уменьшить эффективность микрогемодиализации. Величина сердечного компонента восстанавливалась к исходным значениям в группах РЖ и ОРЖ 1500, что свидетельствует о снижении величины просвета и тонуса крупных артериол [17]. При этом следует отметить перестройку функциональной активности организма на фоне физической нагрузки с преобладанием надсегментарного контура регуляции, тогда как использование РЖ и ОРЖ снижало нагрузку на сердечный компонент [18].

Выявленные механизмы действия РЖ и ОРЖ, вероятно, обусловлены комплексным влиянием полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) рыбьего жира. Известно, что ПНЖК принимают участие в активности потенциалзависимых кальциевых и натриевых ионных каналов миоцитов, формируя антиаритмический эффект, и усиливают тонус блуждающего нерва [19, 20]. При этом озонированные ПНЖК, встраиваясь в мембрану клеток, оказывают кардиопротекторное действие, облегчают отдачу кислорода эритроцитами и регулируют баланс про- и антиоксидантных систем клетки. На фоне сверхнагрузок и усиления окислительного стресса благоприятно будет сказываться повышение активности антиоксидантной системы вследствие образования гидрокси-гидропероксидов из озонированных жирных кислот [9, 21–24]. Таким образом, при использовании РЖ и в большей степени ОРЖ 1500 наблюдается улучшение кровотока в микроциркуляторном русле, что способствует улучшению оксигенации ткани и органов.

Выводы. Действие РЖ и в большей степени ОРЖ 1500 вызывало снижение эндотелиального, нейрогенного и сердечного компонентов регуляции при увеличении вклада миогенного и дыхательного компонентов по сравнению с контрольной группой, в которой регистрировалось снижение вклада эндотелиального и миогенного компонента при росте дыхательного и сердечного компонентов на фоне физической активности «до отказа».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов С.Ю., Диндяев С.В. Сердечно-сосудистая система : Методическое пособие. – 2000. – С. 17.
2. Мельникова Н.В., Егорычева Е.В., Чернышёва И.В., Шлемова М.В. Влияние физических тренировок на кровь и на кровеносную систему // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 5-3. – С. 454–455.
3. Михайлов П.В., Муравьев А.В., Осетров И.А., Муравьев А.А. Возрастные изменения микроциркуляции: роль регулярной физической активности // Научные результаты биомедицинских исследований. – 2019. – № 3. – С. 82–91.
4. Блажко А.А., Шахматов И.И., Киселев В.И., Ковалев И.В. Предотвращение микроциркуляторных нарушений у крыс при сверхпороговой физической нагрузке с использованием продуктов пантового оленеводства // Казанский медицинский журнал. – 2018. – № 6. – С. 942–946.
5. Колупаева Е.А., Беляева Л.М. Современный взгляд на рыбий жир // Медицинские новости. – 2013. – № 10 (229). – С. 40–42.
6. Виноградская О. Омега-3 рыбий жир и омега-3 жирные кислоты в профилактике сердечно-сосудистых заболеваний: миф или реальность? // Актуальная эндокринология. – 2015. – № 8. – С. 2.
7. Кушнир С.Н., Сиренко Ю.Н. Влияние омега-3 полиненасыщенных жирных кислот на функциональные свойства сосудов у больных с артериальной гипертензией // Артериальная гипертензия. – 2012. – № 4 (24). – С. 55–63.

8. Конь И.Я., Шилина Н.М., Коростелева М.М., Буданцева С.В. Исследование влияния рыбьего жира как источника $\Omega 3$ полиненасыщенных жирных кислот на когнитивные функции дошкольников 5-6 лет // Педиатрия. Журнал им. Г.Н. Сперанского. – 2009. – № 1. – С. 84–88.
9. Дерюгина А.В., Бояринов Г.А., Симутис И.С., Бояринова Л.В., Азов Н.А. Морфологические и метаболические показатели эритроцитов при обработке озоном эритроцитной массы // Общая реаниматология. – 2018. – № 1. – С. 40–49.
10. De Caterina R., Cybulsky M.I., Clinton S.K., Gimbrone M.A. Jr, Libby P. The omega-3 fatty acid docosahexaenoate reduces cytokine-induced expression of proatherogenic and proinflammatory proteins in human endothelial cells // *Arterioscler Thromb.* – 1994. – Vol. 14, No 11. – P. 1829–1836. – DOI: 10.1161/01.atv.14.11.1829.
11. Criegee R. Mechanism of Ozonolysis // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* – 1975. – Vol. 14. – P. 745–752. – DOI: 10.1002/anie.197507451.
12. Li L., Mac-Mary S., Marsaut D., Sainthillier J.M., Nouveau S., Gharbi T., de Lacharriere O., Humbert P. Age-related changes in skin topography and microcirculation // *Arch Dermatol Res.* – 2006. – Vol. 297, No 9. – P. 412–416.
13. Перетягин С.П., Гордцов А.С., Соловьёва А.Г. и др. Влияние низкочастотного электроимпульсного воздействия на физико-химические показатели и биологическую активность крема, содержащего активные формы кислорода // *Биорадикалы и антиоксиданты.* – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 57–64.
14. Якимович И.Ю., Гусакова С.В., Котловский М.Ю., Подрезов И.К., Иванов В.В., Васильев В.Н., Портнова Н.А., Прокопьева А.В., Чурин А.А., Дыгай А.М. Поведенческие реакции белых крыс в тесте «открытое поле» при воздействии регулярной физической нагрузки разного характера // *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины.* – 2019. – № 3. – С. 48–51.
15. Billman G.E., Kang J.X., Leaf A. Prevention of sudden cardiac death by dietary pure omega-3 polyunsaturated fatty acids in dogs // *Circulation.* – 1999. – Vol. 99, № 18. – P. 2452–2457.
16. Shimokawa H., Vanhoutte P.M. Dietary omega 3 fatty acids and endothelium-dependent relaxations in porcine coronary arteries // *Am J Physiol.* – 1989. – Vol. 256, № 4 Pt 2. – P. H968–H973. – DOI: 10.1152/ajpheart.1989.256.4.H968.
17. Чужан Е.Н., Ананченко М.Н. Индивидуально-типологические особенности процессов микроциркуляции: влияние низкоинтенсивного миллиметрового излучения // *Учёные записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: Биология. Химия.* – 2009. – Т. 22, № 4. – С. 236–254. – EDN: XHSMHR.
18. Bokeria O.L., Kuular A.M. Influence of low-intensity electromagnetic fields on endothelial function in patients with chronic heart failure // *Saratov Journal of Medical Scientific Research.* – 2014. – Vol. 10, No 1. – P. 86–92.
19. Visconti L.M., Cotter J.A., Schick E.E. et al. Impact of varying doses of omega-3 supplementation on muscle damage and recovery after eccentric resistance exercise // *Metabol Open.* – 2021. – Vol. 12. – P. 100133. – DOI: 10.1016/j.metop.2021.100133.
20. Christensen J.H., Schmidt E.B. Autonomic nervous system, heart rate variability and n-3 fatty acids // *J Cardiovasc Med (Hagerstown).* – 2007. – Vol. 8, Suppl 1. – P. S19–S22. – DOI: 10.2459/01.JCM.0000289276.10675.a1. – PMID: 17876192.
21. Бояринов Г.А., Симутис И.С., Никольский В.О., Дерюгина А.В., Бояринова Л.В., Гордцов А.С., Кузнецов А.Б. Роль трансфузии озонированной эритроцитной массы в восстановлении морфологических изменений миокарда при кровопотере // *Общая реаниматология.* – 2018. – № 3. – С. 20–29.
22. Литвин Ф.Б., Голощапова С.С., Аверьянов М.А., Мартынов С.В., Жигало В.Я., Аносов И.П. Влияние кратковременного применения экстракта лимонника китайского на микроциркуляцию крови у спортсменов // *Вестник БГУ.* – 2013. – № 4. – С. 5.
23. Лисицына Т.А. и др. Окислительный стресс в патогенезе антифосфолипидного синдрома // *Вестник РАМН.* – 2004. – № 7. – С. 19–23.
24. Лебедев В.В. Супероксидная теория патогенеза и терапии иммунных расстройств // *Вестник РАМН.* – 2002. – № 4. – С. 34–40.

REFERENCES

1. Vinogradov, S.Yu., & Dindyaev, S.V. (2000). *Serdechno-sosudistaya sistema : Metodicheskoe posobie* [Cardiovascular system : A Methodological Guide]. (In Russian).
2. Melnikova, N.V., Egorycheva, E.V., Chernyshova, I.V., & Shlemova, M.V. (2015). *Vliyanie fizicheskikh trenirovok na krov' i na krovenosnyuyu sistemu* [Influence of physical training on blood and the circulatory system]. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik = International Student Scientific Bulletin.* 5-3, 454-455. (In Russian).

3. Mihajlov, P.V., Muravyov, A.V., Osetrov, I.A., & Muravyov, A.A. (2019). Vozrastnye izmeneniya mikrocirkulyacii: rol' regul'arnoj fizicheskoy aktivnosti [Age-related changes in microcirculation: the role of regular physical activity]. *Nauchnye rezultaty biomeditsinskih issledovanij = Research Results in Biomedicine*. 3, 82-91. (In Russian).
4. Blazhko, A.A., Shakhmatov, I.I., Kiselev, V.I., & Kovalev, I.V. (2018). Predotvrashchenie mikrocirkulyatornyh narushenij u krysv pri sverhporogovoj fizicheskoy nagruzke s ispol'zovaniem produktov pantovogo olenevodstva [Prevention of microcirculatory disorders in rats during supramaximal physical exertion using antler reindeer products]. *Kazanskij medicinskij zhurnal = Kazan Medical Journal*. 6, 942-946. (In Russian).
5. Kolupaeva, E.A., & Belyaeva, L.M. (2013). Sovremennyy vzglyad na rybij zhir [Modern view on fish oil]. *Medicinskie novosti = Medical News*. 10 (229), 40-42. (In Russian).
6. Vinogradskaya, O. (2015). Omega-3 rybij zhir i omega-3 zhirnye kisloty v profilaktike serdechno-sosudistyh zabolevanij: mif ili real'nost'? [Omega-3 fish oil and omega-3 fatty acids in the prevention of cardiovascular diseases: myth or reality?]. *Aktual'naya endokrinologiya = Current Endocrinology*. 8, 2. (In Russian).
7. Kushnir, S.N., & Sirenko, Yu.N. (2012). Vliyanie omega-3 polinenasyshchennyh zhirnyh kislot na funktsional'nye svoystva sosudov u bol'nyh s arterial'noj gipertenziej [Effect of omega-3 polyunsaturated fatty acids on vascular function in patients with arterial hypertension]. *Arterial'naya gipertenziya = Hypertension*. 4 (24), 55-63. (In Russian).
8. Kon', I.Ya., Shilina, N.M., Korosteleva, M.M., & Budantseva, S.V. (2009). Issledovanie vliyaniya ryb'ego zhira kak istochnika $\Omega 3$ polinenasyshchennyh zhirnyh kislot na kognitivnye funktsii doshkol'nikov 5-6 let [Study of the effect of fish oil as a source of $\Omega 3$ polyunsaturated fatty acids on cognitive functions of preschoolers aged 5-6 years]. *Pediatrics. Zhurnal im. G. N. Speranskogo = Pediatrics. Journal named after G. N. Speransky*. 1, 84-88. (In Russian).
9. Deryugina, A.V., Boyarinov, G.A., Simutis, I.S., Boyarinova, L.V., & Azov, N.A. (2018). Morfologicheskie i metabolicheskie pokazateli eritrocitov pri obrabotke ozonom eritrocitnoj massy [Morphological and metabolic parameters of erythrocytes during ozone treatment of red blood cell mass]. *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatology*. 1, 40-49. (In Russian).
10. De Caterina, R., Cybulsky, M.I., Clinton, S.K., Gimbrone, M.A. Jr, & Libby, P. (1994). The omega-3 fatty acid docosahexaenoate reduces cytokine-induced expression of proatherogenic and proinflammatory proteins in human endothelial cells. *Arterioscler Thromb.* 14 (11), 1829-1836. doi: 10.1161/01.atv.14.11.1829. PMID: 7524649.
11. Criegee, R. (1975). Mechanism of Ozonolysis. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 14, 745-752. doi: 10.1002/anie.197507451.
12. Li, L., Mac-Mary, S., Marsaut, D., Sainthillier, J.M., Nouveau, S., Gharbi, T., de Lacharriere, O., & Humbert, P. (2006). Age-related changes in skin topography and microcirculation. *Arch Dermatol Res*. 297 (9), 412-416.
13. Peretyagin, S.P., Gordetsov, A.S., Solov'eva, A.G., et al. (2017). Vliyanie nizkochastotnogo elektroimpul'snogo vozdeystviya na fiziko-himicheskie pokazateli i biologicheskuyu aktivnost' kremov, sodershashchih aktivnye formy kisloroda [The effect of low-frequency electrical impulse exposure on physicochemical parameters and biological activity of creams containing reactive oxygen species]. *Bioradikaly i antioksidanty = Bioradicals and Antioxidants*. 4 (4), 57-64. (In Russian).
14. Yakimovich, I.Yu., Guskova, S.V., Kotlovskij, M.Yu., Podrezov, I.K., Ivanov, V.V., Vasil'ev, V.N., Portnova, N.A., Prokop'eva, A.V., Churin, A.A., & Dygaj, A.M. (2019). Povedencheskie reakcii belyh krysv v teste "otkrytoe pole" pri vozdeystvii regul'arnoj fizicheskoy nagruzki raznogo haraktera [Behavioral responses of white rats in the open field test under the influence of regular physical activity of different types]. *Krymskij zhurnal eksperimental'noj i klinicheskoy mediciny = Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 3, 48-51. (In Russian).
15. Billman, G.E., Kang, J.X., & Leaf, A. (1999). Prevention of sudden cardiac death by dietary pure omega-3 polyunsaturated fatty acids in dogs. *Circulation*. 99 (18), 2452-2457.
16. Shimokawa, H., & Vanhoutte, P.M. (1989). Dietary omega 3 fatty acids and endothelium-dependent relaxations in porcine coronary arteries. *Am J Physiol*. 256 (4 Pt 2), H968-H973. doi: 10.1152/ajpheart.1989.256.4.H968. PMID: 2539756.
17. Chuyan, E.N., & Ananchenko, M.N. (2009). Individual'no-tipologicheskie osobennosti processov mikrocirkulyacii: vliyanie nizkointensivnogo millimetrovogo izlucheniya [Individual-typological features of microcirculation processes: influence of low-intensity millimeter radiation]. *Uchyonye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya: Biologiya. Himiya = Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Biology. Chemistry*. 22 (4), 236-254. EDN: XHSMHR. (In Russian).

18. Bokeria, O.L., & Kuular, A.M. (2014). Influence of low-intensity electromagnetic fields on endothelial function in patients with chronic heart failure. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 10 (1), 86-92.
19. Visconti, L.M., Cotter, J.A., Schick, E.E., et al. (2021). Impact of varying doses of omega-3 supplementation on muscle damage and recovery after eccentric resistance exercise. *Metabol Open*. 12, 100133. doi: 10.1016/j.metop.2021.100133.
20. Christensen, J.H., & Schmidt, E.B. (2007). Autonomic nervous system, heart rate variability and n-3 fatty acids. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*. 8 Suppl 1, S19-22. doi: 10.2459/01.JCM.0000289276.10675.a1. PMID: 17876192.
21. Boyarinov, G.A., Simutis, I.S., Nikol'skij, V.O., Deryugina, A.V., Boyarinoва, L.V., Gordetsov, A.S., & Kuznetsov, A.B. (2018). Rol' transfuzii ozonirovannoj eritrocitnoj massy v vosstanovlenii morfologicheskikh izmenenij miokarda pri krvopotere [The role of transfusion of ozonized red blood cells in the recovery of myocardial morphological changes in blood loss]. *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatology*. 3, 20-29. (In Russian).
22. Litvin, F.B., Goloshchapova, S.S., Aver'yanov, M.A., Martynov, S.V., Zhigalo, V.Ya., & Anosov, I.P. (2013). Vliyanie kratkovremennogo primeneniya ekstrakta limonnika kitajskogo na mikrocirkulyaciyu krovi u sportsmenov [Effect of short-term use of Schisandra chinensis extract on blood microcirculation in athletes]. *Vestnik BGU = BSU Bulletin*. 4, 5. (In Russian).
23. Lisitsyna, T.A., et al. (2004). Okislitel'nyj stress v patogeneze antifosfolipidnogo sindroma [Oxidative stress in the pathogenesis of antiphospholipid syndrome]. *Vestnik RAMN = Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 7, 19-23. (In Russian).
24. Lebedev, V.V. (2002). Superoksidnaya teoriya patogeneza i terapii immunnyh rasstrojstv [Superoxide theory of pathogenesis and therapy of immune disorders]. *Vestnik RAMN = Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 4, 34-40. (In Russian).

THE EFFECT OF FISH OIL AND OZONATED FISH OIL ON BLOOD FLOW MICROCIRCULATION PARAMETERS DURING MODELED PHYSICAL EXERCISE

A. S. Ivanov, A. V. Deryugina, P. V. Yastrebov, G. A. Boyarinov

The article presents the results of a study on the effect of fish oil (FO) and ozonated fish oil (with ozonide numbers of 1500 and 3000) on microcirculation regulation during modeling of exhaustive physical exercise. The exhaustive physical exercise was modeled by suspending a load equivalent to 10% of the rat's body weight to the base of its tail and immersing the animal in a pool until it refused to surface due to fatigue. The contributions of vascular tone regulation components were obtained by analyzing LDF-grams. As a result, the exhaustive physical exercise caused a decrease in the contribution of the endothelial and myogenic components with an increase in the respiratory and cardiac components. Under the influence of FO and OFO against the background of exhaustive physical exercise, a decrease in the contribution of the endothelial, neurogenic, and cardiac regulatory components was recorded, with an increase in the contribution of the myogenic and respiratory components compared to the control group. According to the obtained results, oral administration of FO, and to a greater extent OFO with an ozonide number of 1500, during high-intensity physical exercise contributes to the optimization of heart function and microcirculation.

Keywords: physical exercise; fish oil; ozonated fish oil; vascular tone regulation components; microcirculation parameter

Поступила в редакцию 09.03.2026 г.

Иванов Антон Сергеевич

Аспирант кафедры физиологии и анатомии,
Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: anton0000-mar@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-9537-5764

Ivanov Anton Sergeevich

Postgraduate student of the Department of Physiology
and Anatomy of N.I. Lobachevsky National Research
University, Nizhny Novgorod, Russia

Дерюгина Анна Вячеславовна

Доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры физиологии и анатомии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия.

E-mail: derugina69@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8812-8559

SPIN-код: 7974-4600

Deryugina Anna Vyacheslavovna

Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor, Department of Physiology and Anatomy, N.I. Lobachevsky National Research University, Nizhny Novgorod, Russia.

Ястребов Павел Викторович

Генеральный директор, Нижегородская областная фармация, Нижний Новгород, Россия;

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия.

E-mail: kfg.unn@mail.ru

ORCID: 0009-0008-0443-9527

Yastrebov Pavel Viktorovich

General Director, Nizhny Novgorod Regional Pharmacy, Nizhny Novgorod, Russia Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia.

Бояринов Геннадий Андреевич

Доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры физиологии и анатомии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

профессор кафедры анестезиологии, реаниматологии и трансфузиологии, Приволжский исследовательский медицинский университет

министерства здравоохранения Российской Федерации, Нижний Новгород, Россия.

E-mail: kfg.unn@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7557-0564

SPIN-код: 6463-4680

Boyarinov Gennady Andreevich

Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor at the Department of Physiology and Anatomy, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia;

Professor at the Department of Anesthesiology, Intensive Care and Transfusiology, Privolzhsky Research Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Nizhny Novgorod, Russia.

МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕРНОЗЕМОВ НЕИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПАШНИ КАНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

© 2026. *Т. А. Иванова, Н. Л. Кураченко, М. С. Кондакова*

В статье рассматриваются результаты исследований по оценке морфогенетических признаков черноземов Канской лесостепи – одного из крупнейших природных округов сельскохозяйственной зоны Красноярского края. Проведена статистическая оценка мощности генетических горизонтов на подтиповом уровне, показана типология структуры по профилю почв и особенности распределения линии вскипания от карбонатов. Установлено, что в почвах отмечается тренд восстановления морфологических признаков в направлении их естественного состояния. По комплексу морфологических признаков черноземы оподзоленные и выщелоченные региона являются ближайшим резервом для повторного освоения их в пашню.

Ключевые слова: черноземы, неиспользуемая пашня, морфология почвы, генетические горизонты, пространственная вариабельность, почвенная структура, линия вскипания.

Введение. Черноземы, подверженные длительной антропогенной нагрузке сохраняют основные агрономически важные свойства, однако при этом происходят морфологические изменения ряда признаков, которые являются основой описания профиля, таксономии и качественной оценки почв агрочерноземов. Происходит процесс конвертации свойств черноземов, изменяется мощность гумусовых горизонтов, происходит его выравнивание и уменьшение [1–6]. Из-за антропогенной нагрузки изменяется выщелоченность карбонатного профиля, происходит поднятие карбонатов к поверхности, меняется характер структурной организации черноземов [7]. Морфология почвенного профиля, являясь динамичной величиной, отражает особенности почвообразовательного процесса [8]. По мнению авторов работы [9], незначительное количество работ по проблемам пространственно-временной трансформации морфологических свойств почв в земледелии определяют важность этого метода исследования для качественно-количественной оценки продуктивности почв. Данные об изменении морфологических параметров дают возможность осуществлять временную и пространственную коррекцию агроприемов (севооборот, применение агрохимикатов, посев покровных культур и др.), что является основой сохранения плодородия черноземов.

Одним из важных направлений исследований последних десятилетий является изучение постагрогенных трансформаций в почвах, неиспользуемых в пашне по разным причинам [10]. Морфометрические параметры почв, находящиеся длительное время вне антропогенной нагрузки, могут трансформироваться под влиянием изменения общих климатических условий, восстановлением растительности на залежах [11, 12]. В Канской лесостепи, являющейся самой крупной из всех лесостепных регионов Красноярского края, неиспользуемая пашня оценивается величиной 345,7 тыс. га, или 37,9 % [13]. В структуре залежных земель доминируют участки, неиспользуемые под пашню более 10 лет (207,497 тыс. га, или 60 %). Черноземы являются доминирующими почвами в структуре пахотных и неиспользуемых земель Канской лесостепи (68,3 %). В современных условиях возникает объективная необходимость обследования почв неиспользуемой пашни с целью оценки их плодородия и введения в активный сельскохозяйственный оборот.

Цель исследования заключалась в количественной оценке морфогенетических признаков черноземов неиспользуемой пашни Канской лесостепи.

Материалы и методы исследования. Исследования по оценке морфогенетических признаков черноземов неиспользуемой пашни Канской лесостепи проведены в 2022–2024 гг. Соляным филиалом ФГБУ «РосАгрохимслужба» в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства [14].

Объектом исследования явились наиболее распространенные подтипы черноземов (оподзоленные, выщелоченные, обыкновенные) неиспользуемой пашни Канской лесостепи, являющейся восточной окраиной земледельческой зоны Красноярского края. Во время маршрутно-полевых исследований на типичных участках местности в границах 9-ти административных районов (Абанский, Дзержинский, Иланский, Ирбейский, Нижне-Ингашский, Партизанский, Тасеевский, Саянский и Уярский) было заложено 54 разреза на глубину 100–120 см. Объем выборки для черноземов оподзоленных составил – 13 разрезов, выщелоченных – 38 и обыкновенных – 3. Залежные экосистемы не использовались в пашне в течение 10–25 лет. Морфологическое описание почв проведено по генетическим горизонтам, установлена классификационная принадлежность почв. Для характеристики распределений мощности горизонтов подтипов черноземов в пространстве вычисляли: среднее (X_{cp}), доверительный интервал (Sx), минимальное и максимальное значение (Lim), коэффициент вариации (Cv), коэффициент асимметрии (As) и эксцесса (Ex). Принятая в исследованиях типология почвенной структуры основана на классификации С.А. Захарова [15].

Результаты исследований и их обсуждение. Мощность почвы как цельное природное образование, включающее всю совокупность генетических горизонтов, является важнейшим индикатором состояния плодородия почв [16]. Деградационные процессы при агрогенном использовании почв приводят к «срабатыванию» почвенного профиля и снижению его потенциальной мощности [17]. Длительное постагрогенное восстановление на залежи направлено на приведение почвы, близкое к целинным условиям. Оценка морфологии профилей черноземов, функционирующих длительно в условиях залежи, показала различия в мощности генетических горизонтов на подтиповом уровне (табл. 1).

Таблица 1

Статистические показатели мощности генетических горизонтов черноземов, см

Горизонт	n	$X_{cp} \pm Sx$	Lim	As	Ex	$Cv, \%$
чернозем оподзоленный						
A ₁	13	29±5,7	16–54	1,15	3,39	32
A ₁ A ₂	13	23±5,4	13–36	0,29	-1,63	36
A ₂ B	12	16±3,9	9–30	0,91	1,25	38
B	13	24±5,2	7–39	-0,75	0,87	34
чернозем выщелоченный						
A	38	29±3,1	12–55	0,63	0,59	32
AB	37	18±2,6	6–43	1,35*	2,90*	44
B	38	25±5,1	7–58	0,93	0,13	55
Bк	38	26±3,5	6–49	0,43	0,46	36
чернозем обыкновенный						
A	3	21±14,9	15–27	–	–	29
ABк	3	14±19,0	12–15	–	–	15
Bк	3	33±12,4	28–38	–	–	15

Примечание: X_{cp} – среднее значение; Sx – доверительный интервал; Lim – предельные значения; As – коэффициент асимметрии; Ex – коэффициент эксцесса; Cv – коэффициент варьирования; * – достоверные значения.

В представленной выборке черноземы оподзоленные и выщелоченные неиспользуемой пашни Канской лесостепи являлись среднеспособными видами, черноземы обыкновенные – маломощными. Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта в черноземах оподзоленных, встречающихся по северным склонам и микропонижениям, в среднем составляла 29 см, изменяясь в пределах исследуемой территории от 16 до 54 см ($C_v = 32\%$). Гумусово-элювиальный гор. A_1A_2 и иллювиальный гор. В характеризовались близкой величиной по мощности (23–24 см). В пределах почвенных профилей этого подтипа практически всегда выделялся гор. A_2B со среднестатистической мощностью 16 см.

В черноземах выщелоченных, занимающих междуречные водораздельные увалы, минимальное варьирование мощности генетических горизонтов выявлено для гумусово-аккумулятивного гор. А. При средней его мощности 29 см коэффициент вариации показателя в пространстве не превышал 32%. Наибольшая пространственная неоднородность мощности характерна для горизонтов АВ и В. Переходный гор. АВ с преобладанием гумусовой окраски и часто языковатой нижней границей являлся высоко варьирующим с мощностью от 6 до 43 см ($C_v = 44\%$). В распределении этого горизонта установлена выраженная правая асимметрия ($A_s = 1,35$) и значимый эксцесс ($E_x = 2,90$). Это позволило утверждать, что в основной части объема выборки мощность этого горизонта в большинстве случаев выше среднего. Языковатость нижней части гумусового горизонта черноземов выщелоченных связана с образованием трещин вследствие сильного промерзания почв. Это явление обусловлено резким континентальным климатом. Не только промерзание зимой, но и пересыхание летом приводят к растрескиванию почвы. Часть гумусированного мелкоземы верхних горизонтов проваливается по трещинам в безгумусовые горизонты и образует затеки. Не исключена возможность выпирания подгумусовых горизонтов вверх и образование заклинков в результате мерзлотных деформаций почв [18]. В безгумусовом гор. В при средней мощности 25 см увеличен размах варьирования от 7 до 58 см ($C_v = 55\%$).

Для черноземов обыкновенных, встречающихся ограниченно в пределах залежных участков Канской лесостепи и приуроченных к южным склонам и микроповышениям, типичен более укороченный профиль по сравнению с черноземами оподзоленными и выщелоченными, т.к. гор. Ск выделялся уже на глубине 60–80 см. При бугристом рельефе на поверхность этих почв выпаживается карбонатный горизонт и пашня становится пятнистой [19]. По мнению [20], мощности в этом подтипе несколько занижены, так как на вершинах бугров гумусовый горизонт пахотных почв в значительной степени был смыт или механически удален в течение длительной распашки. Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта черноземов обыкновенных в залежном состоянии в среднем не превышала 21 см. При небольшом варьировании мощности ($C_v = 15\%$) переходного и иллювиально-карбонатного горизонтов установлено, что последний занимал большую часть профиля почвы (33 см).

Залежные земли являются одним из путей формирования ценной структуры, восстановление которой идет достаточно медленно [21]. Формирование структуры, характерной для генетических горизонтов разных типов почв, определяется сочетанием гранулометрического состава и спецификой почвообразовательных процессов [7]. Тяжелый гранулометрический состав черноземов Канской лесостепи определил формирование морфологически хорошо выраженных структур. На подтиповом уровне морфология структурных агрегатов в генетических горизонтах имела свои особенности. В пределах профилей подтипов черноземов структурные отдельности относились к типу округло-кубовидных структур. Родовая и видовая принадлежность

структурных отдельностей определялась подтипом черноземов и возрастом залежной экосистемы. Гумусово-аккумулятивные и гумусово-элювиальные горизонты черноземов оподзоленных неиспользуемой пашни Канской лесостепи чаще всего обладали наиболее ценной в агрономическом отношении зернистой структурой (табл. 2). Доминирование наряду с зернистой структурой комковато-порошистых отдельностей в гумусовой толще этого подтипа обусловлено проявлением подзолистого процесса, в результате которого сглаживается геометрическая очерченность структурных агрегатов и выраженность ребер и граней. В безгумусовой толще черноземов оподзоленных, охватывающей гор. А₂В и В преобладали ореховатые по форме структурные агрегаты с хорошо оформленными рёбрами и гранями.

Таблица 2

Морфология структуры черноземов неиспользуемой пашни

Горизонт	Классификация структуры		
	род	вид	качество
<i>чернозем оподзоленный (n=13)</i>			
A ₁ + A ₁ A ₂	зернистая, комковатая, кубовидно-ореховатая	<u>зернистая</u> <u>комковато-порошистая</u> ореховато-зернистая	умеренная
A ₂ В+В	зернистая, кубовидно-ореховатая	<u>ореховатая</u> ореховато-зернистая	умеренная, прочная
<i>чернозем выщелоченный (n=38)</i>			
A+AB	зернистая, комковатая, глыбистая, кубовидно-ореховатая	<u>комковато-зернистая</u> <u>ореховато-зернистая</u> <u>глыбисто-комковатая</u> зернистая ореховатая комковато-ореховатая комковато- пороховидная	умеренная, прочная
В+В _к	зернистая, комковатая, глыбистая, кубовидно-ореховатая	<u>глыбисто-комковатая</u> <u>глыбистая</u> ореховатая комковато-зернистая комковатая	умеренная, прочная
<i>чернозем обыкновенный (n=3)</i>			
A + AB	зернистая, комковатая, кубовидно-ореховатая	комковато-порошистая ореховато-зернистая ореховатая	умеренная, прочная
В + В _к	кубовидно-ореховатая, комковатая, глыбистая	<u>глыбисто-комковатая</u> мелкоореховатая комковато-порошистая	умеренная, прочная

Примечание: _ преобладающие виды структур

Преобладание черноземов выщелоченных в структуре неиспользуемой пашни Канской лесостепи и соответственно увеличение объема выборки определило более выраженную полиагрегатность и разнообразие форм морфологических структур в гумусовых горизонтах этого подтипа. На уровне рода здесь выделялись зернистые, комковатые, глыбистые и ореховатые структурные агрегаты. Среди видов господствовали комковато-зернистые, ореховато-зернистые и глыбисто-комковатые агрегаты. В безгумусовых горизонтах преобладали глыбисто-комковатые и глыбистые отдельности, что является характерным признаком морфологии структуры этого

подтипа. В черноземах обыкновенных выделялись хорошо оформленные устойчивые ореховатые и ореховато-зернистые агрегаты, ясно различающиеся в ненарушенном состоянии и менее прочные комковато-порошистые отдельности. В гор. В и Вк доминировали глыбисто-комковатые по форме агрегаты.

Установленные в черноземах виды почвенной структуры обладали схожим качеством, отражающим разницу между когезией внутри структурных агрегатов и адгезией между агрегатами. Она оценивалась как сочетание умеренных и прочных агрегатов. Только качество структурных агрегатов гумусовых горизонтов черноземов оподзоленных характеризовалось как умеренное, что связано с выносом илистых и коллоидных фракций из этой части почвенного профиля. Исследованиями [22, 23] доказано, что для пахотных черноземов земледельческой зоны Красноярского края характерна повышенная глыбистость и наличие преимущественно комковато-глыбистых отдельностей в пахотном слое. Представленные результаты типологии структуры генетических горизонтов черноземов неиспользуемой пашни Канской лесостепи подтверждают роль залежной экосистемы и постагрогенных фитоценозов в её восстановлении. Наличие комковатых, зернистых и ореховатых отдельностей в гумусовой толще почв является этому подтверждением.

Карбонатный профиль черноземов рассматривается как результат взаимодействия гидротермического и газового режимов почв [24] и включает в себя содержание карбонатов, особенности проявления новообразований, их положение и границу вскипания. Диагностика черноземов на подтиповом уровне в значительной степени обусловлена характером иллювиально-карбонатных горизонтов. Морфологическое описание почвенных профилей показало, что в черноземах оподзоленных карбонатные новообразования встречались в гор. Сс глубины 120 см. Для черноземов выщелоченных типичен карбонатный гор. Вк чаще с миграционной (лабильной) формой карбонатов в виде псевдомицелия или равномерной мучнистой пропитки. Характер вскипания зависит от активности мобильных карбонатов. Установлено, что в черноземах выщелоченных, длительно функционирующих в залежи граница вскипания неровная, с амплитудой колебания 77 см ($C_v = 27\%$) (рис. 1). Среднестатистическая величина линии вскипания черноземов выщелоченных соответствовала 69 см, что является характерным признаком этого подтипа. В отличие от черноземов европейской части России в аналогичных почвах земледельческой зоны Красноярского края карбонаты выщелочены на меньшую глубину. По данным [20] карбонатный горизонт в черноземах слабо выщелоченных Красноярской лесостепи находится в среднем на глубине 56 см, в сильно выщелоченных – 80–100 см. Большая амплитуда границы вскипания карбонатного горизонта в черноземах является характерным признаком пахотных почв. Для условий Канской лесостепи длительное отсутствие обработки почв и зарастание почвы естественной растительностью существенным образом не способствовало выравниванию границы вскипания от карбонатов, что подтверждает их связь с условиями залегания по рельефу, а, следовательно, процессами выщелачивания.

В черноземах обыкновенных карбонатный горизонт выражен хорошо и проявлялся непосредственно под гумусовым горизонтом на глубине 20–27 см. Карбонаты имели форму псевдомицелия, располагающегося в общей массе почвенного горизонта и не приуроченного к граням структурных отдельностей.

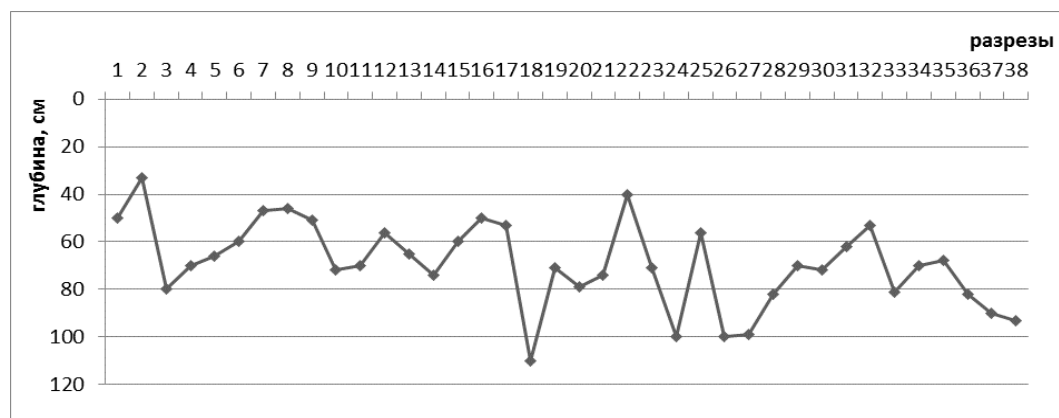


Рис. 1. Линия вскипания в черноземах выщелоченных неиспользуемой пашни

Выводы. Оценка черноземов Канской лесостепи, неиспользуемых в пашне в течение 10–25 лет показала, что на постарогенной стадии эволюции они сохраняют морфогенетические свойства, соответствующие их типу почвообразования. Среди черноземов оподзоленных и выщелоченных преобладают среднемощные виды, обыкновенных – маломощные. Профили черноземов в условиях залежи характеризуются отличиями по мощности генетических горизонтов на подтиповом уровне. Среднестатистическая формула почвенного профиля имеет следующий вид: чернозем оподзоленный – Ад (3 см) – $A_1(29\pm 5,7)$ – $A_1A_2(23\pm 5,4)$ – $A_2B(16\pm 3,9)$ – $B(24\pm 5,2)$; чернозем выщелоченный – Ад (3 см) – $A(29\pm 3,1)$ – $AB(18\pm 2,6)$ – $B(25\pm 5,1)$ – $Bk(26\pm 3,5)$; чернозем обыкновенный – Ад (3 см) – $A(21\pm 14,9)$ – $ABk(14\pm 19,0)$ – $Bk(33\pm 12,4)$. Доминирование зернистых, комковатых и ореховатых структурных отдельностей в пределах гумусовых горизонтов подтипов черноземов подтверждает тренд восстановления морфологических признаков в направлении их естественного состояния. Значительная амплитуда колебания границы вскипания от карбонатов у черноземов выщелоченных (77 см) определяется сложными геоморфологическими условиями территории, характеризующейся наличием широко-увалистого рельефа с выраженным микрорельефом. Черноземы оподзоленные и выщелоченные Канской лесостепи, длительно функционирующие в залежном состоянии, по комплексу морфогенетических признаков могут рассматриваться как ближайший резерв для расширения пахотных площадей региона и повторного освоения их пашню.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Preserving the fertility of Russian chernozems. Status, trends, forecast / I.A. Trofimov, L.S. Trofimova, E.P. Yakovleva [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 9, Orenburg, 07–11 июня 2021 года. – Orenburg, 2021. – P. 012108.
2. Сидорова, В.А. Пространственная вариабельность агрохимических свойств черноземов южных / В.А. Сидорова, П.В. Красильников // Черноземы Центральной России: генезис, география, эволюция. – 2004. – С. 475-480.
3. Analysis of spatial humus distribution in virgin and arable Chernozems in the eroding landscapes / L.G. Smirnova, I.I. Mikhailenko, G.V. Smirnov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications 2019, Moscow, 27–31 мая 2019 года. – Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012050.
4. Albornoz-Bucheli, C. Geostatistical methods applied to soil fertility zoning / C. Albornoz-Bucheli, C. Benavides, D. Muñoz-Guerrero // Revista de Ciencias Agrícolas. – 2022. – Vol. 39, No. 1. – P. 85-98.

5. Кураченко, Н.Л. Пространственное варьирование структурно-агрегатного состава черноземов и серых лесных почв Красноярской лесостепи в предельно однородных условиях почвообразования / Н.Л. Кураченко, С.В. Хижняк // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 36-40.
6. Каюгина, С.М. Пространственная вариабельность мощности генетических горизонтов серых лесных почв Северного Зауралья / С.М. Каюгина, Д.И. Еремин // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 10(163). – С. 3-12.
7. Кураченко, Н.Л. Оценка и динамика агрофизического состояния черноземов и серых лесных почв Красноярской лесостепи: специальность 03.02.13 "Почвоведение": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Кураченко Наталья Леонидовна. – Томск, 2010. – 35 с.
8. Ковалева, Е.В. Изучение мощности гумусового профиля почвенных катен Центральной лесостепи / Е.В. Ковалева, И.Ю. Вагурин, А.В. Акинчин [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 7. – С. 16-20.
9. Белобров, В.П. Структура почвенного покрова и трансформация морфометрических параметров типичных черноземов в технологии прямого посева / В.П. Белобров, С.А. Юдин, Н.Р. Ермолаев, А.Я. Айдиев // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2023. – № 115. – С. 5-31.
10. Нечаева, Т.В. Постагрогенное восстановление свойств черноземов лесостепной зоны Западной Сибири / Т.В. Нечаева, Е.Н. Смоленцева // Проблемы плодородия почв в современном земледелии : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию освоения целинных и залежных земель, Красноярск, 24–28 июня 2024 года. – Красноярск: Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук", 2024. – С. 85-89.
11. Изменения в постагрогенных почвах в ходе восстановления древесной растительности в условиях юго-запада Ленинградской области / Д.А. Данилов, А.А. Яковлев, Д.А. Зайцев, А.А. Иванов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 251. – С. 97-122.
12. Ковалева, Н.М. Восстановление растительности на залежах в лесостепи Красноярского края / Н.М. Ковалева, Р.С. Собачкин // Лесоведение. – 2023. – № 5. – С. 502-512.
13. Иванова, Т.А. Гумусное состояние черноземов неиспользуемой пашни Канской лесостепи / Т.А. Иванова, А.В. Крыжановская, Н.Л. Кураченко и др. // Вестник КрасГАУ. – 2025. – № 4. – С. 114-124.
14. Постановление Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731 "О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса РФ" // Собрание законодательства РФ. – 14.05.2021. – № 1. – С. 3.
15. Захаров, С.А. Краткий курс практических занятий по почвоведению / С.А. Захаров. – М.-Л.: Госиздат, 1930. – 245 с.
16. Слюсарев, В.Н. Характеристика некоторых аспектов плодородия чернозема выщелоченного Западного Предкавказья / В.Н. Слюсарев, Л.М. Онищенко, Т.В. Швец // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 89. – С. 916-932.
17. Моделирование мощности гумусового горизонта для целей выделения почв-эталонов // Изучение и идентификация почвенных эталонов и редких почв с целью мониторинга и охраны почвенных ресурсов в Равнинном Крыму. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2017. – С. 22-29.
18. Кураченко, Н.Л. Гумусовые вещества в формировании агрофизических свойств почв Красноярской лесостепи / Н.Л. Кураченко. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2019. – 143 с.
19. Бугаков, П.С. Почвы Красноярского края / П.С. Бугаков, Горбачева С.М., Чупрова В.В. – Красноярск, 1981. – 127 с.
20. Лебедева, И.И. Почвы Центрально-Европейской и Средне-Сибирской лесостепи / И.И. Лебедева, Е.В. Семина. – И.: Колос, 1974. – 225 с.
21. Зыбалов, В.С. Результаты мониторинга залежных земель в лесостепной зоне южного Урала / В.С. Зыбалов, Н.С. Сергеев, М.В. Запелалов // АПК России. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 30-37.
22. Крупкин, П.И. Черноземы Красноярского края / П.И. Крупкин. – Красноярск: КрасГАУ, 2002. – 332 с.
23. Кураченко, Н.Л. Агрофизическое состояние почв Красноярской лесостепи / Н.Л. Кураченко. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2013. – 194 с.
24. Овечкин, С.В. Карбонатный профиль и режим влажности миграционно-мицелярных черноземов разных экосистем Курской области / С.В. Овечкин, Г.С. Базыкина // Почвоведение. – 2011. – № 12. – С. 1475.

REFERENCES

1. Trofimov, I.A., Trofimova, L.S. &Yakovleva, E.P. (2021) Preserving the fertility of Russian chernozems. Status, trends, forecast In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science* 07–11 June 2021 года, Orenburg, Russia. Orenburg, 012108. (In Russian).
2. Sidorova, V.A. &Krasilnikov, P.V. (2004) [Spatial variability of agrochemical properties of southern chernozems]. *Chernozems of Central Russia: genesis, geography, evolution.* 475-480. (In Russian).
3. Smirnova L.G., Mikhailenko I.I. &Smirnov G.V. (2019) Analysis of spatial humus distribution in virgin and arable Chernozems in the eroding landscapes In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications 27-31 May 2019, Moscow, Russia. Moscow, Institute of Physics Publishing, 012050. (In Russian).
4. Albornoz-Bucheli C., Benavides C. &Muñoz-Guerrero D. (2022) Geostatistical methods applied to soil fertility zoning. *Journal of the Revista de Ciencias Agrícolas*, 39 (1), 85-98.
5. Kurachanko, N.L. &Hizhnik, S.V. (2010) [Spatial variation of the structural and aggregate composition of chernozems and gray forest soils of the Krasnoyarsk forest-steppe under extremely homogeneous soil formation conditions]. *Zhurnal Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Journal of the Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 1 (63), 36-40. (In Russian).
6. Kayugina, S.M. &Eremin, D.I. (2020) [Spatial variability of the power of the genetic horizons of gray forest soils of the Northern Urals]. *Zhurnal Vectnik KrasGAU = Journal of the Bulletin of KrasGAU*, 10 (163), 3-12. (In Russian).
7. Kurachanko, N.L. (2010) *Assessment and dynamics of the agrophysical state of chernozems and gray forest soils of the Krasnoyarsk forest steppe* In: Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences, Tomsk, 35 p. (In Russian).
8. Kovaleva, E.V., Vagurin, I.Yu &Akincin, A.V. (2021) [Study of the thickness of the humus profile of soil grains in the Central forest-steppe]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agricultural Scientific Journal*, 7, 16-20. (In Russian).
9. Belobrov, V.P. Yudin, S.A., Ermolaev, N.P. &Aidiev A.Ya. (2023) [The structure of the soil cover and the transformation of morphometric parameters of typical chernozems in direct seeding technology]. *Zhurnal byulleten` Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva = Journal of the Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 115, 5-31. (In Russian).
10. Nechaeva, T.V. &Smolentseva, E.N. (2024) Postagrogenic restoration of the properties of chernozems of the forest-steppe zone of Western Siberia. In: *Problems of soil fertility in modern agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary of the development of virgin and fallow lands*, 24-28 June 2024, Krasnoyarsk, Russia, Krasnoyarsk, 85-89. (In Russian).
11. Danilov, D.A., Yakovlev, A.A., Zaitsev, D.A. &Ivanov A.A. [Changes in postagrogenic soils during the restoration of woody vegetation in the south-west of the Leningrad region]. *Zhurnal Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Journal of the Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. St. Petersburg, 251, 97-122. (In Russian).
12. Kovaleva, N.M. &Sobachkin, P.S. (2023) [Restoration of vegetation on deposits in the forest-steppe of the Krasnoyarsk Territory]. *Zhurnal lesovedenie = Journal of the Forestry science*, 5, 502-512. (In Russian).
13. Ivanova, T.A., Kryzhanovskaya, A.B. &Kurachenko, N.L. (2025) [Humus state of the chernozems of unused arable land in the Kansk forest-steppe]. *Zhurnal Vestnik KrasGAU = Journal of the Bulletin of KrasGAU*, 4, 114-124. (In Russian).
14. Decree of the Government of the Russian Federation dated May 14, 2021 No. 731 "On the State Program for the effective involvement in the turnover of agricultural land and the development of the land Reclamation complex of the Russian Federation" In: *Collection of legislation of the Russian Federation. 2021, 1, 3.* (In Russian).
15. Zacharov, S.A., (1930) *A short course of practical exercises in soil science*. Moscow: State Publishing House, 245 p. (In Russian).
16. Slyusarev, V.N., Onishchenko, L.M. &Shvets, T.V. (2013) [Characteristics of some aspects of the fertility of the leached chernozem of the Western Ciscaucasia]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Journal of the Polythematic Online electronic scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 89, 916-932. (In Russian).
17. Modeling the thickness of the humus horizon for the purpose of isolating reference soils In: *Study and identification of soil standards and rare soils for the purpose of monitoring and protection of soil resources in the Lowland Crimea*. Simferopol: Limited Liability Company "Publishing House Printing House "Arial", 2017, 22-29. (In Russian).

18. Kurachanko, N.L. (2019) *Humic substances in the formation of agrophysical properties of soils of the Krasnoyarsk forest*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 143 p. (In Russian).
19. Bugakov, P.S., Gorbacheva, S.M. & Chuprova, V.V. (1981) *Soils of the Krasnoyarsk Territory*. Krasnoyarsk, 127 p. (In Russian).
20. Lebedeva, I.I. & Semina, E.V. (1974) *Soils of the Central European and Central Siberian forest steppe*. Irkutsk: the Ear, 225 p. (In Russian).
21. Zybalov, V.S., Sergeev, N.S. & Zapevalov, M.V. (2020) [Monitoring results of fallow lands in the forest-steppe zone of the southern Urals]. *Zhurnal APK Rossii = Journal of the Agroindustrial complex of Russia*, 27 (1), 30-37. (In Russian).
22. Krupkin, P.I. (2002) *Chernozems of the Krasnoyarsk Territory*. Krasnoyarsk: KrasGAU, 332 p. (In Russian).
23. Kurachanko, N.L. (2013) *Agrophysical state of soils of the Krasnoyarsk forest-steppe*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 194 p. (In Russian).
24. Ovechkin, S.V. & Bazykina, G.S. (2011) [Carbonate profile and humidity regime of migration-micellar chernozems of different ecosystems of the Kursk region]. *Zhurnal pochvovedenie = Journal of the soil science*, 12, 1475. (In Russian).

MORPHOGENETIC CHARACTERISTICS OF THE CHERNOZEMS OF UNUSED ARABLE LAND IN THE KANSK FOREST-STEPPE

T. A. Ivanova, N. L. Kurachenko, M. S. Kondakova

The article discusses the results of research on the assessment of morphogenetic features of the chernozems of the Kansk forest-steppe, one of the largest natural districts of the agricultural zone of the Krasnoyarsk Territory. A statistical assessment of the power of genetic horizons at the subtype level has been carried out, the typology of the structure according to the soil profile and the distribution of the boiling line from carbonates have been shown. It has been established that there is a tendency in soils to restore morphological features in the direction of their natural state. According to the complex of morphological features, the podzolic and leached chernozems of the region are the closest reserve for their re-development into arable land.

Keywords: chernozems, unused arable land, soil morphology, genetic horizons, spatial variability, soil structure, boiling line.

Поступила в редакцию 15.01.2026 г.

Иванова Татьяна Анатольевна

аспирант кафедры почвоведения и агрохимии,
Красноярский государственный аграрный
университет, г. Красноярск, Россия.
E-mail: tanya_kovalkova@mail.ru
ORCID: 0009-0002-9991-8972
SPIN-код: 8203-7420
Author ID: 1305725

Ivanova Tatiana Anatolyevna

Postgraduate student of the Department of Soil Science
and Agrochemistry, Krasnoyarsk State Agrarian
University, Krasnoyarsk, Russia.
E-mail: tanya_kovalkova@mail.ru
ORCID: 0009-0002-9991-8972
SPIN-код: 8203-7420
Author ID: 1305725

Кураченко Наталья Леонидовна

доктор биологических наук, профессор;
профессор кафедры почвоведения и агрохимии,
Красноярский государственный аграрный
университет, г. Красноярск, Россия.
E-mail: kurachenko@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1761-4995
SPIN-код: 8849-0135
Author ID: 89509

Kurachenko Natalia Leonidovna

Doctor of Biological Sciences, Professor;
Professor of the Department of Soil Science and
Agrochemistry, Krasnoyarsk State Agrarian University,
Krasnoyarsk, Russia.
E-mail: kurachenko@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1761-4995
SPIN-код: 8849-0135
Author ID: 89509

Кондакова Марина Сергеевна

студент кафедры почвоведения и агрохимии,
Красноярский государственный аграрный
университет, г. Красноярск, Россия.
E-mail: morskay-555@bk.ru

Kondakova Marina Sergeevna

student of the Department of Soil Science and
Agrochemistry, Krasnoyarsk State Agrarian University,
Krasnoyarsk, Russia.
E-mail: morskay-555@bk.ru

ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АГРОЧЕРНОЗЕМА КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2026. Л. Ф. Казюлин, Н. Л. Кураченко

В 3-х летнем полевом опыте, заложенном на стационаре учхоза «Миндерлинское» Красноярского государственного аграрного университета в Красноярской лесостепи, было исследовано влияние гуминовых и минерального азотного удобрений на гидротермический режим пахотного слоя агрочернозема. Целью исследования являлась оценка влияния гуминовых и азотного минерального удобрений на гидротермический режим пахотного слоя агрочернозема. Установлено, что эффект применяемых удобрений в изменении температуры почвы и запасов продуктивной влаги контролировался погодными условиями вегетационных сезонов и был наиболее выраженным в засушливом 2023 году. Гуминовые удобрения Лигногумат АМ, Гумат К Суфлер и аммиачная селитра, а также их сочетание в технологии возделывания яровой пшеницы обусловили охлаждение агрочернозема на 0,1–0,3 °С относительно контроля в среднем за весь период исследований. Максимальные запасы продуктивной влаги (32–33 мм) сформировались на варианте применения Лигногумата АМ как в чистом виде, так и на фоне внесения аммиачной селитры в дозах N30 и N60.

Ключевые слова: агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный, гуминовые удобрения, аммиачная селитра, температура почвы, запасы продуктивной влаги.

Введение. Формирование благоприятного гидротермического режима в корнеобитаемом слое почвы является одним из необходимых условий для получения высоких урожаев культурных растений. Это особенно актуально для условий Красноярской лесостепи с характерным дефицитом атмосферных осадков и запасов влаги в мае-июне – критически важном периоде роста сельскохозяйственных культур. Гидротермический режим почвы определяется внешними абиотическими факторами окружающей среды, такими как количество и качество выпавших осадков, количество солнечной радиации поглощенной поверхностью почвы. На его характер оказывают влияние и свойства самой почвы: минералогический и гранулометрический состав, количество органического вещества и особенности структурной организации генетических горизонтов. Основными приемами регулирования гидротермического режима почвы является проведение гидромелиоративных мероприятий, выбор приёма обработки [1], а также и в некоторой степени применение удобрений. Известно [2, 3], что внесение в почву минеральных удобрений уменьшает транспирационный коэффициент за счет увеличения концентрации почвенного раствора, вследствие чего растениям нет необходимости потреблять большое количество воды для получения требуемого количества элементов минерального питания. Помимо традиционных минеральных удобрений всё большую популярность в сельскохозяйственном производстве приобретают гуминовые удобрения. Не существует общепринятого объяснения ростостимулирующего эффекта препаратов на основе гуминовых веществ, применяемых при возделывании сельскохозяйственных культур. При этом нет разногласий в том, что гуминовые удобрения оказывают непосредственное воздействие на физиологические процессы в растениях. Согласно исследованиям Л.П. Канеллас с соавт. [4] гуминовые удобрения содержат вещества подобные гормонам роста растений. По мнению Н.Г. Мензяновой с соавт. [5], препараты на основе гуминовых веществ оказывают мягкое стрессовое воздействие, мобилизирующее их активный рост.

Поскольку гуминовые препараты оказывают физиологическое действие на возделываемые растения, а процессы транспирации и десукции являются физиологическими, то можно предположить, что они влияют на величину транспирационного коэффициента и в конечном итоге на запасы влаги в почве [6, 7]. Другой возможный механизм влияния заключается в увеличении коэффициента использования элементов питания из вносимых минеральных удобрений [8, 9] и, таким образом, в уменьшении потребления сельскохозяйственной культурой воды из почвы в объеме необходимом для получения требуемого количества элементов.

Цель исследования – оценить влияние удобрений на температурный режим и запасы продуктивной влаги пахотного слоя агрочернозема в условиях Красноярской лесостепи.

Объекты и методы. Исследования проведены в 2023–2025 гг. в полевом опыте на стационаре «Миндерлинское» Красноярского государственного аграрного университета в Красноярской лесостепи (56° с.ш., 92° в.д.).

Объекты исследования – агрочернозем глинисто-иллювиальный тяжелосуглинистого гранулометрического состава, гуминовые удобрения «Лигногумат АМ и «Гумат калия Суфлер», минеральное удобрение аммиачная селитра, яровая пшеница сорта Новосибирская 31, возделываемая по предшественнику – чистый пар.

Агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный опытного участка характеризуется как среднеспособный с высоким содержанием гумуса (6,9–7,4 %), нейтральной реакцией среды (pH_{H_2O} – 6,3–6,8), высокой суммой обменных оснований (55,5–62,0 мг-экв. 100 г⁻¹). Пахотный слой агрочернозема перед посевом яровой пшеницы оценивается повышенной обеспеченностью подвижным фосфором (190–224 мг кг⁻¹) и очень высокой обменным калием (312–359 мг кг⁻¹).

Для оценки действия минерального и гуминовых удобрений на гидротермический режим агрочернозема проведен полевой опыт по схеме: 1. Контроль; 2. N30; 3. N60; 4. Лигногумат АМ; 5. Лигногумат АМ + N30; 6. Лигногумат АМ + N60; 7. Гумат К; 8. Гумат К + N30; 9. Гумат К + N60. Технология применения препаратов заключается в предпосевной обработке семян яровой пшеницы и опрыскивании вегетирующих посевов в фазу кущения и цветения. Яровая пшеница возделывается на фоне комплексной защиты растений: Скарлет, МЭ; Арго Прим, МЭ; Фемида, МД; Титул Трио, ККР; Эсперо, КС. Применяемые дозы препаратов соответствуют рекомендациям производителя. Аммиачная селитра вносится в почву перед посевом в дозах, соответствующих вариантам полевого опыта. Размещение вариантов систематическое. Общая площадь делянок 200 м², учетная площадь 60 м² [11]. Температурный режим почвы в агроценозе яровой культуры исследовали термометром TR 46908 в слое почвы 0–20 см в период с июня по сентябрь на 3 пробных площадях, выделенных в пределах каждого варианта опыта. Для сравнительной характеристики температурного режима приземного слоя атмосферы используются данные агрометеорологической станции «Сухобузимская». Интервал измерения температуры почвы – от 11 до 23 дней. Отбор почвенных образцов на определение влажности почвы термовесовым методом [10] проведен на глубину 0–20 см. Повторность аналитических определений – 3-х кратная. Статистический анализ данных проведен методом двухфакторного дисперсионного и корреляционного анализа с использованием программы Microsoft Excel XP и главных компонент с использованием программы StatSoft STATISTICA 8.

Анализ результатов. Вегетационный сезон 2023 года характеризуется как теплый и засушливый. Весна была холодной и затяжной. Только в третьей декаде мая температура в среднем достигает 12,2 °С. Начало вегетационного периода сопровождается достаточным количеством осадков (табл. 1). Летние месяцы вегетационного сезона 2023 года характеризуются как теплые и превышают среднемноголетнюю температуру воздуха на 2–3 °С. При этом количество осадков в июньский, июльский и августовские периоды составляет 65–69 % от среднемноголетнего уровня. ГТК оценивается величиной 0,59–0,85, что свидетельствует о засушливых условиях.

Таблица 1

Погодные условия вегетационных сезонов в годы проведения исследований

Год	Месяц					Сумма за период
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Средняя температура воздуха, °С						
2023	8,9	18,0	20,0	17,9	11,0	2144
2024	11,1	17,7	21,8	18,4	8,0	1999
2025	10,5	19,5	18,8	16,4	10,8	2144
Среднемноголетние показатели t воздуха, °С	8,0	15,2	18,4	14,9	8,2	1809
Осадки, мм						
2023	33	30,2	44,9	42,9	79,9	230,9
2024	30,5	58,6	55,3	94,3	46,1	284,8
2025	29,2	109	59,6	161,1	52,8	411,7
Среднемноголетний уровень осадков, мм	32,0	44,0	69,0	62,0	39,0	246

Погодные условия вегетационного сезона 2024 года оцениваются как обеспеченные теплом и влагой. ГТК определяется значением 1,12. Наблюдается значительная неравномерность выпадения осадков в течение сезона. В 2025 году погодные условия отличаются аномальным количеством осадков, превышающим среднемноголетний уровень в 1,7 раза. Гидротермический коэффициент оценивается величиной 1,80, что характеризует условия как избыточно увлажненные. Температура воздуха также превышает среднемноголетний уровень в среднем на 2–4 °С, кроме июля, температура воздуха которого соответствует норме. Таким образом, погодные условия вегетационных сезонов в годы проведения исследования значительно отличаются друг от друга и от среднемноголетних значений. Наиболее благоприятным сочетанием температуры воздуха и количеством осадков отмечается вегетационный сезон 2024 года с ГТК Селянинова равным 1,12.

Температурный режим определяет динамику и интенсивность всех проходящих в почве процессов, начиная с процесса трансформации органического вещества и заканчивая ростом и развитием растений. При этом температурный режим имеет обратную зависимость от интенсивности роста растений и от степени развития надземной фитомассы [12]. Динамика температурного режима агрочернозема имеет существенную разницу по годам исследований (рис. 1). Температурное поле агрочернозема определяется температурой приземных слоёв атмосферы и имеет различный характер в зависимости от хода сезонной динамики температуры воздуха. Менее выраженная динамика показателя в 0–20 см слое почвы и в приземном слое

воздуха наблюдается в летний период 2024 года ($C_v = 25\text{--}26\%$). Температура пахотного слоя агрочернозема в период с начала всходов яровой пшеницы до молочной спелости не снижается ниже $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В 2023 и 2025 годах отмечаются значительные изменения в температуре почвы и воздуха в течение вегетационных сезонов. В целом ход температуры пахотного слоя агрочернозема повторяет температуру приземных слоев атмосферы, но обладает заметной инертностью.

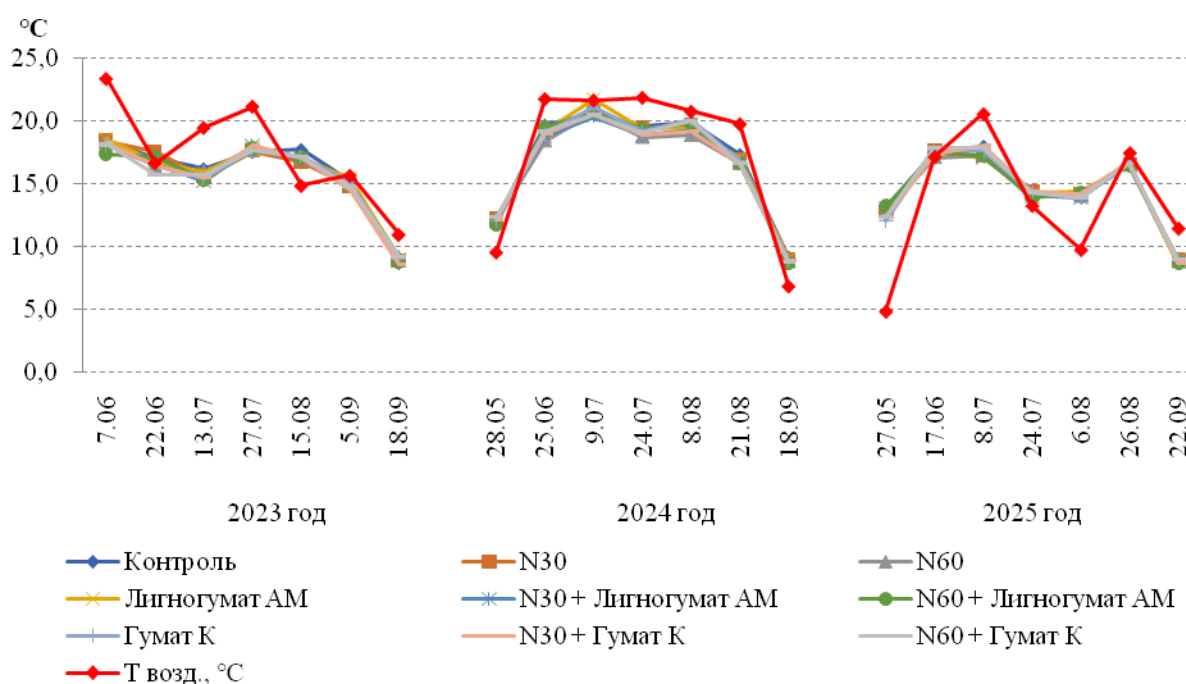


Рис. 1. Температурный режим 0–20 см слоя агрочернозема и температура приземного слоя воздуха, °C

Обработка вегетирующих посевов яровой пшеницы гуминовыми удобрениями на фоне аммиачной селитры в дозах N30 и N60 определяет снижение температуры почвы в фазу кушения и выхода в трубку яровой пшеницы. В этот период развития культуры наблюдается самый значительный прирост надземной фитомассы и как следствие существенное увеличение проективного покрытия и затенения почвы. Применяемые в опыте удобрения определяют более интенсивный рост яровой пшеницы и соответственно охлаждение 0–20 см слоя агрочернозема. К периоду уборки яровой пшеницы, существенного увеличения площади проективного покрытия на фоне применения удобрений не происходит и, соответственно, температура почвы существенно не различается по вариантам опыта.

Различный ход температуры агрочернозема в период июнь–сентябрь по годам исследований отражается на среднестатистических величинах показателя. В среднем лучшая прогреваемость воздуха и почвы отмечается в вегетационный сезон 2024 года ($17,5$ и $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно) (табл. 2). Минимальная среднестатистическая температура почвы характерна для избыточно влажного сезона 2025 года. Значительное снижение температуры воздуха в мае до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выпадение обильных осадков ливневого характера определяет отставание на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры приземных слоёв атмосферы ($13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) от температуры почвы ($14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Применяемые в технологии возделывания яровой пшеницы гуминовые удобрения и аммиачная селитра в чистом виде, и при их сочетании обуславливают достоверное ($p = 0,029$; $p < 0,001$) снижение температуры пахотного слоя агрочернозема на $0,1–0,5$ °С относительно контроля только в вегетационные сезоны 2023–2024 гг. Повышенное увлажнение почвы в 2025 году определяет нивелирование температурного поля агрочернозема по вариантам опыта ($r = -0,38$). В среднем за период наблюдений установлено, что применение аммиачной селитры при посеве яровой пшеницы в дозе N30 и N60, обработка семян и растений культуры гуминовыми удобрениями Лигногумат АМ и Гумат К, а также сочетание видов удобрений определяет снижение температуры пахотного слоя на $0,1–0,3$ °С по сравнению с контролем. Охлаждающее влияние посевов яровой пшеницы на вариантах опыта с удобрениями обусловлено формированием более густого растительного покрова, который лучше задерживает и отражает приходящую солнечную радиацию.

Таблица 2

Температурный режим агрочернозема в слое 0–20 см (2023–2025 гг.)

Вариант	Температура агрочернозема, °С						Среднее
	2023		2024		2025		
	Хср	Сv, %	Хср	Сv, %	Хср	Сv, %	
Контроль	15,8	20	16,9	25	14,6	21	15,8
N30	15,7	20	16,7	25	14,5	20	15,7
N60	15,7	18	16,4	25	14,5	19	15,5
Лигногумат АМ	15,8	19	16,8	26	14,5	19	15,7
N30 + Лигногумат АМ	15,5	19	16,5	25	14,5	20	15,5
N60 + Лигногумат АМ	15,5	19	16,7	26	14,5	20	15,6
Гумат К	15,6	19	16,7	26	14,5	21	15,6
N30 + Гумат К	15,5	20	16,5	25	14,5	21	15,5
N60 + Гумат К	15,5	19	16,7	25	14,6	21	15,6
Среднее	15,6	19	16,7	25	14,5	20	15,6
Т возд., °С	17,5		17,5		13,5		16,2
p ₀₅ А (вариант)	0,029		<0,001		0,699		
p ₀₅ В (срок)	<0,001		<0,001		<0,001		
p ₀₅ АВ (взаимодействие)	0,006		0,008		<0,001		

Динамика запасов продуктивной влаги в 0–20 см слое агрочернозема показывает общую закономерность по годам исследований, заключающуюся в значительном снижении запасов влаги в июльский срок и их возрастании к концу вегетации яровой пшеницы (рис. 2). Наиболее стабильной динамикой запасов продуктивной влаги отличается вегетационный сезон 2024 года ($Cv = 7–13$ %, табл. 3), который отмечен как самый благоприятный по погодным условиям за период проведенных исследований.

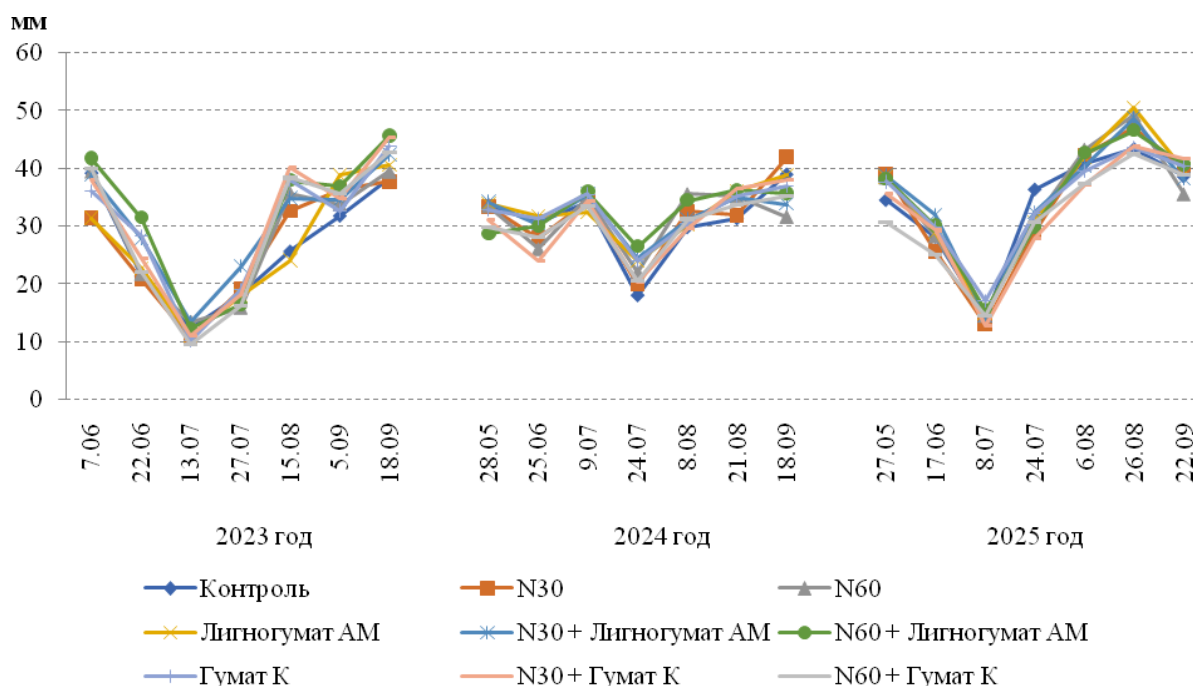


Рис. 2. Динамика запасов продуктивной влаги в 0–20 см слое агрочернозема, мм

Засушливые условия второй и третьей декады июля вегетационного сезона 2023 года определяют неудовлетворительные запасы продуктивной влаги в 0–20 см слое почвы (10–19 мм) на всех вариантах опыта. Схожий уровень влагообеспеченности почвы отмечается в период цветения пшеницы в вегетационном сезоне 2025 года (13–15 мм). Несмотря на наличие периодов иссушения почвы и неудовлетворительных запасов продуктивной влаги почвы под посевами яровой пшеницы в целом уровень влагообеспеченности оценивается как удовлетворительный (27–35 мм) (табл. 3).

Таблица 3

Запасы продуктивной влаги в 0–20 см слое агрочернозема (2023–2025 гг.)

Вариант	Запасы продуктивной влаги, мм						Среднее
	2023г.		2024г.		2025г.		
	Хср	Сv, %	Хср	Сv, %	Хср	Сv, %	
Контроль	26,7	21	31,0	13	33,8	18	30,5
N30	27,0	21	31,7	12	33,7	21	30,8
N60	28,5	22	31,4	12	34,4	20	31,4
Лигногумат АМ	26,7	23	32,5	10	35,1	20	31,5
N30 + Лигногумат АМ	30,7	20	32,1	7	35,0	18	32,6
N60 + Лигногумат АМ	31,8	26	32,5	11	34,8	18	33,0
Гумат К	29,8	22	32,4	8	34,4	16	32,2
N30 + Гумат К	30,3	24	30,6	13	32,6	19	31,2
N60 + Гумат К	29,2	25	30,2	10	31,3	18	30,2
Среднее	29,0	23	31,6	11	33,9	19	31,5
p ₀₅ А (вариант)	<0,001		0,155		<0,001		
p ₀₅ В (срок)	<0,001		<0,001		<0,001		
p ₀₅ АВ (взаимодействие)	0,002		0,033		0,028		

Применяемые в опыте удобрения по-разному влияют на запасы продуктивной влаги в агрочерноземе, что обусловлено существенными различиями в погодных условиях вегетационных сезонов. В засушливом 2023 году применение удобрений позволяет сохранить запасы влаги на 0,3–5,1 мм относительно контроля, кроме варианта с применением Лигногумата АМ по неудобренному фону, который не отличается от контрольного. В избыточно влажный 2025 год гуминовое удобрение Лигногумат АМ, применяемое на неудобренном фоне и совместно с аммиачной селитрой в дозе N30 и N60 определяет максимальное сохранение влаги в почве (35 мм). Подобная закономерность наблюдается и в вегетационном сезоне 2024 года, но является статистически недостоверной ($p = 0,155$). Незначительное повышение запасов продуктивной влаги (на 0,3–0,7 мм) под влиянием минеральных удобрений получено в исследованиях В.И. Лазарева и О.В. Никитиной [13]. Н.Л. Кураченко и А.В. Шарапатовой [14] доказано, что эффективность применения гуминовых удобрений на посевах яровой пшеницы определялась погодными условиями. В условиях хорошей влагообеспеченности вегетационных сезонов получена максимальная прибавка зерна яровой пшеницы при применении применения гуминового удобрения на фоне комплексной защиты яровой пшеницы.

Гуминовое удобрение Лигногумат АМ, применяемое в технологии возделывания яровой пшеницы в чистом виде и при его сочетании с азотным удобрением в дозе N30 и N60 обеспечивает более экономное расходование запасов влаги из корнеобитаемого слоя. На этих вариантах опыта отмечаются максимальные запасы влаги за весь период наблюдений (32–33 мм). Таким образом, подтверждается роль гуминового удобрения Лигногумат АМ как антистрессового буфера, повышающего осмотический потенциал клеток и удержание влаги, а значит и более экономное её расходование из почвы.

Анализ полученных результатов методом главных компонент показывает существенные различия в гидротермическом режиме агрочернозема по годам исследований и вариантам полевого опыта (рис. 3). Наибольшими различиями в характере гидротермического режима почвы характеризуются 2024 и 2025 гг. Промежуточное положение по температуре почвы и запасам продуктивной влаги занимает 2023 год. Общая компактность вариантов опыта, образованная в благоприятный по метеоусловиям вегетационный сезон 2024 года позволяет судить о слабой изменчивости гидротермических показателей агрочернозема. При этом данные точки занимают верхнюю правую часть графика, в целом ассоциированную с оптимальными гидротермическими условиями. В условиях избыточного увлажнения 2025 года выделяются варианты опыта с применением Гумата К по удобренному фону с существенным снижением запасов продуктивной влаги относительно контроля. По всем группам, образуемыми разными годами полевого опыта, к верхнему левому краю графика, который связан с максимальной влагообеспеченностью почвы, приурочены варианты с использованием Лигногумата АМ в технологии возделывания яровой пшеницы.

Согласно рис. 3 наибольшими запасами продуктивной влаги в среднем за три года исследований характеризуются варианты опыта с применением Лигногумата АМ совместно с аммиачной селитрой и Гумата калия по неудобренному фону. Применение Гумата К и азотного удобрения в дозе N60 обуславливает наименьшие запасы доступной влаги. Почву контрольного варианта можно охарактеризовать как относительно низко влагообеспеченную с самыми высокими значениями температуры пахотного слоя в полевым опыте.

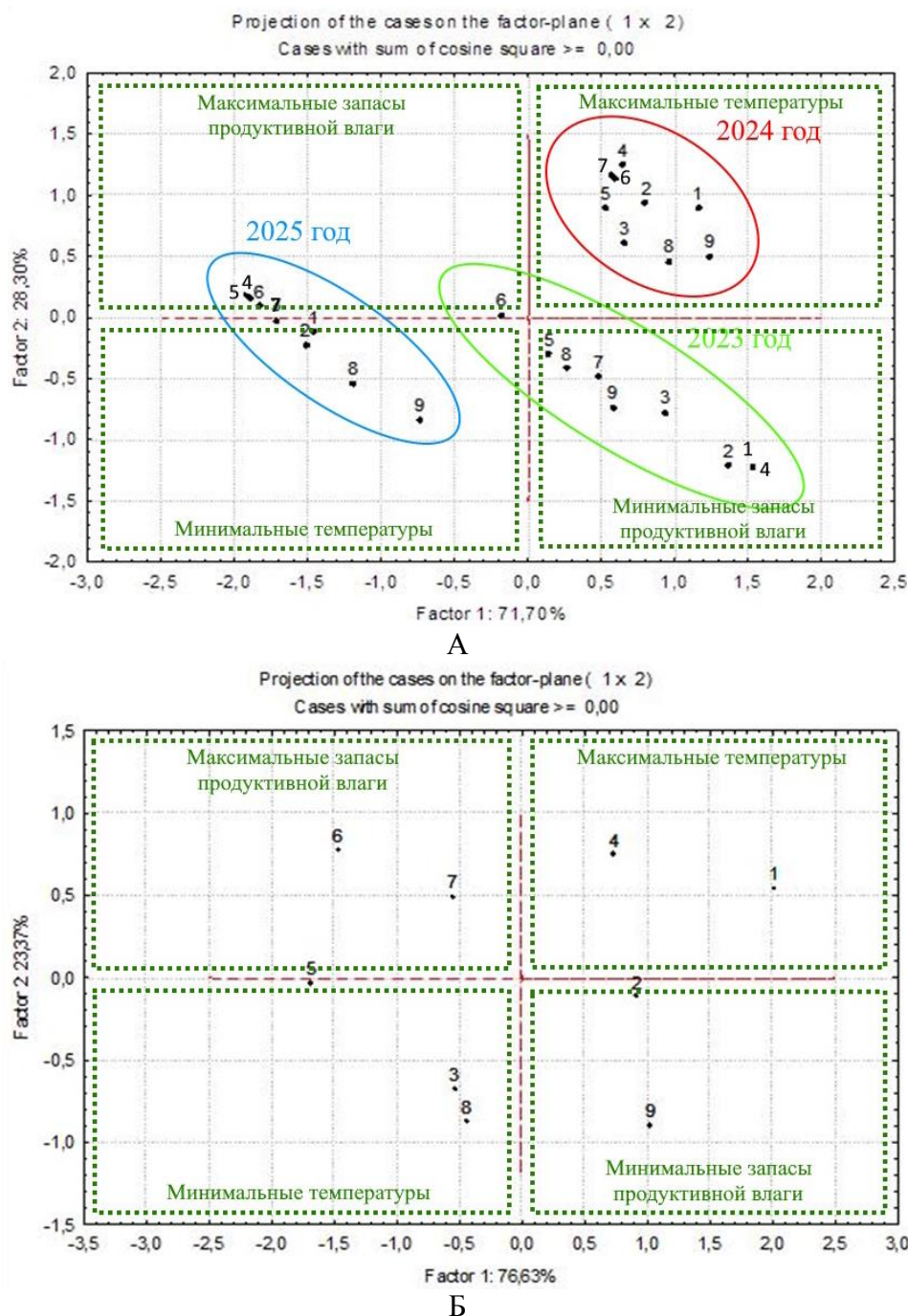


Рис. 3. Результаты анализа данных методом главных компонент А – по годам исследований, Б – в среднем за три года (где 1 – Контроль; 2 – N30; 3 – N60; 4 – Лигногумат АМ; 5 – Лигногумат АМ + N30; 6 – Лигногумат АМ + N60; 7 – Гумат К; 8 – Гумат К + N30; 9 – Гумат К + N60)

Выводы. Влияние гуминовых удобрений и аммиачной селитры на гидротермический режим агрочернозема Красноярской лесостепи определяется погодными условиями вегетационных сезонов. Засушливые условия вегетации яровой пшеницы в наибольшей степени определяют действие применяемых в эксперименте удобрений на температуру и запасы продуктивной влаги 0–20 см слоя почвы. Внесение в почву при посеве яровой пшеницы аммиачной селитры в дозе N30 и N60, обработка семян и вегетирующих посевов гуминовыми удобрениями Лигногумат АМ и Гумат К, а

также их совместное применение снижает температуру почвы на 0,1–0,3 °С по сравнению с контролем. Гуминовое удобрение Лигногумат АМ и его сочетание с азотным удобрением дозе N30 и N60 определяет максимальное накопление запасов продуктивной влаги в 0–20 см слое агрочернозема за весь период наблюдений (32–33 мм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова, Е. Н. Влияние способов обработки почвы на запасы продуктивной влаги в агрочерноземе Красноярской лесостепи / Е. Н. Белоусова, А. А. Белоусов // *Агрофизика*. – 2023. – № 2. – С. 14-21. – DOI 10.25695/AGRPH.2023.02.03.
2. Линков, Н. А. Изменение водопотребления озимой пшеницы и запасов продуктивной влаги под влиянием севооборотов, способов основной обработки почвы и удобрений / Н. А. Линков, С. А. Линков, А. В. Акинчин, Л. Н. Кузнецова // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2012. – № 6. – С. 42-45.
3. Котлярова, Е. Г. Показатели водного режима в посевах сои в зависимости от сочетания органических и минеральных удобрений / Е. Г. Котлярова, В. Г. Грицина // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. – 2021. – № 1(29). – С. 108-116.
4. Canellas, L.P. Chemical properties of humic matter as related to induction of plant lateral roots / L. P. Canellas, L. B. Dobbss, A. L. Oliveira, J. G. Chagas, N. O. Aguiar, V. M. Rumjanek, E. H. Novotny, F. L. Olivares, R. Spaccini, A. Piccolo // *Eur. J. Soil Sci.* – 2012. – Vol. 63. – Pp. 315–324.
5. Мензянова, Н. Г. Дозозависимые эффекты наноразмерных форм гуминовых кислот в гидропонной культуре *Triticumaestivum*: индукция окислительного стресса и увеличение численности пограничных клеток / Н. Г. Мензянова, С. А. Пятина, А. В. Шабанов // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 64-86.
6. Неверов, А. А. Влияние погодных условий и внекорневой подкормки на водопотребление и продуктивность ячменя в степной зоне Оренбуржья / А. А. Неверов, А. С. Верещагина, Г. И. Бельков // *Животноводство и кормопроизводство*. – 2023. – Т. 106, № 3. – С. 225-238. – DOI 10.33284/2658-3135-106-3-225.
7. Пронько, Н. А. Водопотребление, урожайность и качество лука репчатого в зависимости от применения гуминовых удобрений при капельном поливе в Саратовском Заволжье / Н. А. Пронько, К. В. Корсаков, В. В. Пронько, В. В. Корсак // *Мелиорация и гидротехника*. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 18-30. – DOI 10.31774/2712-9357-2024-14-3-18-30.
8. Старцева, А. А. Влияние биопрепаратов Экстрасол и БисолбиФит на урожай ярового ячменя и коэффициент использования питательных веществ из минеральных удобрений на серой лесной тяжелосуглинистой почве / А. А. Старцева, Г. Н. Фадькин, Я. В. Костин // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. – 2013. – № 4(20). – С. 61-65.
9. Неверов, А. А. Влияние гуминовых препаратов на усвоение элементов минерального питания посевами ячменя / А. А. Неверов, А. С. Верещагина, Р. Ш. Ураскулов // *Животноводство и кормопроизводство*. – 2021. – Т. 104, № 3. – С. 114-126. – DOI 10.33284/2658-3135-104-3-114.
10. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 399 с.
11. Казюлин, Л. Ф. Гидротермический режим агрочернозема в условиях применения минеральных и гуминовых удобрений / Л. Ф. Казюлин // *Инновационные тенденции развития Российской науки: Материалы XVII международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 04–06 марта 2024 года*. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – С. 37-41.
12. Хорошаев, Д. А. Температурный режим серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром в полевом эксперименте по имитации почвенных засух / Д. А. Хорошаев, И. Н. Курганова, В. О. Лопес Де Гереню // *Агрофизика*. – 2019. – № 4. – С. 31-38. – DOI 10.25695/AGRPH.2019.04.05.
13. Лазарев, В. И. Влияние элементов технологий возделывания яровой пшеницы на влагообеспеченность посевов в условиях черноземных почв Курской области / В. И. Лазарев, О. В. Никитина // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2022. – № 9. – С. 21-28
14. Кураченко, Н. Л. Эффективность применения биологического стимулятора "Гипергрин" при возделывании яровой пшеницы в условиях Красноярской лесостепи / Н. Л. Кураченко, А. В. Шаропатова // *Вестник КрасГАУ*. – 2019. – № 12(153). – С. 49-56.

REFERENCES

1. Belousova, E. N. & Belousov, A. A. (2023) The influence of soil cultivation methods on productive moisture reserves in the agrochernoze of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Agrophysics*. 2, 14-21, doi: 10.25695 / AGRPH.2023.02.03. (In Russian)
2. Linkov, N. A., Linkov, S. A., Akinchin, A. V. & Kuznetsova, L. N. (2012) Changes in water consumption of winter wheat and productive moisture reserves under the influence of crop rotations, primary tillage methods and fertilizers. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 6, 42-45. (In Russian)
3. Kotlyarova, E. G. & Gritsina, V. G. (2021) Water regime indicators in soybean crops depending on the combination of organic and mineral fertilizers. *Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects*. 1(29), 108-116. (In Russian)
4. Canellas, L. P., Dobbss, L. B., Oliveira, A. L., Chagas, J. G., Aguiar, N. O., Rumjanek, V. M., Novotny, E. H., Olivares, F. L., Spaccini, R. & Piccolo, A. (2012) Chemical properties of humic matter as related to the induction of plant lateral roots. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 315-324.
5. Menzhanova, N. G., Pyatina, S. A. & Shabanov, A. V. (2023) Dose-dependent effects of nanosized forms of humic acids in hydroponic culture of *Triticum aestivum*: induction of oxidative stress and increase in the number of border cells. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology*. 1(16), 64-86. (In Russian)
6. Neverov, A. A., Vereshchagina, A. S. & Belkov, G. I. (2023) Influence of weather conditions and foliar feeding on water consumption and productivity of barley in the steppe zone of the Orenburg region. *Animal husbandry and forage production*. 3(106), 225-238. doi: 10.33284/2658-3135-106-3-225. (In Russian)
7. Pronko, N. A., Korsakov, K. V., Pronko, V. V. & Korsak, V. V. (2024) Water consumption, yield and quality of onions depending on the use of humic fertilizers under drip irrigation in the Saratov Trans-Volga region. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 3(14), 18-30. doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-3-18-30. (In Russian)
8. Startseva, A. A., Fadkin, G. N. & Kostin, Ya. V. (2013) Effect of Extrasol and BisolbiFit biopreparations on spring barley yield and the utilization rate of nutrients from mineral fertilizers on gray forest heavy loamy soil. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 4 (20), 61-65. (In Russian)
9. Neverov, A. A., Vereshchagina, A. S. & Uraskulov, R. Sh. (2021) Effect of humic preparations on the absorption of mineral nutrition elements by barley crops. *Animal husbandry and forage production*. 3(104), 114-126. doi: 10.33284/2658-3135-104-3-114. (In Russian)
10. Vadyunina, A. F. & Korchagina, Z. A. (1986) *Methods for studying the physical properties of soils.*: Moscow State University Publishing House. 399 p. (In Russian)
11. Kazyulin, L. F. (2024) Hydrothermal regime of agrochernoze under the application of mineral and humic fertilizers In: *Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the XVII international scientific and practical conference of young scientists, Krasnoyarsk, 4-6 March 2024, Krasnoyarsk, Russia, Krasnoyarsk KSAU*, pp. 37-41. (In Russian)
12. Khoroshaev, D. A., Kurganova, I. N. & Lopez De Guereñu, V. O. (2019) Temperature regime of gray forest soil under sown meadow and bare fallow in a field experiment to simulate soil droughts. *Agrophysics*. 4, 31-38. doi: 10.25695/AGRPH.2019.04.05. (In Russian)
13. Lazarev, V. I. & Nikitina O. V. (2022) Influence of elements of spring wheat cultivation technologies on moisture supply of crops in chernoze soils of the Kursk region. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 9, 21-28. (In Russian)
14. Kurachenko, N. L. & Sharapova A. V. (2019) Efficiency of using the biological stimulator "Gypergreen" in the cultivation of spring wheat in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Bulletin of KrasSAU*. 12 (153), 49-56. doi: 10.36718/1819-4036-2019-12-49-56. (In Russian)

HYDROTHERMAL REGIME OF KRASNOYARSK FOREST-STEPPE AGRO-CHERNOZEM SOILS UNDER FERTILIZER APPLICATION

L. F. Kazyulin, N. L. Kurachenko

In a three-year field experiment conducted at the Minderlinskoye training farm of Krasnoyarsk State Agrarian University in the Krasnoyarsk forest-steppe, the effect of humic and mineral nitrogen fertilizers on the hydrothermal regime of the arable layer of agro-chernoze soils was studied. The aim of the study was to assess

the influence of humic and mineral nitrogen fertilizers on the hydrothermal regime of the arable layer of agro-chnozem soils. It was found that the effect of applied fertilizers on changes in soil temperature and productive moisture reserves was controlled by weather conditions during the growing seasons and was most pronounced in the dry year of 2023. The humic fertilizers Lignohumate AM, Humate K Souffler, and ammonium nitrate, as well as their combination in spring wheat cultivation, resulted in agrochnozem cooling by 0.1–0.3°C relative to the control, on average, over the entire study period. Maximum productive moisture reserves (32–33 mm) were achieved with Lignohumate AM applied alone and with ammonium nitrate added at doses of N30 and N60.

Keywords: typical clay-illuvial agrochnozem, humic fertilizers, ammonium nitrate, soil temperature, productive moisture reserves.

Поступила в редакцию 04.03.2026 г.

Казюлин Лев Федорович

аспирант кафедры почвоведения и агрохимии, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, РФ.

E-mail: levkrsk.99@mail.ru.

ORCID: 0009-0004-6637-1733

SPIN-код: 8799-7760

AuthorID: 1148402

Kazyulin Lev Fedorovich

postgraduate student of the Department of Soil Science and Agrochemistry, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, RF.

Кураченко Наталья Леонидовна

доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и агрохимии, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, РФ.

E-mail: kurachenko@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-1761-4995

SPIN-код: 8849-0135

AuthorID: 89509

Kurachenko Natalia Leonidovna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Science and Agrochemistry, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, RF

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОСВЕЩЕННОСТИ И ТЕМНОТЫ НА ПРОЦЕССЫ АДАПТАЦИИ У ГОРОДСКИХ ЖИТЕЛЕЙ

© 2026. *Е. В. Обыденных, О. В. Мячина, А. Н. Пашков, Н. В. Парфенова, А. А. Чепрасова*

В условиях глобальной студенческой миграции адаптация к новой социокультурной и экологической среде, особенно в городской среде с нарушенными циклами освещенности, представляет собой сложную задачу. Данное исследование фокусируется на влиянии изменений режима освещенности на физиологическую адаптацию студентов из Индии.

Экспериментальное изучение воздействия 40-минутного пребывания в темноте выявило статистически значимое снижение адаптационных возможностей, параметров центральной и вегетативной регуляции, а также психоэмоционального состояния обследуемых. Отмечено снижение показателей в 1,5–1,8 раза, что свидетельствует о восприятии темноты как стрессового фактора, дестабилизирующего гомеостаз.

Исследование выявило умеренные и сильные корреляционные взаимосвязи между изученными показателями, подчеркивая ключевую роль вегетативной нервной системы и центральной регуляции в процессах адаптации. Усиление корреляций в условиях темноты указывает на повышение чувствительности адаптационных механизмов к дефициту сенсорной информации.

Ключевые слова: урбанизированная среда, уровень адаптации, вегетативная регуляция, психоэмоциональное состояние, стресс

Введение. В условиях глобальной урбанизации, характеризующейся интенсивным световым загрязнением, изучение влияния освещенности на физиологические процессы и адаптационные механизмы человека приобретает особую актуальность. Городская среда, в отличие от естественной, характеризуется нарушением естественных циклов света и темноты, что оказывает существенное воздействие на циркадианные ритмы, гормональный баланс и общее состояние здоровья. Так, световое загрязнение нарушает секрецию мелатонина [1]. Исследования показывают, что часто это создает повышенный риск развития ряда заболеваний, включая нарушения сна, депрессию, ожирение и некоторые виды рака.

В данном контексте, вопросы адаптации особенно актуализируются при переезде из одной климатогеографической зоны в другую. В связи с этим студенты, приезжающие в Россию на обучение, например, из Индии (индийские студенты), представляют собой уязвимую группу, требующую детального эколого-физиологического анализа [2, 3]. При этом необходимо учитывать, что на начальных этапах они, как правило, подвергаются еще и дополнительному стрессу, связанному с учебной нагрузкой, социальной адаптацией и проживанием в незнакомой городской среде. Интенсивное использование электронных устройств и длительное пребывание в условиях искусственного освещения также может оказывать влияние на адаптационные резервы организма студентов [4, 5].

Цель. Проанализировать особенности адаптационного потенциала, показатели вегетативной и центральной регуляции, психоэмоциональную активность у индийских студентов в условиях освещения и после 40-минутного пребывания в темноте.

Материалы и методы. В проведенном исследовании приняли участие 20 студентов мужского пола из Индии, проживающих в условиях городской среды с интенсивным световым загрязнением; их средний возраст составил $20,05 \pm 0,6$ лет. Включение в исследование определялось следующими критериями: отсутствие

хронических заболеваний в фазе обострения, отсутствие приема каких-либо медикаментов на момент обследования, а также добровольное согласие на участие. Исключение из исследования было обусловлено наличием острых инфекционных заболеваний. Необходимо подчеркнуть, что для мужского организма характерна тоническая модель функционирования гормональной системы. Данная модель предполагает поддержание относительно стабильного и постоянного уровня гормонов, что, в свою очередь, обеспечивает гомеостаз и нормальное протекание метаболических и физиологических процессов [7–9].

Оценка адаптационного потенциала осуществлялась с применением аппаратно-программного комплекса «Омега М» посредством регистрации сердечного ритма с использованием датчиков, закрепленных на запястьях. Регистрация проводилась непосредственно в начале исследования при освещении, а также после 40-минутного пребывания в условиях темноты. Анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР) позволил оценить общий уровень адаптации организма, состояние вегетативной и центральной регуляции, психоэмоциональное состояние, а также интегральный показатель функционального состояния молодых людей. Исследование проводилось двукратно в условиях освещенности и после 40 минутного нахождения в темноте.

Для статистической обработки данных использовались пакеты программ Microsoft Office Excel (2007) и Statistica SPSS версии 17. Оценка значимости различий между группами осуществлялась с применением непараметрических критериев, учитывая потенциальное отклонение распределений от нормальности. Результаты представлены в виде среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего. Критический уровень значимости для всех статистических тестов был установлен на уровне $p < 0,05$. Также были проведены корреляционные исследования для выявления взаимосвязей между показателями на свету и в темноте.

Результаты и обсуждение. Комплексный анализ функционального состояния организма включал ряд ключевых показателей: уровень адаптации (УА), характеризующий резистентность организма к стрессорам; индекс вегетативной регуляции (ВР), отражающий баланс симпатической и парасимпатической нервной системы; показатель центральной регуляции (ЦР), определяющий степень влияния центральной нервной системы на периферические функции; психоэмоциональное состояние (ПА), характеризующее эмоциональную устойчивость и общее самочувствие; интегральная оценка функционального статуса (Н), представляющая собой обобщенный показатель функциональных резервов организма. Нормативным диапазоном для перечисленных показателей являлся интервал 50–100 %.

Уровень адаптации (УА) рассчитывался на основе анализа мощности спектра в диапазоне высоких частот (HF), отражающего активность парасимпатической нервной системы, и характеризует способность организма адаптироваться к внешним и внутренним воздействиям. Индекс вегетативной регуляции (ВР) определялся как соотношение мощности спектра в диапазоне низких (LF) и высоких (HF) частот (LF/HF), отражая баланс симпатической и парасимпатической активности. Показатель центральной регуляции (ЦР) рассчитывался на основе анализа очень низких частот (VLF) спектра ВСР, отражая влияние центральных регуляторных механизмов на сердечный ритм. Психоэмоциональное состояние (ПА) оценивалось на основании анализа временных показателей ВСР, таких как стандартное отклонение интервалов RR (SDNN) и корень квадратный из средней суммы квадратов разностей между последовательными интервалами RR (RMSSD), отражающих общую вариабельность сердечного ритма и парасимпатическую активность соответственно. Интегральный показатель функционального состояния (Н) рассчитывался

как комплексная оценка всех вышеперечисленных параметров, отражая общие функциональные резервы организма [6].

Результаты, представленные на рис. 1, указывают на дифференцированное влияние световой и темновой адаптации на адаптационный потенциал юношей из Индии. Зафиксировано статистически значимое снижение показателей УА, ВР, ЦР и Н в условиях темновой адаптации по сравнению с условиями освещения ($p < 0,05$). Данная динамика свидетельствует об ослаблении функциональных резервов кардиоваскулярной системы и снижении регуляторных возможностей вегетативной нервной системы в условиях дефицита освещенности [7, 8]. Эти результаты согласуются с исследованиями, демонстрирующими влияние освещенности на циркадные ритмы и активность симпатической нервной системы.

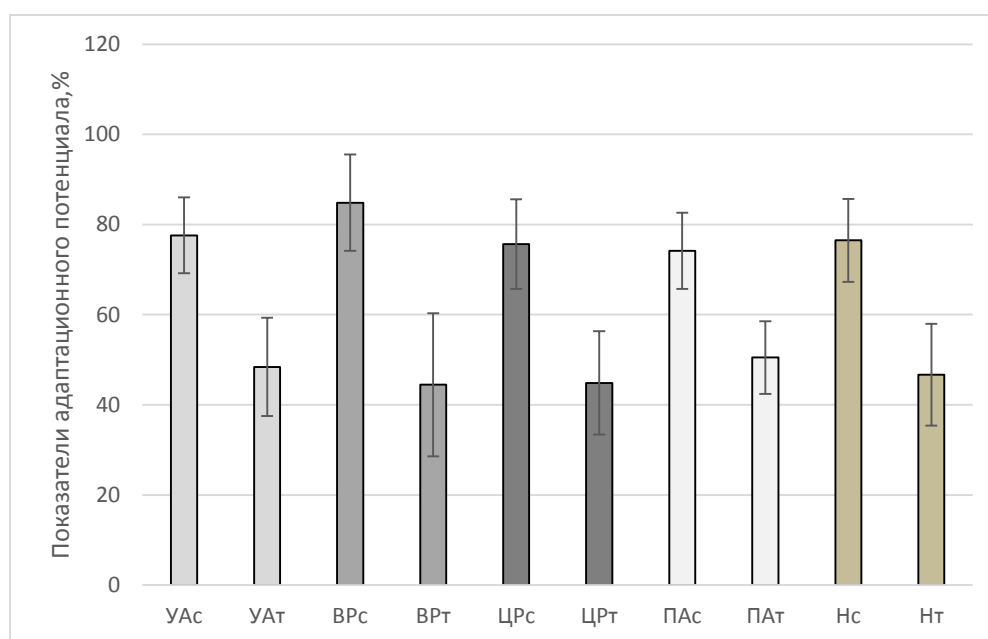


Рис. 1. Показатели адаптационного потенциала у юношей на свету (с) и в темноте (т)

Анализ адаптационных возможностей организма при воздействии различных световых условий выявил значимые различия в функциональном статусе. В условиях освещенности уровень адаптации (УАс) составил 77,6 %, что соответствует референсным значениям и свидетельствует об удовлетворительных адаптивных резервах. В противовес этому, в условиях темноты (УАт) показатель снизился до 48,4 %, что указывает на снижение адаптационных возможностей в условиях дефицита освещения. Данные результаты соответствуют исследованиям, подтверждающим влияние светового режима на физиологические процессы и адаптацию [9–13].

Индекс вегетативной регуляции (ВР) также демонстрирует выраженные изменения. В условиях освещения (ВРс) значение индекса составило 84,85 %, что указывает на сбалансированную активность вегетативной нервной системы. В темноте (ВРт) наблюдается снижение индекса до 44,55 %, что может свидетельствовать о дисбалансе вегетативного гомеостаза и снижении функциональной активности регуляторных систем. Обнаруженные изменения согласуются с концепцией роли вегетативной нервной системы в адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды [14].

Показатель центральной регуляции (ЦР) отражает сопоставимые закономерности. В условиях освещения (ЦРс) значение составило 75,65 %, что свидетельствует об

адекватном центральном контроле над физиологическими функциями. В условиях темноты (ЦР_т) значение уменьшается до 44,85 %, что может быть связано с ослаблением активности центральных регуляторных механизмов. Динамика ЦР отражает роль центральной нервной системы в координации адаптационных процессов в ответ на изменения светового воздействия [15, 16].

Психоземotionalное состояние (ПА), оцененное при освещении (ПА_с), составило 74,15 %, что указывает на стабильное эмоциональное состояние. Однако, в условиях темноты (ПА_т) показатель снижается до 50,5 %, что отражает потенциальное воздействие дефицита света на эмоциональный фон и общее состояние.

Интегральная оценка функционального статуса организма (Н) в условиях освещения (Н_с) достигает 76,5 %, что соответствует благоприятному функциональному состоянию. В условиях темноты (Н_т) данная оценка снижается до 46,7 %, что отражает общее снижение адаптивных возможностей организма при недостаточной освещенности [16].

Для понимания механизмов, лежащих в основе наблюдаемых изменений, необходимо учитывать роль мелатонина, гормона, синтез которого ингибируется при ярком свете и стимулируется в темноте. Мелатонин играет важную роль в регуляции циркадных ритмов и адаптации организма к смене дня и ночи [17]. Снижение показателей УА_т, ВР_т, ЦР_т и ПА_т может быть частично обусловлено нарушением синтеза и секреции мелатонина в условиях дефицита освещения, что приводит к десинхронизации физиологических процессов и снижению адаптационных возможностей организма [18].

Кроме того, необходимо учитывать влияние светового режима на экспрессию генов, участвующих в регуляции циркадных ритмов и метаболических процессов. Исследования показывают, что свет способен модулировать активность "часовых генов" в различных тканях и органах, что, в свою очередь, влияет на широкий спектр физиологических функций, включая метаболизм глюкозы, иммунную защиту и когнитивные функции. В условиях хронического дефицита освещения нарушение экспрессии "часовых генов" может привести к развитию метаболических нарушений, снижению иммунитета и ухудшению когнитивных способностей [19].

Анализ корреляционных связей между различными показателями адаптации у юношей на свету и в темноте демонстрирует их значительные взаимосвязи (табл. 1). В условиях освещения наблюдается высокая корреляция по всем изученным параметрам, что указывает на то, что ПА в большей степени способствует лучшей интеграции вегетативной и центральной регуляции, а также общему адаптационному потенциалу.

Таблица 1

Корреляционные связи адаптационного потенциала у студентов из Индии

Показатель	на свету	в темноте
УА	ВР (r=+0,72; p≤0,001) ЦР (r=+0,37; p≤0,01) ПА (r=+0,45; p≤0,01) ИП (r=+0,54; p≤0,01)	ВР (r=+0,76; p≤0,001) ЦР (r=+0,77; p≤0,001) ПА (r=+0,88; p≤0,001) ИП (r=+0,87; p≤0,001)
ВР	ЦР (r=+0,187; p≤0,01) ПА (r=+0,189; p≤0,01) ИП (r=+0,73; p≤0,001)	ЦР (r=+0,53; p≤0,01) ПА (r=+0,86; p≤0,001) ИП (r=+0,91; p≤0,001)
ЦР	ПА (r=+0,58; p≤0,01) ИП (r=+0,005; p≤0,01)	ПА (r=+0,71; p≤0,001) ИП (r=+0,75; p≤0,001)
ПА	ИП (r=-0,03; p≤0,01)	ИП (r=+0,94; p≤0,001)

Примечание: сила взаимосвязи при 0,35<r<0,70 – средняя; при r>0,70 – высокая

В условиях освещенности установлена высокая положительная корреляция между уровнем адаптации (УА) и индексом вегетативной регуляции (ВР) ($r=+0,72$; $p\leq 0,001$), указывающая на сопряженность процессов адаптации и вегетативной регуляции. Также выявлены статистически значимые, но умеренные положительные корреляции между УА и показателем центральной регуляции (ЦР) ($r=+0,37$; $p\leq 0,01$), психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,45$; $p\leq 0,01$) и интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,54$; $p\leq 0,01$), отображающие связь между общим уровнем адаптации и функциональными резервами организма.

Анализ корреляций индекса вегетативной регуляции (ВР) с другими параметрами в условиях освещенности выявил умеренные положительные связи с показателем центральной регуляции (ЦР) ($r=+0,187$; $p\leq 0,01$) и психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,189$; $p\leq 0,01$), а также высокую положительную корреляцию с интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,73$; $p\leq 0,001$). Это предполагает, что вариабельность ритма сердца, как индикатор адаптивности, тесно связана с интегральной оценкой функционального статуса и, в меньшей степени, с процессами центральной регуляции и эмоциональной стабильностью.

Взаимосвязь показателя центральной регуляции (ЦР) с другими показателями в условиях освещенности выявила умеренную положительную корреляцию с психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,58$; $p\leq 0,01$) и слабую корреляцию с интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,005$; $p\leq 0,01$). Это указывает на общность механизмов, лежащих в основе центральной регуляции и эмоциональной сферы [3].

Психоэмоциональное состояние (ПА) в условиях освещенности показало слабую отрицательную корреляцию с интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=-0,03$; $p\leq 0,001$), что может быть обусловлено различными стратегиями адаптации к стрессовым факторам.

В условиях темноты наблюдается усиление корреляционных связей между показателями адаптационного потенциала. В частности, уровень адаптации (УА) демонстрирует высокую положительную корреляцию с индексом вегетативной регуляции (ВР) ($r=+0,76$; $p\leq 0,001$), показателем центральной регуляции (ЦР) ($r=+0,77$; $p\leq 0,001$), психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,88$; $p\leq 0,001$) и интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,87$; $p\leq 0,001$). Это свидетельствует о консолидации адаптивных механизмов в условиях сенсорной депривации.

Индекс вегетативной регуляции (ВР) в темноте также демонстрирует высокую положительную корреляцию с показателем центральной регуляции (ЦР) ($r=+0,53$; $p\leq 0,001$), психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,86$; $p\leq 0,001$) и интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,91$; $p\leq 0,001$), что подчеркивает его роль в обеспечении когнитивной и эмоциональной деятельности в условиях ограниченной сенсорной информации.

Показатель центральной регуляции (ЦР) в условиях темноты обнаруживает высокую положительную корреляцию с психоэмоциональным состоянием (ПА) ($r=+0,71$; $p\leq 0,001$) и интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,75$; $p\leq 0,001$), что может быть связано с активацией компенсаторных механизмов.

Психоэмоциональное состояние (ПА) в темноте демонстрирует очень высокую положительную корреляцию с интегральной оценкой функционального статуса (ИП) ($r=+0,94$; $p\leq 0,001$), что может свидетельствовать о том, что ИП становится важным ресурсом, когда сенсорная информация ограничена.

Обнаруженные взаимосвязи подчеркивают ключевую роль вегетативной нервной системы и центральной регуляции в адаптационных процессах, а также значительное влияние психоэмоционального состояния на интегральный показатель адаптации. Усиление корреляций в условиях темноты указывает на повышенную чувствительность адаптационных механизмов к дефициту сенсорной информации, что может быть связано с активацией компенсаторных механизмов, направленных на поддержание гомеостаза. Низкая корреляция ПА с ИП на свету требует дальнейшего изучения, возможно, она обусловлена влиянием дополнительных факторов, таких как социальная поддержка и когнитивные стратегии преодоления стресса [20, 22].

В контексте возрастной физиологии следует отметить, что адаптационные возможности молодых людей, в частности, студентов, находятся в стадии формирования, и они более восприимчивы к воздействию факторов окружающей среды. Недостаточная освещенность, как стрессовый фактор, может оказывать негативное влияние на регуляторные системы организма и приводить к снижению адаптационного потенциала. В свою очередь, это может проявляться в ухудшении когнитивных функций, нарушении сна и снижении общей работоспособности [23–25].

Кроме того, перспективным направлением является разработка индивидуальных программ адаптации, учитывающих конституциональные особенности и психофизиологический профиль каждого студента. Для этого необходимо проведение комплексной диагностики адаптационного потенциала с использованием современных методов оценки вегетативной регуляции, психоэмоционального состояния и когнитивных функций [26–29]. Полученные данные позволят разработать персонализированные рекомендации по оптимизации образа жизни и повышению устойчивости к стрессовым факторам.

Выводы. В условиях 40-минутного пребывания в темноте у молодых людей из Индии уровень адаптационных возможностей, показатели центральной и вегетативной регуляции, психоэмоционального состояния резко снижаются почти в 1,5–1,8 раза, что говорит о восприятии организмом темноты, как сильного стрессового фактора. Изученные показатели обнаруживают умеренные и сильные корреляционные взаимосвязи и отражают ключевую роль вегетативной нервной системы и центральной регуляции в адаптационных процессах. В условиях темноты корреляции растут, что указывает на повышение чувствительности адаптационных механизмов к дефициту сенсорной информации и может быть обусловлено активацией компенсаторных механизмов гомеостаза.

Полученные результаты подтверждают целесообразность углубленного исследования механизмов адаптации человеческого организма к режимам освещенности с высокой контрастностью, учитывая влияние факторов окружающей среды и антропогенные аспекты городской среды. Необходимо акцентировать внимание на дифференцированной оценке адаптационных возможностей различных групп населения, проживающих в регионах с повышенным уровнем светового загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Masin S.C. Luminance Determinants of Perceived Surface Stratification in Two-Dimensional Achromatic Transparent Patterns / S.C. Masin // Perception. — 2000. — Vol. 29, iss. 7. — P. 853–861. — DOI: 10.1068/p3042.
2. Сычев Д.А. Персонализированная медицина: взгляд клинического фармаколога / Д.А. Сычев // Consilium Medicum. — 2017. — Т. 19, № 1. — С. 61–68.

3. Dresch-Langley B. Environmental Lighting Conditions, Phenomenal Contrast, and the Conscious Perception of Near and Far / B. Dresch-Langley, A.J. Reeves // *Brain Science*. — 2024. — Vol. 14, no. 10. — Art. No. 966. — DOI: 10.3390/brainsci14100966.
4. Кочурова Е.В. Диагностические возможности слюны / Е.В. Кочурова // *Клиническая лабораторная диагностика*. — 2014. — № 1. — С. 13–15.
5. Khurshid Z. Biochemical Analysis of Oral Fluids for Disease Detection / Z. Khurshid [et al.] // *Advances in Clinical Chemistry*. — 2021. — Vol. 100. — Pp. 205–253. — DOI: 10.1016/bs.acc.2020.04.005.
6. Система комплексного компьютерного исследования функционального состояния человеческого организма «Омега-М». Документация пользователя. — СПб., 2007. — С. 30–34.
7. Gardner A. Salivary Metabolomics: From Diagnostic Biomarker Discovery to Investigating Biological Function / A. Gardner, G. Carpenter, Po-Wah So // *Metabolites*. — 2020. — Vol. 10, iss. 2. — Art. No. 47. — DOI: 10.3390/metabo10020047.
8. Борисова О.В. Современный взгляд на клиническую ценность исследования ротовой жидкости в практике врача-педиатра / О.В. Борисова [и др.] // *Медицинский Совет*. — 2022. — № 16 (19). — С. 139–145. — DOI: 10.21518/2079-701X-2022-16-19-139-145.
9. Сравнительная оценка функциональных показателей внешнего дыхания, уровня физического здоровья и общего состояния вегетативной нервной системы у студентов биологов и медиков / О. Л. Ковязина, О. В. Фролова, О. Н. Лепунова, Н. С. Литвинова // *Известия Самарского научного центра РАН*. — 2016. — № 2-3. — С. 712-717
10. Круглень В.А. Оценка изменения функционального состояния студентов за время занятий по данным программно-аппаратного комплекса «Омега-М» / В.А. Круглень // *Проблемы здоровья и экологии*. — 2010. — № 4 (26). — С. 141-144
11. Микаелян Г.П. Биохимия ротовой жидкости в норме и при патологии: учебно-методическое пособие / Г.П. Микаелян [и др.]. — Москва: ИКАР, 2017. — 64 с.
12. Бельская Л.В. Хронофизиологические особенности электролитного состава слюны человека в норме / Л.В. Бельская [и др.] // *Экология человека*. — 2018. — № 5. — С. 28–40.
13. Турлак И.В. Слюна — основные направления исследования её свойств / И.В. Турлак // *Современные проблемы науки и образования*. — 2020. — № 4. — Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29934>.
14. Шилович Л.Л. Оценка текущего состояния функциональной и физической формы спортсменов с применением программно-аппаратного комплекса «Омега-С» / Л.Л. Шилович // *Проблемы здоровья и экологии*. — 2010. — № 1 (23). — С. 77-80
15. Кусакина А. Д. Вариационный анализ сердечного ритма: теоретические аспекты и реализация в программно-аппаратном комплексе «ОМЕГА-М» / А. Д. Кусакина, И. А. Смыслов, Н. Л. Ильина // *Вестник науки*. — 2025. — №5 (86). — С. 1913-1933.
16. Boswell-Casteel R.C. Equilibrative Nucleoside Transporters — a Review / R.C. Boswell-Casteel, F.A. Hays // *Nucleosides Nucleotides & Nucleic Acids*. — 2017. — Vol. 36, iss. 1. — P. 7–30. — DOI: 10.1080/15257770.2016.1210805.
17. Flyer J.N. Prospective Study of Adenosine on Atrioventricular Nodal Conduction in Pediatric and Young Adult Patients After Heart Transplantation / J.N. Flyer [et al.] // *Circulation*. — 2017. — Vol. 135, iss. 25. — P. 2485–2493. — DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.028087.
18. Коробова В.Н. Применение программно-аппаратного комплекса «Омега-М» для оценки функционального состояния больных острым коронарным синдромом / В.Н. Коробова, В.П. Михин // *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. — 2016. — № 2. — С. 61-63
19. Хабаров С. В. Мелатонин и его роль в циркадной регуляции репродуктивной функции (обзор литературы) / С. В. Хабаров, Н. А. Стерликова // *Вестник новых медицинских технологий*. — 2022. — № 3. — С. 17-31
20. Крестьянинова Т.Ю. Дозированная нагрузка и функциональное состояние организма (по данным тестов программно-аппаратного комплекса «Омега-М») / Т.Ю. Крестьянинова // *Материалы XIX региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, 13–14 марта 2014 г.* — Витебск, 2014. — С. 392–394.
21. Орлова Е. В. Оценка адаптации иностранных обучающихся методом анализа variability сердечного ритма: сборник трудов конференции. / Е. В. Орлова, А. Е. Кашук, Т. Н. Завьялова // *Научные исследования: от теории к практике : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 30 окт. 2016 г.)*. В 2 т. Т. 1 / редкол.: О. Н. Широков [и др.] — Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2016. — Т. 1, № 4 (10). — С. 10-13. — ISSN 2413-3957.
22. Муха А.И., Голубев Б.С., Зиновьев М.Ю. Патент РФ № 2 290 938: способ получения крови с повышенным содержанием нуклеозидов и нуклеотидов. — 2004.

23. Бароненко В.А. Здоровье и физическая культура студента / В.А. Бароненко, Л.А. Рапопорт. — Москва: Альфа-М; Инфра-М, 2009. — 336 с.
24. Еловицова Т.М. Слюна как биологическая жидкость и её роль в здоровье полости рта: учебное пособие / Т.М. Еловицова. — Екатеринбург, 2018. — 136 с.
25. Трегуб А.С. Оценка общего функционального состояния и адаптационных резервов организма человека методом variability сердечного ритма / А.С. Трегуб [и др.] // Международный студенческий научный вестник. — 2018. — № 4 (1). — С. 796-800.
26. Шлык Н.И. Сердечный ритм и тип регуляции у детей, подростков и спортсменов / Н.И. Шлык. — Ижевск: Удмуртский университет, 2009. — 259 с.
27. Баевский Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. — Москва: Медицина, 1997. — 265 с.
28. Липунова О.В. Роль эмоциональной сферы в структуре адаптивного поведения личности / О.В. Липунова // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — С. 702 (8 с). — EDN: TODUML.
29. Макеева В.С. Мониторинг физического состояния: учебное пособие / В.С. Макеева. — Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. — 100 с.

REFERENCES

1. Masin, S.C. (2000) Luminance Determinants of Perceived Surface Stratification in Two- Dimensional Achromatic Transparent Patterns. *Perception*, 29(7), 853–861. doi:10.1068/p3042.
2. Sychev, D.A. (2017) [Personalized medicine: a view of a clinical pharmacologist]. *Consilium Medicum*, 19(1), 61–68. (In Russian).
3. Dresch-Langley, B. & Reeves, A.J. (2024) Environmental Lighting Conditions, Phenomenal Contrast, and the Conscious Perception of Near and Far. *Brain Science*, 14(10), 966. doi:10.3390/brainsci14100966.
4. Kochurova, E.V. (2014) [Diagnostic capabilities of saliva]. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika =Clinical Laboratory Diagnostics*, (1), 13–15. (In Russian).
5. Khurshid, Z. et al. (2021) Biochemical Analysis of Oral Fluids for Disease Detection. *Advances in Clinical Chemistry*, 100, 205–253. doi: 10.1016/bs.acc.2020.04.005.
6. The comprehensive computer-based system for studying the functional state of the human body “Omega-M”. (2007) *User manual*. St. Petersburg, 30–34. (In Russian).
7. Gardner, A., Carpenter, G. & So, P.-W. (2020) Salivary Metabolomics: From Diagnostic Biomarker Discovery to Investigating Biological Function. *Metabolites*, 10(2), 47. doi:10.3390/metabo10020047.
8. Borisova, O.V. et al. (2022) [Modern view on the clinical value of oral fluid research in pediatric practice]. *Medicinskij Sovet =Medical Council*, 16(19), 139–145. (In Russian).
9. Kovyazina, O.L. et al. (2016) [Comparative assessment of functional respiratory parameters, physical health level, and autonomic nervous system status in biology and medical students]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN =Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, (2-3), 712–717. (In Russian).
10. Kruglenya, V.A. (2010) [Assessment of changes in the functional state of students during classes using the “Omega-M” hardware and software system]. *Problemy` zdorov`ya i e`kologii =Health and Ecology Issues*, 4(26), 141–144. (In Russian).
11. Mikaelyan, G.P. et al. (2017) *Biochemistry of oral fluid in health and disease: study guide*. Moscow: IKAR, 64 p. (In Russian).
12. Belskaya, L.V. et al. (2018) [Chronophysiological features of the electrolyte composition of human saliva in normal conditions]. *E`kologiya cheloveka =Human Ecology*, (5), 28–40. (In Russian).
13. Turlak, I.V. (2020) [Saliva — main directions of research into its properties]. *Sovremennyy`e problemy` nauki i obrazovaniya=Modern Problems of Science and Education*, (4). Retrieved from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29934>. (In Russian).
14. Shilovich, L.L. (2010) [Assessment of the current functional and physical fitness of athletes using the “Omega-S” hardware and software system]. *Problemy` zdorov`ya i e`kologii=Health and Ecology Issues*, (1), 77–80. (In Russian).
15. Kusakina, A.D., Smyslov, I.A. & Ilyina, N.L. (2025) [Variational analysis of heart rate: theoretical aspects and implementation in the “OMEGA-M” hardware and software system]. *Vestnik nauki= Bulletin of Science*, 5(86), 1913–1933. (In Russian).
16. Boswell-Casteel, R.C. & Hays, F.A. (2017) Equilibrative Nucleoside Transporters — a Review. *Nucleosides Nucleotides & Nucleic Acids*, 36(1), 7–30. doi:10.1080/15257770.2016.1210805.

17. Flyer, J.N. et al. (2017) Prospective Study of Adenosine on Atrioventricular Nodal Conduction in Pediatric and Young Adult Patients After Heart Transplantation. *Circulation*, 135(25), 2485–2493. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.117.028087.
18. Korobova, V.N. & Mikhin, V.P. (2016) [Application of the “Omega-M” hardware and software system for assessing the functional state of patients with acute coronary syndrome]. *Mediko-farmaceuticheskij zhurnal «Pul's» = Medical and Pharmaceutical Journal “Pulse”*, (2), 61–63. (In Russian).
19. Khabarov, S.V. & Sterlikova, N.A. (2022) [Melatonin and its role in circadian regulation of reproductive function (literature review)]. *Vestnik novy`x medicinskix texnologij = Bulletin of New Medical Technologies*, (3), 17–31. (In Russian).
20. Krestyaninova, T.Yu. (2014) [Dosed load and functional state of the body (according to tests of the hardware and software system “Omega-M”)]. In: *Proceedings of the XIX Regional Scientific and Practical Conference of Teachers, Researchers and Postgraduates*, March 13–14, 2014, Vitebsk, 392–394. (In Russian).
21. Orlova, E.V., Kashchuk, A.E. & Zavyalova, T.N. (2016) [Assessment of adaptation of foreign students by heart rate variability analysis]. In: Shirokov, O.N. et al. (eds.) *Scientific Research: From Theory to Practice: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference*, Cheboksary, October 30, 2016. Vol. 1, No. 4(10), 10–13. (In Russian).
22. Mukha, A.I., Golubev, B.S. & Zinoviev, M.Yu. (2004) Russian Federation Patent No. 2 290 938: *Method for obtaining blood with increased content of nucleosides and nucleotides*. (In Russian).
23. Baronenko, V.A. & Rapoport, L.A. (2009) *Health and physical culture of the student*. Moscow: Alfa-M; Infra-M, 336 p. (In Russian).
24. Elovikova, T.M. (2018) *Saliva as a biological fluid and its role in oral health: study guide*. Yekaterinburg, 136 p. (In Russian).
25. Tregub, A.S. et al. (2018) [Assessment of general functional state and adaptive reserves of the human body by heart rate variability method]. *Mezhdunarodny`j studencheskij nauchny`j vestnik = International Student Scientific Bulletin*, (4-1), 796–800. (In Russian).
26. Shlyk, N.I. (2009) *Heart rate and type of regulation in children, adolescents and athletes*. Izhevsk: Udmurt University, 259 p. (In Russian).
27. Baevsky, R.M. & Berseneva, A.P. (1997) *Assessment of adaptive capabilities of the organism and risk of disease development*. Moscow: Meditsina, 265 p. (In Russian).
28. Lipunova, O.V. (2012) [Role of the emotional sphere in the structure of adaptive behavior of the personality]. *Sovremennyye problemy` nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (6). (In Russian).
29. Makeeva, V.S. (2013) *Monitoring of physical condition: study guide*. Orel: State University — UNPK, 100 p. (In Russian).

THE INFLUENCE OF LIGHT AND DARK CONDITIONS ON ADAPTATION PROCESSES OF URBAN RESIDENTS

E. V. Obydennykh, O. V. Myachina, A. N. Pashkov, N. V. Parfenova, A. A. Cheprasova

In the context of global student migration, adaptation to new socio-cultural and ecological environment, especially urban environment with disrupted light cycles, is a difficult task. This study focuses on light conditions changes effect on Indian students' physiological adaptation.

An experimental study of 40-minute stay in the dark revealed statistically significant decrease in adaptive capabilities, parameters of central and autonomic regulation, and psycho-emotional state. 1.5–1.8 time decrease indicates perception of darkness as stressful factor destabilizing homeostasis.

The study revealed moderate and strong correlations between indicators, emphasizing important role of autonomic nervous system and central regulation in adaptation processes. Increased correlations in darkness conditions indicate an increase of adaptive mechanisms sensitivity to sensory information deficiency.

Keywords: urbanized environment, level of adaptation, vegetative regulation, psycho-emotional state, stress.

Поступила в редакцию 30.11.2025 г.

Обыденных Екатерина Викторовна

инженер кафедры биологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко»;
e-mail: obidennyh.e@yandex.ru,
ORCID: 0009-0003-0957-2507
SPIN-код: 4851-6392

Obydennykh Ekaterina Viktorovna

Engineer of the Department of Biology, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Мячина Ольга Владимировна

доктор медицинских наук, заведующий кафедрой биологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», г. Воронеж.
E-mail: biologvgma@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-6124-4469.
SPIN-код: 6814-8345

Myachina Olga Vladimirovna

Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Biology, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Пашков Александр Николаевич

доктор биологических наук, профессор кафедры биологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», г. Воронеж, Россия.
E-mail: biologvgma@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-2454-0397.
SPIN-код: 1089-6438

Pashkov Alexander N.

Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Biology, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Парфенова Наталья Владимировна

кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», г. Воронеж, Россия.
E-mail: assistant78.9@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-1917-0256.
SPIN-код: 4673-6594

Parfenova Natalya Vladimirovna

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Чепрасова Анна Александровна

ассистент кафедры биологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», г. Воронеж, Россия.
E-mail: cheprasova_81@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7275-4635.
SPIN-код: 3024-2770

Cheprasova Anna Alexandrovna

Assistant at the Department of Biology, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

ВЛИЯНИЕ ПРОТИВО-ГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИЯХ РАЗЛИЧНОЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

© 2026. А. О. Рагимов, Н. В. Чугай

Проведено комплексное исследование влияния различных типов противогололедных реагентов (пескосоляной смеси и коммерческого препарата «Аквайс Эконом») на физико-химические свойства почв в условиях урбозкосистемы города Владимира с разным уровнем антропогенной нагрузки. Установлено, что применение противогололедных препаратов приводит к значительной химической нагрузке на снежный покров, выражающейся в многократном превышении фоновых концентраций хлоридов, кальция и магния. В почвах выявлено развитие техногенного засоления по хлоридно-натриевому типу с суммой токсичных солей 10,25–14,76 мг-экв/кг, что соответствует категории сильнозасоленных почв, и резкому подщелачиванию (рН 8,01–8,61). Доказана деградация физических свойств городских почв, проявляющаяся в опесчанивании и ухудшении агрегатного состава. Несмотря на увеличение содержания подвижных форм фосфора и калия, отмечено снижение содержания органического вещества. Методом биотестирования с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) установлена умеренная и высокая фитотоксичность талых вод, наиболее выраженная для реагента «Аквайс Эконом». Результаты исследования свидетельствуют о комплексной деградации городских почв под воздействием противогололедных реагентов и обосновывают необходимость пересмотра практики зимнего содержания городских территорий.

Ключевые слова: противогололедные реагенты, урбозкосистемы, техногенное засоление, физико-химические свойства почв, фитотоксичность, гранулометрический состав, органический углерод, биотестирование, кресс-салат, экологический мониторинг.

Введение. Применение хлорсодержащих противогололедных реагентов (ПГР), преимущественно хлоридов натрия (NaCl), кальция (CaCl_2) и магния (MgCl_2), для обеспечения зимней эксплуатации транспортных и пешеходных коммуникаций в условиях городских агломераций является значимым фактором химического загрязнения и последующей деградации почвенного покрова [1–3].

В период снеготаяния миграция талых вод приводит к инфильтрации и аккумуляции солевых ионов в почвенной толще, что инициирует ряд негативных процессов [4]. Ключевым из них является осмотический стресс у растений: повышение осмотического давления почвенного раствора нарушает нормальный водный баланс, затрудняя поглощение воды корневыми системами даже при ее физическом наличии, что вызывает физиологическую засуху [5–7].

Параллельно на ряду с этим, протекают процессы ионообменной деградации. Ионы натрия (Na^+) вытесняют из почвенного поглощающего комплекса (ППК) двухвалентные катионы кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}). Это вызывает пептизацию коллоидов и разрушение почвенной структуры – почва утрачивает водопрочную макроагрегатность, становится склонной к заплыванию и уплотнению, а также ухудшается ее аэрация [8].

Высокие концентрации ионов хлора (Cl^-) и натрия (Na^+) также провоцируют дисбаланс минерального питания растений, нарушая физиологические механизмы поглощения и метаболизма необходимых элементов, таких как калий, фосфор и азот [9]. Визуально это проявляется в виде хлороза листовых пластинок, угнетения ростовых процессов и, в конечном счете, гибели растительности.

Наряду с физико-химическими факторами, данные изменения создают условия для биологической деградации. Солевой стресс угнетающе воздействует на почвенную биоту – бактерии, грибы, актиномицеты и дождевых червей, чья жизнедеятельность критически важна для процессов разложения органического вещества, гумификации и поддержания биогеохимических циклов. Деструкция микробных ценозов и мезофауны трансформирует почву из динамичной экосистемы в инертную субстанцию [10].

Таким образом, техногенное засоление, индуцированное применением ПГР [11], представляет собой комплексную проблему, ведущую к нарушению физико-химических свойств, биологической активности и плодородия городских почв, что требует проведения системного экологического мониторинга и разработки стратегий минимизации ущерба.

Цель исследования: оценить степень и характер влияния различных типов противогололедных препаратов (пескосоляной смеси и реагента «Аквайс Эконом») на физико-химические свойства почв и токсикологическую нагрузку на территории урбозкосистемы города Владимира с разным уровнем антропогенной нагрузки.

Задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ уровня химического загрязнения снежного покрова и почв на территориях города Владимира с различной антропогенной нагрузкой, обрабатываемых пескосоляной смесью и коммерческим противогололедным реагентом «Аквайс Эконом».

2. Исследовать трансформацию физико-химических свойств почв под воздействием противогололедных препаратов, включая оценку гранулометрического и агрегатного состава, содержания органического углерода и основных элементов питания (азот, фосфор, калий).

3. Оценить фитотоксичность талых вод и экологическое состояние городских почв методом биотестирования с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и установить корреляцию между химическим составом проб и биологическими ответами тест-культуры.

Материал и методика исследования. Исследование проводили на территории города Владимира. Объектами исследования стали почвы территорий с различным уровнем антропогенной нагрузки, которые были разделены на следующие категории: территории с наивысшей степенью антропогенной нагрузки, территории общественных пространств, а также закрытые и внутридворовые территории. В качестве фоновой территории был выбран земельный участок в черте городской агломерации, не испытывающий воздействия от применения противогололедных средств (ПГС).

Отбор образцов проводили согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 [12] и ГОСТ 28168-89 [13]. Отбор снежной массы проводили в зимний период – январь 2025 года. Отбор почвенных образцов проводили в момент таяния снега в марте–апреле 2025 года. Для каждой территории отбирали индивидуальные пробы методом конверта, из которых формировали одну объединенную пробу. Оценку загрязнения почв и снега проводили согласно ГОСТ 17.4.2.01-81 [14] и ГОСТ 17.4.3.06-86 [15].

Фитотестирование (определение энергии прорастания, всхожести, длины корня и побега) проводили согласно ГОСТ 33637-2015 [16, 17]. В качестве тест-культуры использовали кресс-салат (*L. sativum*).

Анализ физических свойств почв городских территорий проводили методом механического анализа с использованием раствора пирофосфата натрия в модификации С.И. Долгова и А.И. Личмановой, а агрегатный анализ почв – методом Н.И. Саввинова. Метод заключался в определении количества агрегатов разного размера методом

«сухого» просеивания через колонку сит диаметром 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 мм с последующим взвешиванием и подсчетом содержания в процентах от массы воздушно-сухой почвы. Анализ химических свойств почв городских территорий проводили согласно ГОСТ 26204-91 [18], ГОСТ 26107-84 [19], ГОСТ 26213-91 [20], ГОСТ 26423-85 [21], ГОСТ 26424-85 [22], ГОСТ 26425-85 [23], ГОСТ 26426-85 [24], ГОСТ 26427-85 [25], ГОСТ 26428-85 [26], ГОСТ 26950-86 [27]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета анализа Microsoft Excel. Оценку достоверности различий между опытными участками и фоном проводили с использованием t-критерия Стьюдента. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

Анализ результатов. Для оценки первичного химического загрязнения, вносимого в экосистему города в зимний период, был проведен анализ химического состава снежного покрова, который выступает эффективным накопителем (депо) поллютантов, в том числе водорастворимых солей, поступающих от противогололедных препаратов [28]. Результаты определения массовых концентраций ключевых анионов (нитрат-, хлорид-, сульфат-) и катионов (кальций, магний) в пробах снега, отобранных на территориях с разным уровнем антропогенной нагрузки, представлены в таблице 1. Сравнение проводилось с фоновой территорией, не подверженной воздействию противогололедных средств. В таблице 1 приведены средние арифметические значения ($p \leq 0,05$)

Таблица 1
Химический состав снега на территориях с разным уровнем антропогенной нагрузки, мг/л

Территория	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Фон	2,40	2,50	2,10	3,05	1,20
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки					
Пескосоляная смесь	3,50	5,50	3,00	2,14	1,60
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	3,60	5,34	2,88	4,28	2,30
Территория общественных пространств					
Пескосоляная смесь	3,08	2,85	3,25	3,17	2,40
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	3,60	2,50	3,84	2,85	2,20
Территория жилых пространств					
Пескосоляная смесь	3,60	2,73	3,80	2,79	1,20
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	3,70	4,18	4,90	4,18	1,29

Относительная ошибка среднего не превышала 7 %. Пробы с фоновой территории демонстрируют фоновый уровень ионного состава талых вод. Концентрации всех исследуемых ионов находятся на относительно низком уровне, что является точкой отсчета для оценки загрязнения на других участках.

Анализ показал, что наиболее значимый рост концентраций наблюдается для хлорид-иона (Cl^-), являющегося основным компонентом как пескосоляной смеси (NaCl), так и реагента «Аквайс Эконом». На территориях с наивысшей нагрузкой концентрация Cl^- при использовании пескосоляной смеси достигает 5,50 мг/л, а при использовании «Аквайс Эконом» – 5,34 мг/л, что более чем в 2 раза превышает фоновый уровень (2,50 мг/л). Это прямо указывает на интенсивное поступление хлорсодержащих реагентов.

Существенные различия наблюдаются в содержании катионов кальция и магния. В пробе от «Аквайс Эконом» на территории с наивысшей нагрузкой зафиксированы максимальные концентрации Ca^{2+} (4,28 мг/л) и Mg^{2+} (2,30 мг/л), значительно превышающие как фон, так и показатели для пескосоляной смеси. Это свидетельствует о том, что коммерческий реагент, вероятно, имеет комплексный состав, включающий

хлориды кальция и, возможно, магния, что может усиливать токсикологическую нагрузку и потенциал для смешанного типа засоления почв.

Концентрации нитратов и сульфатов также повышены на всех территориях по сравнению с фоном, однако их рост менее выражен, чем у хлоридов. Это может быть связано как с примесями в реагентах, так и с поступлением из других антропогенных источников (автотранспорт, промышленные выбросы) [29].

Сравнительная оценка по типам территорий показала, что территории с наивысшей антропогенной нагрузкой демонстрируют пиковые концентрации для большинства ионов, особенно для Cl^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} , что ожидаемо связано с максимальными дозами применяемых реагентов и интенсивным движением транспорта. На территориях общественных и жилых пространств наблюдается более вариабельная картина. Например, в жилых пространствах при использовании «Аквейс Эконом» фиксируется высокое содержание Cl^- (4,18 мг/л) и SO_4^{2-} (4,90 мг/л), что может указывать на его активное применение и кумулятивный эффект в замкнутых пространствах дворов.

Для количественной оценки загрязнения снежного покрова использовали гигиенический норматив (ГН 2.1.5.1315-03) [30] для воды водоемов как косвенный показатель. Превышение над фоновым уровнем по хлоридам в 2,2 раза (для пескосоляной смеси на магистралях) является значительным и указывает на умеренно опасный уровень загрязнения по этому компоненту. Суммарный солевой состав талых вод на опытных участках существенно выше фонового. Наиболее неблагоприятный ионный профиль формируется при использовании реагента «Аквейс Эконом» на территориях с высокой нагрузкой, где наблюдается сочетанное повышенное содержание токсичных ионов Cl^- , а также Ca^{2+} и Mg^{2+} , усиливающих осмотическое давление.

Проведенный анализ показывает, что снежный покров урбанизированной территории аккумулирует значительное количество водорастворимых солей, источником которых являются противогололедные препараты. Пескосоляная смесь вносит основной вклад в загрязнение хлоридами, в то время как коммерческий реагент «Аквейс Эконом» формирует более сложный и, вероятно, более токсичный солевой комплекс за счет дополнительного поступления ионов кальция и магния. Полученные данные позволяют прогнозировать высокую солевую нагрузку на почвы и грунтовые воды в период снеготаяния, что является предпосылкой для их дальнейшей деградации.

Для оценки влияния противогололедных препаратов на один из фундаментальных физических параметров почвы был проведен гранулометрический анализ, который определяет такие ключевые свойства, как водно-воздушный режим, способность к структурообразованию и миграции веществ. В таблице 2 представлены данные по распределению физического песка (фракции 1,0–0,05 мм), физической глины (фракции <0,01 мм) и пыли (промежуточные фракции) в почвах исследуемых территорий.

Фоновая территория характеризуется содержанием физической глины (<0,01 мм) 50,7 % и ила (<0,001 мм) 16,4 %. Преобладают фракции 0,05–0,01 мм (26,1 %) и 0,005–0,001 мм (20,4 %). По классификации Н.А. Качинского данная почва относится к тяжелосуглинистой.

Анализ показал выраженные изменения гранулометрического состава под влиянием реагентов. Так, на территории с наивысшей нагрузкой при применении пескосоляной смеси содержание физической глины снизилось до 35,1 % (на 15,6 % относительно фона). При применении «Аквейс Эконом» – до 46,1 % (снижение на 4,6 %). На территории общественных пространств: пескосоляная смесь – 31,2 % (снижение на 19,5 %); «Аквейс Эконом» – 42,3 % (снижение на 8,4 %). На территории жилых пространств: пескосоляная смесь – 27,5 % (снижение на 23,2 %); «Аквейс Эконом» – 36,9 % (снижение на 13,8 %).

Таблица 2

Гранулометрический состав городских почв на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки

Территория	1– 0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,001	<0,001	<0,01
Фон	4,7	18,5	26,1	13,9	20,4	16,4	50,7
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки							
Пескосоляная смесь	8,5	24,3	32,1	12,8	13,5	8,8	35,1
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	5,2	19,8	28,9	15,7	18,2	12,2	46,1
Территория общественных пространств							
Пескосоляная смесь	9,8	25,6	33,4	11,9	12,3	7,0	31,2
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	6,7	21,2	29,8	14,5	16,8	11,0	42,3
Территория жилых пространств							
Пескосоляная смесь	11,2	26,8	34,5	10,7	10,8	6,0	27,5
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	8,4	23,1	31,6	13,2	14,7	9,0	36,9

Трансформация гранулометрического состава связана с вымыванием тонких фракций (< 0,01 мм) тальмими водами, механическим выносом частиц транспортом и пешеходами, а также привнесением песчаного материала при использовании пескосоляных смесей.

Пескосоляная смесь вызывает более значительные изменения – снижение содержания физической глины на 15,6–23,2 % в зависимости от территории. Реагент «Аквайс Эконом» приводит к меньшим изменениям (4,6–13,8 %), что свидетельствует о его меньшем воздействии на гранулометрический состав.

На всех территориях, обрабатываемых пескосоляной смесью, происходит переход из тяжелосуглинистых в средне- и легкосуглинистые разновидности. Наиболее значительные изменения отмечены в жилых пространствах, где почва становится легкосуглинистой.

Согласно ГОСТ 17.4.3.06-86, изменение гранулометрического состава более чем на 15 % считается значительным нарушением почвенного покрова. На всех территориях с применением пескосоляной смеси это превышение зафиксировано.

Таким образом, применение противогололедных реагентов приводит к значительной трансформации гранулометрического состава городских почв с тенденцией к опесчаниванию. Наиболее выраженные изменения вызывает использование пескосоляной смеси, что связано с механическим внесением песчаного материала и усиленной эрозией тонких фракций. Реагент «Аквайс Эконом» демонстрирует менее выраженное воздействие на физические свойства почв.

Для оценки структурного состояния почвы, определяющего ее устойчивость к водной эрозии и аэрационные свойства, был проанализирован агрегатный состав. В таблице 3 представлены результаты определения агрегатного состава почв методом сухого просеивания по Н.И. Саввинову.

Фоновая территория характеризуется оптимальным агрегатным составом: содержание агрономически ценных агрегатов (0,25–10 мм) составляет 71,1 %, водопрочных макроагрегатов (>0,25 мм) – 75,6 %.

Под влиянием противогололедных реагентов наблюдается ухудшение структурного состояния: на территории с наивысшей нагрузкой содержание агрегатов 0,25–10 мм снижено для пескосоляной смеси до 63,0 %; для «Аквайс Эконом» – до

67,5 %. На территории общественных пространств: пескосоляная смесь – 62,8 %; «Аквайс Эконом» – 65,5 %. На территории жилых пространств: пескосоляная смесь – 61,5 %; «Аквайс Эконом» – 64,3 %.

Таблица 3
Агрегатный состав городских почв на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки

Территория	>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	<0,25
Фон	14,5	12,6	8,2	16,5	8,6	17,4	6,1	8,3	9,1
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки									
Пескосоляная смесь	21,0	18,0	12,0	15,5	6,0	12,0	4,0	5,5	5,0
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	18,5	16,0	11,0	15,0	6,5	13,0	5,0	9,0	11,0
Территория общественных пространств									
Пескосоляная смесь	19,5	16,5	11,0	15,8	6,5	13,5	4,5	6,5	6,2
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	17,5	15,0	10,5	15,5	7,0	14,0	5,5	8,0	9,0
Территория жилых пространств									
Пескосоляная смесь	18,0	15,5	10,5	15,5	7,0	14,0	5,0	7,5	7,0
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	17,0	14,5	10,0	15,5	7,5	14,5	5,8	7,0	8,5

Анализ выявил изменение фракционного состава: снижение содержания наиболее ценных фракций 3–7 мм на 30–40 %, увеличение пылевидной фракции (<0,25 мм) в 1,5–2 раза, перераспределение в сторону крупных (>10 мм) и мелких (<1 мм) фракций.

Коэффициент структурности (отношение содержания агрегатов > 0,25 мм к содержанию агрегатов <0,25 мм) ухудшился с 3,1 (оптимальный на фоне) до 1,2–1,8 (неудовлетворительный) для пескосоляной смеси и до 2,1–2,6 (удовлетворительный) для «Аквайс Эконом».

Содержание водопрочных агрегатов >0,25 мм снижается на 15–25 % на территориях с применением реагентов, что свидетельствует о значительном ухудшении устойчивости почвенной структуры. Реагент «Аквайс Эконом» демонстрирует менее выраженное негативное воздействие. Разница в содержании агрономически ценных агрегатов между реагентами составляет 4–5 %.

Согласно Методическим указаниям по оценке деградации почв, на исследуемых территориях зафиксирована слабая (на 10–20 %) и средняя (на 20–30 %) степень деградации структуры. Наблюдается прямая зависимость между ухудшением агрегатного состава и увеличением содержания иона натрия в ППК, снижением содержания органического углерода и изменением гранулометрического состава.

В целом, применение противогололедных реагентов приводит к значительной деградации структурного состояния почв. Наиболее выраженные негативные изменения наблюдаются при использовании пескосоляной смеси. Ухудшение агрегатного состава проявляется в снижении водопрочности, увеличении пылевидной фракции и уменьшении содержания агрономически ценных агрегатов, что способствует развитию эрозионных процессов и ухудшает водно-воздушный режим почв.

Важнейшим аспектом оценки влияния противогололедных реагентов является анализ изменения химических свойств и показателей плодородия городских почв. В таблице 4 представлены средние арифметические значения по основным агрохимическим характеристикам ($p \leq 0,05$).

Таблица 4

Химический состав городских почв на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки

Территория	рН	P ₂ O ₅	K ₂ O	N _{общ}	C
		мг/кг		%	
Фон	6,07	180,4	210,1	0,15	2,11
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки					
Пескосоляная смесь	8,32	265,1	489,6	0,35	1,59
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	8,01	255,8	410,9	0,41	1,35
Территория общественных пространств					
Пескосоляная смесь	8,48	270,9	412,8	0,43	1,69
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	8,41	267,4	409,6	0,39	1,47
Территория жилых пространств					
Пескосоляная смесь	8,61	275,9	385,1	0,38	1,54
Противогололедные реагенты (Аквайс Эконом)	8,53	310,3	339,5	0,41	1,62

Относительная ошибка среднего не превышала 8 %. Фоновая территория характеризуется слабокислой реакцией (рН 6,07), оптимальной для большинства культурных растений и биологической активности.

На исследуемых территориях наблюдается резкое смещение реакции среды в щелочную область: рН составляет 8,01–8,61. Изменение на 1,94–2,54 единицы рН соответствует сильной степени засоления. Содержание фосфора (P₂O₅) на фоне – 180,4 мг/кг (среднее). На опытных территориях – 255,8–310,3 мг/кг (повышенное и высокое), увеличение в 1,4–1,7 раза. Содержание калия (K₂O): на фоне – 210,1 мг/кг (среднее). При применении пескосоляной смеси – 385,1–489,6 мг/кг (высокое); при применении «Аквайс Эконом» – 339,5–410,9 мг/кг (повышенное). Содержание общего азота в почвах опытных участков (0,35–0,43%) оказалось 2,3–2,9 раза выше фонового (0,15 %). Увеличение валового содержания азота, вероятно, связано с процессами аккумуляции органо-минеральных комплексов, загрязнением урбаноземов органическими остатками и замедлением темпов минерализации в условиях техногенного засоления и подщелачивания. Однако следует отметить, что показатель общего азота включает как органические, так и минеральные формы и не отражает непосредственно доступность элемента для растений. Для оценки текущего азотного питания в условиях солевого стресса требуется анализ минеральных форм (N-NH₄ и N-NO₃), так как процессы нитрификации в щелочной среде (рН > 8,0) могут быть существенно подавлены. Органический углерод: на фоне – 2,11 %; при применении пескосоляной смеси – 1,54–1,69 %; при применении «Аквайс Эконом» – 1,35–1,62 %. Снижение составляет 20–36 %, что свидетельствует о деградации органического вещества.

Анализ трансформации почвенного плодородия выявил увеличение содержания доступных форм фосфора и калия; повышение содержания общего азота, сильное подщелачивание почвенной среды и снижение содержания органического вещества; нарушение соотношения элементов питания.

Пескосоляная смесь вызывает более значительное подщелачивание, но способствует большему накоплению калия. Реагент «Аквайс Эконом» приводит к более выраженному снижению органического углерода.

По шкале оценки химической деградации почв: изменение рН > 1,5 единиц – сильная степень деградации; снижение содержания органического углерода на 20–40 % – средняя степень деградации; нарушение соотношения элементов питания – слабая степень деградации.

Наблюдается прямая зависимость между повышением рН и увеличением содержания карбонатов (НСО₃⁻), снижением органического углерода и ухудшением

агрегатного состава, повышением содержания питательных элементов и увеличением общей минерализации.

В итоге, применение противогололедных реагентов вызывает комплексную химическую деградацию почв, проявляющуюся в резком подщелачивании, снижении содержания органического вещества и нарушении сбалансированности элементов питания. Несмотря на увеличение содержания отдельных питательных элементов, наблюдаемые изменения приводят к ухудшению условий для роста растений и снижению биологической активности почв.

Для непосредственной диагностики степени и характера техногенного засоления почв был проведен детальный анализ их ионно-солевого состава. В таблице 5 приведены средние арифметические значения ($p \leq 0,05$).

Таблица 5

Химические свойства почв на территориях с различным уровнем антропогенной нагрузки
в 0–20 см слое почв, мг-экв/кг

Территория	рН	Ион						Сумма ионов	Плотный, остаток, %
		HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
Фон	6,07	0,094	2,79	0,47	0,98	0,041	0,024	1,75	0,019
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки									
Пескосоляная смесь	8,32	1,304	3,69	3,16	4,6	4,551	0,054	14,76	0,193
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	8,01	0,854	3,53	5,34	4,09	3,921	0,214	13,74	0,143
Территория общественных пространств									
Пескосоляная смесь	8,48	0,334	3,47	2,11	4,01	2,951	0,084	10,35	0,186
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	8,41	0,734	3,6	2,41	4,24	5,061	0,104	13,54	0,061
Территория жилых пространств									
Пескосоляная смесь	8,61	0,324	3,02	2,05	4,22	2,946	0,081	10,25	0,184
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	8,53	0,724	3,15	2,35	4,45	5,056	0,101	13,44	0,059

Содержание доминирующих ионов:

Хлорид-ион (Cl⁻): Фон – 0,47 мг-экв/кг. Пескосоляная смесь – 2,05–3,16 мг-экв/кг (увеличение в 4,4–6,7 раза). «Аквейс Эконом» – 2,35–5,34 мг-экв/кг (увеличение в 5,0–11,4 раза).

Натрий (Na⁺): Фон – 0,041 мг-экв/кг. Пескосоляная смесь – 2,946–4,551 мг-экв/кг. «Аквейс Эконом» – 3,921–5,061 мг-экв/кг.

Кальций (Ca²⁺): Фон – 0,98 мг-экв/кг. Опытные территории – 4,01–4,6 мг-экв/кг (увеличение в 4,1–4,7 раза).

Оценка степени засоления:

Сумма токсичных солей: Фон – 1,75 мг-экв/кг (незасоленная почва). Пескосоляная смесь – 10,25–14,76 мг-экв/кг. «Аквейс Эконом» – 13,44–13,74 мг-экв/кг. Согласно классификации, значения >10 мг-экв/кг соответствуют сильнозасоленным почвам.

Коэффициент натриево-кальциевого засоления (Na⁺/Ca²⁺): Фон – 0,042 (норма). Пескосоляная смесь – 0,64–0,99. «Аквейс Эконом» – 0,96–1,19. Значения > 0,8 свидетельствуют о натриевом типе засоления [22, 28].

Плотный остаток: Фон – 0,019 % (норма). Пескосоляная смесь – 0,184–0,193 %. «Аквейс Эконом» – 0,059–0,143 %.

Осмотическое давление почвенного раствора: Рассчитанные значения для фона – 0,04 атм; для пескосоляной смеси – 0,23–0,30 атм; для «Аквейс Эконом» – 0,27–0,28 атм. Значения > 0,2 атм являются критическими для большинства растений.

Пескосоляная смесь вызывает более выраженное увеличение суммы ионов и плотного остатка. «Аквейс Эконом» приводит к большему накоплению хлоридов и формированию более токсичного натриевого типа засоления.

Согласно СанПиН 2.1.7.1287-03, зафиксировано превышение ПДК по хлоридам в 5–11 раз, по натрию – в 70–120 раз. Суммарный показатель загрязнения $Z_c = 85–135$ соответствует опасному уровню.

Наблюдается прямая зависимость между увеличением суммы токсичных солей и снижением длины корней проростков, ростом содержания Na^+ и уменьшением энергии прорастания, увеличением СГ и появлением хлорозов у растений.

Таким образом, применение противогололедных реагентов вызывает опасное техногенное засоление городских почв. Сформировался хлоридно-натриевый тип засоления с высокой концентрацией токсичных ионов. Уровень засоления превышает критические значения для роста растений и требует проведения мелиоративных мероприятий.

Для интегральной оценки экологической опасности противогололедных реагентов и их влияния на живые организмы был проведен метод биотестирования талых вод с использованием кресс-салата (*L. sativum*). Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты фитотестирования образцов талых вод с территорий с различным уровнем антропогенной нагрузки

Территория	Энергия прорастания	Всхожесть	Длина корня	Длина побега
	%		см	
Фон	98	99	7,8	6,1
Территория с наивысшей степенью антропогенной нагрузки				
Пескосоляная смесь	82	85	4,1	3,8
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	80	83	3,7	3,6
Территория общественных пространств				
Пескосоляная смесь	85	87	4,9	4,1
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	78	80	3,6	3,4
Территория жилых пространств				
Пескосоляная смесь	80	82	3,8	3,5
Противогололедные реагенты (Аквейс Эконом)	75	78	3,2	3,1

Фоновая территория демонстрирует оптимальные значения всех параметров, соответствующие незагрязненным почвам.

Влияние противогололедных реагентов:

- Энергия прорастания: Пескосоляная смесь – 80–85 % (снижение на 13–18 %); «Аквейс Эконом» – 75–80 % (снижение на 18–23 %).

- Всхожесть: Пескосоляная смесь – 82–87 % (снижение на 12–17 %); «Аквейс Эконом» – 78–83 % (снижение на 16–21 %).

- Длина корня: Пескосоляная смесь – 3,8–4,9 см (снижение на 37–51 %); «Аквейс Эконом» – 3,2–3,7 см (снижение на 53–59 %).

- Длина побега: Пескосоляная смесь – 3,5–4,1 см (снижение на 33–43 %); «Аквейс Эконом» – 3,1–3,6 см (снижение на 41–49 %).

Оценка фитотоксичности по классам опасности (ГОСТ 33637-2015) [21]:

- Территории с наивысшей нагрузкой и общественных пространств: оба реагента – IV класс (умеренно опасные).

- Территории жилых пространств: пескосоляная смесь – IV класс (умеренно опасные); «Аквайс Эконом» – III класс (опасные).

Интегральный показатель фитотоксичности:

- Территории с наивысшей нагрузкой: пескосоляная смесь – 0,65 (умеренная фитотоксичность); «Аквайс Эконом» – 0,59 (умеренная фитотоксичность).

- Территории жилых пространств: пескосоляная смесь – 0,61 (умеренная фитотоксичность); «Аквайс Эконом» – 0,52 (высокая фитотоксичность).

Сравнительная оценка реагентов показала, что «Аквайс Эконом» демонстрирует более выраженное действие: снижение длины корня на 15–20 % больше, чем у пескосоляной смеси, более значительное угнетение энергии прорастания, формирование III класса опасности на территориях жилых пространств.

Выявлена сильная обратная корреляция между содержанием Cl^- и длиной корня ($r = -0,89$), суммой токсичных солей и всхожестью ($r = -0,85$), концентрацией Na^+ и энергией прорастания ($r = -0,82$).

Оценка экологического риска показала, что снижение длины корня $> 50\%$ соответствует высокому риску, снижение всхожести $> 15\%$ – среднему риску, индекс фитотоксичности $< 0,6$ – высокому риску.

В целом, талые воды с территорий, обрабатываемых противогололедными реагентами, проявляют выраженную фитотоксичность. Наиболее чувствительным показателем является длина корня. Реагент «Аквайс Эконом» демонстрирует более высокую токсичность, особенно на территориях жилых пространств.

Выводы. Проведенное комплексное исследование позволило оценить влияние различных типов противогололедных реагентов на состояние почв урбозкосистемы г. Владимира. Полученные результаты свидетельствуют о значительной трансформации физико-химических свойств почвенного покрова под воздействием техногенной нагрузки. Применение противогололедных реагентов (как пескосоляной смеси, так и коммерческого препарата «Аквайс Эконом») приводит к комплексной деградации городских почв, включающей химическое загрязнение, развитие техногенного засоления, ухудшение физико-химических свойств и снижение биологической активности. Полученные данные обосновывают необходимость пересмотра существующей практики зимнего содержания городских территорий, внедрения более экологичных альтернатив и разработки системы реабилитации почвенного покрова урбозкосистем.

1. Установлена значительная химическая нагрузка на снежный покров. Химический состав снега на опытных территориях достоверно отличается от фоновых значений. Зафиксировано превышение концентраций хлоридов в 2,0–2,2 раза, а также повышение содержания ионов кальция и магния, особенно выраженное при использовании реагента «Аквайс Эконом». Это подтверждает, что талые воды являются первичным источником поступления солей в почву.

2. Выявлена деградация физических свойств почв. Под воздействием противогололедных реагентов происходит статистически значимое изменение гранулометрического состава, проявляющееся в опесчанивании – снижении содержания физической глины ($< 0,01$ мм) на 4,6–23,2 % по сравнению с фоном. Наиболее существенные изменения отмечены при применении пескосоляной смеси. Параллельно ухудшается агрегатный состав: содержание агрономически ценных фракций (0,25–

10,0 мм) снижается на 7,6–13,6 %, а коэффициент структурности ухудшается с 3,1 (оптимальный) до 1,2–2,6 (неудовлетворительный и удовлетворительный).

3. Доказано развитие техногенного засоления и подщелачивания. Анализ ионно-солевого состава почв выявил формирование хлоридно-натриевого типа засоления с суммой токсичных солей 10,25–14,76 мг-экв/кг, что соответствует категории сильнозасоленных почв. Реакция почвенной среды смещается из слабокислой (рН 6,07) в щелочную (рН 8,01–8,61) зону. Натриевый тип засоления подтверждается коэффициентом Na^+/Ca^{2+} , достигающим значений 0,96–1,19.

4. Обнаружено комплексное изменение химических свойств и плодородия. Несмотря на увеличение содержания подвижных форм фосфора (в 1,4–1,7 раза) и калия (в 1,6–2,3 раза), наблюдается негативная тенденция к снижению содержания органического углерода на 20–36 %, что свидетельствует о деградации органического вещества почв. Увеличение содержания общего азота при одновременном подщелачивании среды указывает на трансформацию азотного фонда и возможное подавление процессов минерализации, что требует дополнительных исследований минеральных форм азота.

5. Установлена высокая фитотоксичность талых вод. Методом биотестирования доказано угнетающее действие талых вод на развитие тест-культуры кресс-салата. Наиболее чувствительным показателем является длина корня, которая снижается на 37–59 % по сравнению с контролем. Интегральный индекс фитотоксичности составляет 0,52–0,65, что соответствует умеренной и высокой степени фитотоксичности, причем реагент «Аквайс Эконом» проявляет более выраженное токсическое действие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев П.А. Экспериментальное исследование засоления и осолонцевания урбаноземов при использовании противогололедных реагентов на примере Северного административного округа г. Москвы // Проблемы и перспективы современного эффективного землепользования: сб. науч. трудов. – М.: ГУЗ, 2013. – С. 141-147.
2. Влияние противогололедных реагентов на газонные травы / Е.А. Гладков [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 5. – С. 157-159.
3. Обухов А.И., Лепнева О.М. Экологические последствия применения противогололедных соединений на городских автомагистралях и меры по их устранению // Экологические исследования в Москве и Московской области: Мат-лы науч.- практ. конф. (6-7 апреля 1989 г. Москва) – М., 1990. – С. 197-202
4. Покаржевский А.Д. Пространственная экология почвенных животных / А.Д. Покаржевский, К.Б. Гонгальский, А.С. Зайцев, Ф.А. Савин. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. – 174 с.
5. Герасимов, А. О. Влияние загрязнения дерново-подзолистой почвы противогололедными реагентами на высшие растения и почвенные микроорганизмы / А. О. Герасимов, М. В. Чугунова // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 59-63.
6. Герасимов А.О., Чугунова М.В. Воздействие противогололедных средств на основе хлоридов магния на высшие растения и почвенные микроорганизмы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – Вып. 217. – С 16-31.
7. Зайдельман, Ф.Р. Практикум по курсу «Мелиорация почв» / Ф.Р. Зайдельман [и др.]. – М.: Издательство Московского университета, 2002. – 52 с.
8. Шевченко А.В., Апухтина Н.В., Савич В.И. Техногенное осолонцевание почв Московской области // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2008. – Вып. 1. – С. 50-57.
9. Методические аспекты оценки фитотоксических свойств противогололедных реагентов А.В. Сбитнев [и др.] // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 8. – С. 773-778.
10. Покаржевский А.Д. Пространственная экология почвенных животных / А.Д. Покаржевский, К.Б. Гонгальский, А.С. Зайцев, Ф.А. Савин. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. – 174 с.
11. Методические подходы к обоснованию гигиенических требований к применению противогололедных материалов / И. А. Крятов, Н. И. Тонкопий, М. А. Водянова [и др.] // Гигиена и санитария. – 2014. – Т. 93, № 6. – С. 52-54.

12. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Введ. 2018-07-01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 20 с.
13. ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб. – Введ. 1990-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 8 с.
14. ГОСТ 17.4.2.01-81. Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния. – Введ. 1982-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 8 с.
15. ГОСТ 17.4.3.06-86 (СТ СЭВ 5291-85). Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. – Введ. 1987-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 4 с.
16. ГОСТ 33637-2015. Тестирование биологическое. Метод определения токсичности почв и почвогрунтов с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.). – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 12 с
17. Методические аспекты оценки фитотоксических свойств противогололедных реагентов А.В. Сбитнев [и др.] // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 8. – С. 773-778.
18. ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. – Введ. 1992-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 8 с.
19. ГОСТ 26107-84. Почвы. Методы определения общего азота. – Введ. 1986-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1984. – 8 с.
20. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. – Введ. 1992-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 8 с.
21. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
22. ГОСТ 26424-85. Почвы. Методы определения ионов хлорида в водной вытяжке. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
23. ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения ионов хлорида и сульфата в водной вытяжке. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
24. ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения ионов сульфата в водной вытяжке. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
25. ГОСТ 26427-85. Почвы. Методы определения натрия и калия в водной вытяжке. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
26. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке. – Введ. 1986-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
27. ГОСТ 26950-86 (СТ СЭВ 5292-85). Почвы. Метод определения обменного натрия. – Введ. 1987-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 4 с.
28. Беспалова Е.В. Мониторинг загрязнения снежного покрова в условиях городской среды (на примере города Воронежа) // Международный молодёжный экологический Форум стран СНГ, 28-30 ноября, Москва, материалы и доклады. – СПб.; 2013. – С. 185-188.
29. Касимов Н.С. Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов // Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1995. – С. 6-39
30. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования : утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003. – М. : Минздрав России, 2003. – 154 с.

REFERENCES

1. Vasiliev, P. A. (2013). Eksperimental'noye issledovaniye zasoleniya i osolontsevaniya urbanozemov pri ispol'zovanii protivogolodnykh reagentov na primere Severnogo administrativnogo okruga g. Moskvy [Experimental study of salinization and alkalization of urban soils using de-icing chemicals in the Northern Administrative District of Moscow]. In *Problemy i perspektivy sovremennogo effektivnogo zemlepol'zovaniya: sb. nauch. trudov* [Problems and prospects of modern effective land use: Collection of scientific papers] (pp. 141–147). Moscow, Russia: State University of Land Use Planning.
2. Gladkov, E. A., Gladkova, O. V., Dolgikh, Y. I., & Terekhin, D. V. (2016). Vliyaniye protivogolodnykh reagentov na gazonnyye travy [Influence of de-icing reagents on lawn grasses]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 18(5), 157–159.
3. Obukhov, A. I., & Lepneva, O. M. (1990). Ekologicheskiye posledstviya primeneniya protivogolodnykh soyedineniy na gorodskikh avtomagistralyakh i mery po ikh ustraneniyu [Ecological consequences of using de-icing compounds on city highways and measures for their mitigation]. In *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii Ekologicheskiye issledovaniya v Moskve i Moskovskoy oblasti* [Proceedings of the

- Scientific-Practical Conference on Ecological Research in Moscow and the Moscow Region] (pp. 197–202). Moscow, Russia.
4. Pokarzhevskiy, A. D., Gongal'skiy, K. B., Zaytsev, A. S., & Savin, F. A. (2007). *Prostranstvennaya ekologiya pochvennykh zhivotnykh* [Spatial ecology of soil animals]. Moscow, Russia: KMK Scientific Press.
 5. Gerasimov, A. O., & Chugunova, M. V. (2015). Vliyaniye zagryazneniya dernovo-podzolistoy pochvy protivogolelednymi reagentami na vysshiye rasteniya i pochvennyye mikroorganizmy [Influence of sod-podzolic soil contamination with de-icing reagents on higher plants and soil microorganisms]. *Ecology and Industry of Russia*, 19(4), 59–63.
 6. Gerasimov, A. O., & Chugunova, M. V. (2016). Vozdeystviye protivogolelednykh sredstv na osnove khloridov magniya na vysshiye rasteniya i pochvennyye mikroorganizmy [The impact of de-icing agents based on magnesium chlorides on higher plants and soil microorganisms]. *Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy*, 217, 16–31.
 7. Zaydelman, F. R., Nikiforova, A. S., Stepantsova, L. V., et al. (2002). *Praktikum po kursu Melioratsiya pochv* [Practical course on "Soil reclamation"]. Moscow, Russia: Moscow University Press.
 8. Shevchenko, A. V., Apukhtina, N. V., & Savich, V. I. (2008). Tekhnogennoye osolontsevaniye pochv Moskovskoy oblasti [Technogenic alkalization of soils in the Moscow region]. *Izvestia of the Timiryazev Agricultural Academy*, 1, 50–57.
 9. Sbitnev, A. V., Onishchenko, G. G., Rakhmanin, Y. A., et al. (2016). Metodicheskiye aspekty otsenki fitotoksicheskikh svoystv protivogolelednykh reagentov [Methodological aspects of assessing phytotoxic properties of de-icing reagents]. *Gigiena i Sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 95(8), 773–778.
 10. Pokarzhevskiy, A. D., Gongal'skiy, K. B., Zaytsev, A. S., & Savin, F. A. (2007). *Prostranstvennaya ekologiya pochvennykh zhivotnykh* [Spatial ecology of soil animals]. Moscow, Russia: KMK Scientific Press. (Duplicate of entry 4)
 11. Kryatov, I. A., Tonkopi, N. I., Vodyanova, M. A., et al. (2014). Metodicheskiye podkhody k obosnovaniyu gigiyenicheskikh trebovaniy k primeneniyu protivogolelednykh materialov [Methodological approaches to substantiating hygienic requirements for the use of de-icing materials]. *Gigiena i Sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 93(6), 52–54.
 12. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. (2017). GOST 17.4.4.02-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [State Standard GOST 17.4.4.02-2017. Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Russia: Standartinform.
 13. USSR State Committee for Standards. (1989). GOST 28168-89. Pochvy. Otkor prob [State Standard GOST 28168-89. Soils. Sampling]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
 14. USSR State Committee for Standards. (1981). GOST 17.4.2.01-81. Okhrana prirody. Pochvy. Nomenklatura pokazateley sanitarnogo sostoyaniya [State Standard GOST 17.4.2.01-81. Nature protection. Soils. Nomenclature of sanitary condition indicators]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
 15. USSR State Committee for Standards. (1986). GOST 17.4.3.06-86 (ST SEV 5291-85). Okhrana prirody. Pochvy. Obshchiye trebovaniya k klassifikatsii pochv po vliyaniyu na nikh khimicheskikh zagryaznyayushchikh veshchestv [State Standard GOST 17.4.3.06-86. Nature protection. Soils. General requirements for the classification of soils influenced by chemical pollutants]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
 16. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. (2015). GOST 33637-2015. Testirovaniye biologicheskoye. Metod opredeleniya toksichnosti pochv i pochvogruntoy s ispol'zovaniyem kress-salata (*Lepidium sativum* L.) [State Standard GOST 33637-2015. Biological testing. Method for determining the toxicity of soils and soil grounds using garden cress (*Lepidium sativum* L.)]. Moscow, Russia: Standartinform.
 17. Sbitnev, A. V., Onishchenko, G. G., Rakhmanin, Y. A., et al. (2016). Metodicheskiye aspekty otsenki fitotoksicheskikh svoystv protivogolelednykh reagentov [Methodological aspects of assessing phytotoxic properties of de-icing reagents]. *Gigiena i Sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 95(8), 773–778. (Duplicate of entry 9)
 18. USSR State Committee for Standards. (1991). GOST 26207-91. Pochvy. Opredeleniye podviznykh soyedineniy fosfora i kaliya po metodu Kirsanova v modifikatsii TsINA [State Standard GOST 26207-91. Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by the Kirsanov method modified by CINA]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
 19. USSR State Committee for Standards. (1984). GOST 26107-84. Pochvy. Metody opredeleniya obshchego azota [State Standard GOST 26107-84. Soils. Methods for determination of total nitrogen]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.

20. USSR State Committee for Standards. (1991). GOST 26213-91. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva [State Standard GOST 26213-91. Soils. Methods for determination of organic matter]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
21. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26423-85. Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki [State Standard GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electrical conductivity, pH and solid residue of water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
22. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26424-85. Pochvy. Metody opredeleniya ionov khlorida v vodnoy vytyazhke [State Standard GOST 26424-85. Soils. Method for determination of chloride ions in water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
23. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26425-85. Pochvy. Metody opredeleniya ionov khlorida i sul'fata v vodnoy vytyazhke [State Standard GOST 26425-85. Soils. Methods for determination of chloride and sulfate ions in water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
24. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26426-85. Pochvy. Metody opredeleniya ionov sul'fata v vodnoy vytyazhke [State Standard GOST 26426-85. Soils. Methods for determination of sulfate ions in water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
25. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26427-85. Pochvy. Metody opredeleniya natriya i kaliya v vodnoy vytyazhke [State Standard GOST 26427-85. Soils. Method for determination of sodium and potassium in water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
26. USSR State Committee for Standards. (1985). GOST 26428-85. Pochvy. Metody opredeleniya kal'tsiya i magniya v vodnoy vytyazhke [State Standard GOST 26428-85. Soils. Methods for determination of calcium and magnesium in water extract]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
27. USSR State Committee for Standards. (1986). GOST 26950-86 (ST SEV 5292-85). Pochvy. Metod opredeleniya obmennogo natriya [State Standard GOST 26950-86. Soils. Method for determination of exchangeable sodium]. Moscow, Russia: Standards Publishing House.
28. Bespalova, E. V. (2013). Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova v usloviyakh gorodskoy sredy (na primere goroda Voronezha) [Monitoring of snow cover pollution in urban environments (on the example of the city of Voronezh)]. In *Materialy i doklady Mezhdunarodnogo molodezhnogo ekologicheskogo Forumu stran SNG* [Proceedings of the International Youth Ecological Forum of the CIS Countries] (pp. 185–188). St. Petersburg, Russia.
29. Kasimov, N. S. (1995). Metodologiya i metodika landshaftno-geokhimicheskogo analiza gorodov [Methodology and techniques of landscape-geochemical analysis of cities]. In N. S. Kasimov (Ed.), *Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes] (pp. 6–39). Moscow, Russia: Moscow University Press.
30. Ministry of Health of Russia. (2003). GN 2.1.5.1315-03. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya [Hygienic standard GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in water of water bodies for domestic, drinking and cultural water use]. Moscow, Russia.

INFLUENCE OF ANTI-ICE REAGENTS ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF SOILS IN AREAS OF VARIOUS ANTHROPOGENIC LOAD

A. O. Ragimov, N. V. Chygai

A comprehensive study was conducted to examine the influence of various types of anti-icing agents (sand-salt mixture and the commercial product "Akvays Econom") on the physicochemical properties of soils in the Vladimir urban ecosystem with varying levels of anthropogenic load. It was found that the use of anti-icing agents leads to a significant chemical load on the snow cover, expressed in a multiple excess of background concentrations of chlorides, calcium, and magnesium. The soils showed the development of technogenic salinization of the chloride-sodium type with a total toxic salt content of 10.25–14.76 mg-eq/kg, which corresponds to the category of highly saline soils, and a sharp alkalization (pH 8.01–8.61). Degradation of the physical properties of urban soils, manifested in sandification and deterioration of the aggregate composition, was proven. Despite an increase in the content of mobile forms of phosphorus and potassium, a decrease in the content of organic matter was noted. Bioassays using garden cress (*Lepidium sativum* L.) revealed moderate to high phytotoxicity of meltwater, most pronounced with the "Akvays Econom" reagent. The study results demonstrate the complex degradation of urban soils under the influence of deicing agents and substantiate the need to revise winter maintenance practices in urban areas.

Keywords: deicing agents, urban ecosystems, technogenic salinization, soil physicochemical properties, phytotoxicity, particle size distribution, organic carbon, bioassays, garden cress, environmental monitoring.

Поступила в редакцию 23.01.2026 г.

Рагимов Александр Олегович

кандидат биологических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет», г. Владимир, РФ;
Владимирский филиал ФГБОУ ВО «Приволжский
исследовательский медицинский университет»,
г. Владимир, РФ.
E-mail: pifo@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4823-6509
SPIN-код: 7899-7349

Ragimov Aleksandr Olegovich

Candidate of Biological Sciences, docent;
Vladimir State University, Vladimir, Russia;
Volga Region Research Medical University,
Vladimir, Vladimir Branch, Russia.

Чугай Наталья Валерьевна

кандидат биологических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет», г. Владимир, РФ;
Владимирский филиал ФГБОУ ВО «Приволжский
исследовательский медицинский университет»,
г. Владимир, РФ.
E-mail: chugaj-n@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-0203-2047
SPIN-код: 4062-7713

Chugay Natalya Valeryevna

Candidate of Biological Sciences, docent;
Vladimir State University, Vladimir, Russia;
Volga Region Research Medical University,
Vladimir, Vladimir Branch, Russia.

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИПИДНОГО ОБМЕНА ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ИНТОКСИКАЦИИ ТИОАЦЕТАМИДОМ И НА ФОНЕ КОРРЕКЦИИ У КРЫС

© 2026. Д. А. Смолянкин, А. О. Хмель, Т. Г. Якупова, А. А. Гизатуллина, Н. Ю. Хуснутдинова, Э. Ф. Репина, Ю. В. Рябова, Д. О. Каримов, А. Р. Гимадиева

Проведена сравнительная оценка влияния гепатопротекторов, адеметионина (АДМ) и комплексного соединения МГ-10, с использованием модели хронической интоксикации крыс тиаоацетамидом (ТАА), на показатели липидного обмена. Методом ферментативного колориметрического анализа в сыворотке крови определяли концентрацию триглицеридов (ТГ) и общего холестерина (ХСТ) на 50-е и 100-е сутки. Установлено, что МГ-10 оказывал выраженный гипотриглицеридемический эффект как на промежуточном, так и на заключительном этапе исследования. К 100-му дню в группе ТАА+МГ-10 выявлено статистически значимое повышение ХСТ при сохранении сниженного уровня ТГ. Применение АДМ приводило к менее выраженному уменьшению содержания триглицеридов. Результаты демонстрируют возможное комплексное корригирующее влияние МГ-10 на метаболизм липидов при ТАА-индуцированном повреждении печени.

Ключевые слова: тиаоацетамид; липидный обмен; триглицериды; общий холестерин; адеметионин; МГ-10; гепатопротекция; хроническая интоксикация; экспериментальная модель; крысы.

Введение. Токсические гепатиты представляют собой серьезную проблему для мирового здравоохранения. Они вносят существенный вклад в показатели смертности и утраты лет жизни, скорректированных по нетрудоспособности [1]. Традиционно в этиологии заболеваний печени преобладают такие факторы, как вирусные гепатиты и злоупотребление алкоголем [2], однако современные гипотезы смещают акцент в сторону иных причин. Так, актуальные научные данные подтверждают важную роль экзогенных агентов, а именно воздействие ксенобиотиков окружающей среды, на живые организмы [3, 4]. К ним относятся промышленные химикаты, пестициды, фармацевтические препараты, пластификаторы, пер- и полифторалкильные вещества (PFAS), тяжелые металлы [5, 6]. Человек подвергается воздействию токсикантов через пищу, воду, воздух и кожу, а также в период внутриутробного развития через плаценту [7]. Будучи центральным органом метаболизма и детоксикации, печень является основной мишенью для поступающих ксенобиотиков, что определяет высокую уязвимость к токсическим повреждениям [8, 9].

Вместе с тем, печень является важным звеном в регуляции липидного обмена. Именно гепатоциты поглощают из крови и расщепляют эфиры холестерина и фосфолипиды, а также синтезируют их. Ключевым моментом в транспорте липидов является образование глобулинов для формирования транспортных молекул (липопротеинов высокой плотности – ЛПВП, низкой – ЛПНП, промежуточной, очень низкой – ЛПОНП). В гепатоцитах происходит превращение избытка углеводов в свободные жирные кислоты, которые представляют собой наиболее компактную и энергоэффективную форму запасания питательных веществ. В печени при падении уровня глюкозы в крови происходит катаболизм жирных кислот с превращением их либо непосредственно в энергию, либо в кетоновые тела, служащие альтернативным энергетическим субстратом. Часть эфиров холестерина гепатоциты способны преобразовывать в желчные кислоты, которые затем выделяются с желчью в просвет двенадцатиперстной кишки. В связи с этим, нарушения в работе гепатобилиарной

системы способны вызывать сбои в метаболизме липидов, что создает патогенетическую основу для развития ряда заболеваний, включая неалкогольную жировую болезнь печени (НАЖБП) [10].

Многочисленные научные исследования демонстрируют, что такие промышленные загрязнители, как PFAS, полихлорированные бифенилы, диоксины, бисфенол А, фталаты и другие токсиканты, способны индуцировать стеатоз и прогрессирование НАЖБП до неалкогольного стеатогепатита и фиброза [11–13]. Ксенобиотики нарушают деятельность ядерных рецепторов, регулирующих липогенез и окисление жирных кислот [14, 15], а также вызывают митохондриальную дисфункцию [16–19].

Создание экспериментальных моделей служит основным подходом для воспроизведения и детального изучения фиброгенеза *in vivo* и *in vitro*. Среди множества химических соединений, тиацетамид (ТАА), используемый с 1948 года [20], остаётся классическим и широко применяемым агентом для моделирования токсического поражения печени и последующего развития фиброза у лабораторных животных [21–24]. При гистологических исследованиях ТАА-индуцированного фиброза у крыс, авторами были отмечены характерные специфические признаки: накопление коллагеновых волокон, развитие диффузного фиброза и формирование регенеративных узлов [25, 26]. Данная модель воспроизводит схожие гистопатологические и биохимические изменения, наблюдаемые при патологии в организме человека, что определяет её ценность для доклинических исследований.

ТАА не обладает прямой гепатотоксичностью, однако в результате метаболической биоактивации в печени, при участии ферментов цитохрома P450 (CYP1A2, CYP2C6, CYP2E1, CYP3A2) и митохондриальных флавинадениндинуклеотид-содержащих монооксигеназ, преобразуется в высокореактивные метаболиты: тиацетамид-S-оксид (ТАСО) и тиацетамид-S-диоксид (ТАА-SO₂) [27–29]. Данные соединения действуют как активные формы кислорода (АФК), инициируя перекисное окисление липидов гепатоцеллюлярных мембран [30], что приводит к развитию выраженного окислительного стресса. Биохимическими маркерами повреждения является повышение уровня малонового диальдегида и активности печеночных ферментов — аланинаминотрансферазы и аспартатаминотрансферазы [31].

Далее, образовавшиеся реактивные метаболиты ТАА, формируют прочные комплексы с клеточными белками и липидами, вызывая усиление токсического эффекта. Поврежденные гепатоциты, в свою очередь, высвобождают медиаторы воспаления, такие как фактор некроза опухоли и интерлейкины (ИЛ-1β, ИЛ-6) [32–34]. Важнейшую роль в запуске и поддержании воспалительного ответа играют клетки Купфера [35], которые способствуют дальнейшей активации звездчатых клеток печени и усилению фиброгенеза [36, 37]. Окислительный стресс и воспаление тесно взаимосвязаны в патогенезе ТАА-индуцированного фиброза. АФК стимулируют работу основных провоспалительных и профибротических сигнальных путей, включая ядерный фактор κВ (NF-κВ) и, так называемый, путь трансформирующего фактора роста бета (TGF-β) [38, 39].

Известно, что острое воздействие ТАА может подавлять секрецию желчи, вызывая холестатические повреждения в печени [40, 41], однако динамика изменений липидного профиля при длительном воздействии поллютанта изучена недостаточно. В частности, представляет научный и практический интерес системное сопоставление изменений основных показателей на различных стадиях токсического процесса.

Многочисленные данные экспериментальных работ подтверждают эффективность гепатопротекторов различной природы в регуляции липидного обмена. Фитопрепараты и натуральные вещества способны потенциально корригировать дислипидемию, возникающую при поражении органа-мишени. В частности, силимарин и ресвератрол обнаруживают защитные для печени свойства, отчасти благодаря их антиоксидантному и противовоспалительному действию. Куркумин и кверцетин также проявляют аналогичную активность в экспериментальных условиях [42].

Синтетические и полусинтетические гепатотропные препараты характеризуются детально изученным прямым влиянием на липидный профиль. Так, адеметионин играет центральную роль в метаболизме фосфолипидов и процессе трансметилирования. При его дефиците нарушается процесс выведения триглицеридов (ТГ) в составе ЛПОНП, что приводит к их накоплению в печени [43]. Клинические исследования показали, что терапия адеметионином у пациентов с НАЖБП способствует снижению уровня ТГ и общего холестерина, а также нормализации уровня трансаминаз [44]. Другой препарат, бициклом, согласно метаанализу, аналогично оказывает положительное влияние [45]. N-ацетилцистеин, мощный антиоксидант, улучшает функцию печени, в том числе путем ослабления окислительного стресса и воспаления, которые лежат в основе нарушения липидного метаболизма [46]. Витамин Е (альфа-токоферол) в исследованиях демонстрировал способность уменьшать гистологические проявления стеатоза и воспаления, однако его влияние на фиброз противоречиво, учитывая, что определенные вопросы безопасности ограничивают применение [47]. Производные пиримидина, такие как 5-гидрокси-6-метилурацил, обладают выраженными гепатопротекторными и антиоксидантными свойствами, регулируют процессы перекисного окисления липидов и стабилизируют клеточные мембраны [48].

С учётом вышеизложенного, **целью исследования** явилась оценка влияния адеметионина и комплексного соединения МГ-10 на динамику показателей липидного обмена (общего холестерина и триглицеридов) в сыворотке крови крыс на 50-й и 100-й день экспериментального моделирования хронической интоксикации тиоацетамидом.

Материалы и методы. Уход за животными осуществлялся в соответствии с ГОСТ 33215–2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур», манипуляции выполнялись в соответствии с Директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 о защите животных, используемых для научных целей. Содержание было организовано в соответствии с нормативными требованиями к помещениям, с контролируемым 12-часовым световым режимом и температурой 21–26 °С. Животные имели неограниченный доступ к воде и стандартному рациону. Перед началом эксперимента все особи прошли 5-дневную акклиматизацию. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом учреждения, № 01-02 08.02.2024 г.

Для оценки влияния хронической интоксикации ТАА и последующей коррекции изучаемыми препаратами на липидный обмен, был проведен эксперимент на 56 аутбредных половозрелых крысах-самцах, продолжительностью 50 и 100 дней. Животные с начальной массой тела 170–190 г были распределены случайным образом на 8 групп по 7 особей в каждой. Идентификацию осуществляли с помощью индивидуальных меток.

Для проведения исследования были сформированы 4 основные экспериментальные группы, оценка параметров в которых выполнялась на двух временных точках — через 50 и 100 дней от начала эксперимента. Детали дизайна исследования представлены ниже:

1. Группа отрицательного контроля (К-) – животные, получавшие физиологический раствор.

2. Группа моделирования токсического поражения (К+, ТАА) – животные, получавшие ТАА.

3. Группа коррекции адеметионином (ТАА+АДМ) – животные, получавшие ТАА на фоне терапии АДМ.

4. Группа коррекции препаратом МГ-10 (ТАА+МГ-10) – животные, получавшие ТАА на фоне введения комплексного соединения МГ-10.

Модель хронической интоксикации печени воспроизводили путем внутрибрюшинного введения крысам ТАА в дозе 50 мг/кг массы тела два раза в неделю. Выбор дозы ТАА основан на литературных данных по моделированию фиброза печени у крыс.

Корректирующие препараты вводили ежедневно в рабочие дни за 1 час до инъекции ТАА. Группа коррекции получала препарат адеметионин (АДМ) в дозе 25 мг/кг внутрибрюшинно, что соответствовало максимальной разовой дозе, рекомендованной официальной инструкцией. Другая группа животных получала соединение МГ-10 в дозе 500 мг/кг внутривенно, выбранной на основании ранее установленной максимальной эффективности в экспериментальных моделях при изучении его антигипоксических свойств. Для контрольных групп использовали эквивалентные объемы физиологического раствора *per os*.

Эвтаназию осуществляли методом полной мгновенной декапитации. Забор проб крови для биохимического анализа выполняли сразу после указанной процедуры. Функциональное состояние печени оценивали по параметрам липидного обмена: уровню общего холестерина (ХСТ) и триглицеридов (ТГ) в сыворотке крови. Определение биохимических показателей выполняли ферментативными колориметрическими методами с использованием коммерческих наборов реагентов «Вектор-Бест» (Россия) на биохимическом анализаторе «Stat Fax 3300» (Awareness Technology, США).

Статистическую обработку данных проводили с применением программного пакета SPSS Statistics 21.0 (IBM, USA). Проверку распределения на нормальность осуществляли с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Для оценки статистической значимости различий между группами при нормальном распределении данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим применением апостериорных критериев Тьюки и Тамхейна. Для повышения надежности и воспроизводимости результатов применяли метод бутстрап (Bootstrap) с многократной генерацией выборок по методу Монте-Карло. Данные представлены в виде среднего арифметического и стандартной ошибки среднего. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты. На промежуточном этапе наименьший средний уровень триглицеридов был зарегистрирован в группе ТАА+МГ-10 ($0,56 \pm 0,04$ ммоль/л) (рис. 1). Максимальное значение отмечалось в группе отрицательного контроля (К-) – $0,90 \pm 0,09$ ммоль/л. В группе, получавшей только ТАА (К+), средний уровень ТГ составил $0,66 \pm 0,07$ ммоль/л. Статистически значимых различий между группами К- и К+ ($p = 0,126$), а также между К- и группой ТАА+АДМ ($0,62 \pm 0,07$ ммоль/л; $p = 0,075$) выявлено не было. Однако, соединение МГ-10 продемонстрировало выраженное избирательное действие, статистически значимо снижая уровень триглицеридов на фоне токсического воздействия ТАА ($p = 0,0036$) относительно отрицательного контроля (К-). При сравнении групп между собой (ТАА (К+), ТАА+АДМ, ТАА+МГ-10) значимых различий в уровне ТГ не обнаружено.

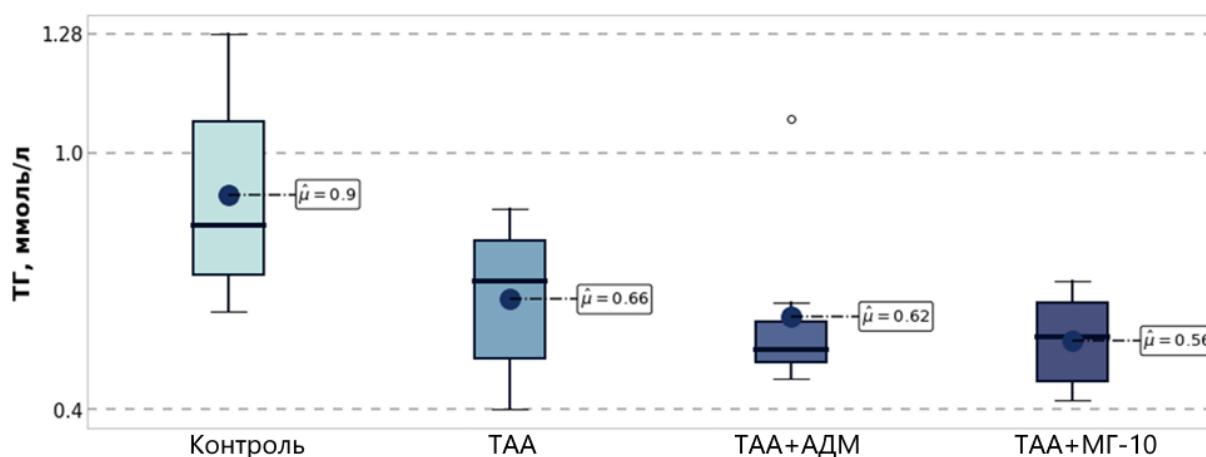


Рис. 1. Содержание триглицеридов в сыворотке крови крыс через 50 дней эксперимента

В тот же временной интервал минимальная средняя концентрация общего холестерина отмечалась в группе К- ($0,43 \pm 0,06$ ммоль/л) (рис. 2). Наибольшие значения были зарегистрированы в группе ТАА+АДМ ($0,72 \pm 0,13$ ммоль/л) и ТАА+МГ-10 ($0,67 \pm 0,18$ ммоль/л). В группе ТАА (К+) средняя концентрация ХСТ составила $0,48 \pm 0,12$ ммоль/л. Кроме того, во всех экспериментальных группах статистически значимых различий по уровню ХСТ продемонстрировано не было.

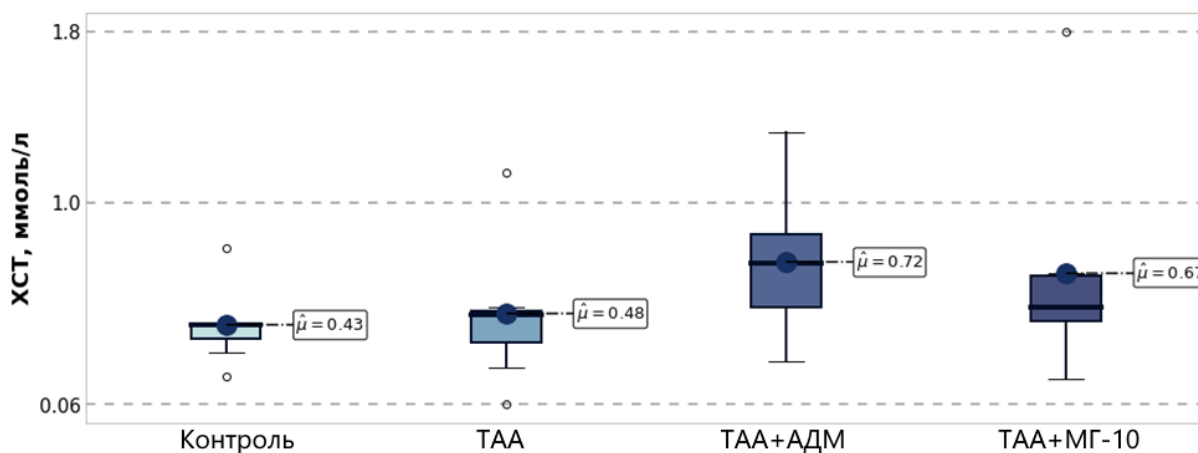


Рис. 2. Содержание холестерина в сыворотке крови крыс через 50 дней эксперимента

На заключительном этапе (100-й день) эксперимента в группе К- средний уровень триглицеридов возрос до $1,11 \pm 0,14$ ммоль/л (рис. 3). Минимальное значение сохранилось в группе ТАА+МГ-10 ($0,57 \pm 0,05$ ммоль/л). В группе ТАА (К+) уровень ТГ составил $0,84 \pm 0,22$ ммоль/л, и разница с группой К- осталась статистически незначимой ($p=0,5862$). Однако, в отличие от данных на 50-й день, через 100 дней в группах, получавших корректоры, было зафиксировано значимое снижение концентрации ТГ по сравнению с контролем (К-): для группы ТАА+АДМ ($0,67 \pm 0,05$ ммоль/л) $p=0,015$, для группы ТАА+МГ-10 $p=0,0012$. При этом между группами ТАА (К+), ТАА+АДМ и ТАА+МГ-10 статистически значимых различий по уровню ТГ не выявлено.

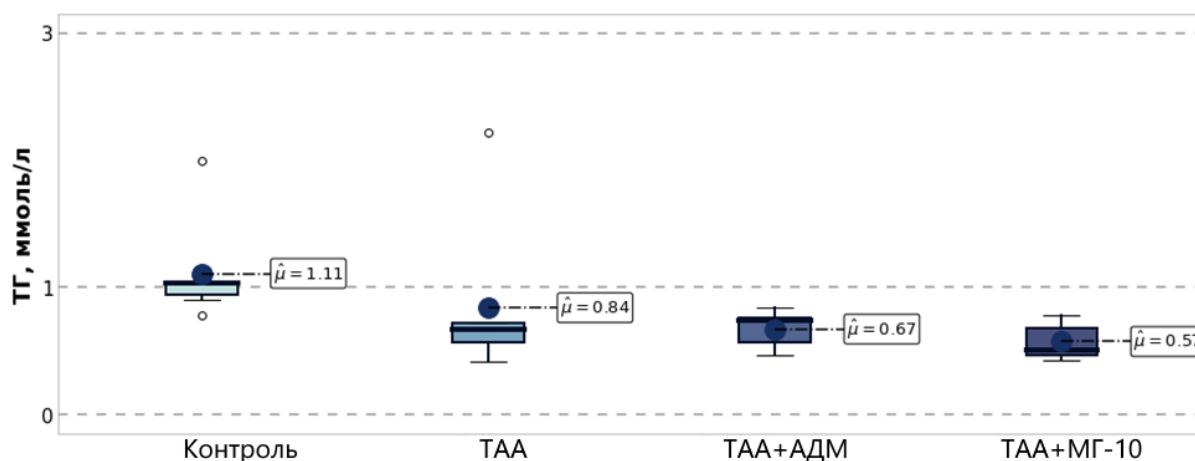


Рис. 3. Уровень триглицеридов в сыворотке крови крыс через 100 дней эксперимента

К окончанию исследования в группе К- уровень общего холестерина несколько повысился и составил $0,50 \pm 0,02$ ммоль/л (рис. 4). В группе ТАА (К+) средняя концентрация ХСТ достигла $0,71 \pm 0,16$ ммоль/л, в группе ТАА+АДМ – $0,61 \pm 0,19$ ммоль/л. Максимальное значение было зафиксировано в группе ТАА+МГ-10 – $0,95 \pm 0,15$ ммоль/л. Анализ данных показал значимое повышение уровня ХСТ в группе ТАА+МГ-10 относительно группы К- ($p=0,0108$). Различия между другими группами, а также между положительным (К+) и отрицательным контролем (К-) оставались статистически незначимыми.

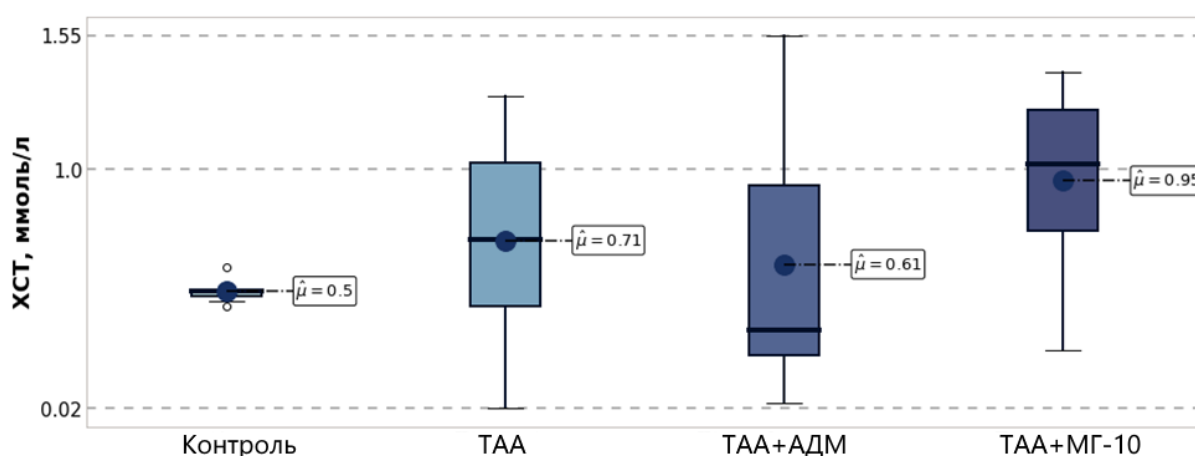


Рис. 4. Уровень холестерина в сыворотке крови крыс через 100 дней эксперимента

Обсуждение. Проведенное исследование позволило определить характерные изменения основных показателей липидного обмена, ТГ и ХСТ, в сыворотке крови крыс. Наблюдаемые биохимические сдвиги регистрировались в условиях хронической интоксикации ТАА как на фоне патологического процесса, так и при коррекции исследуемыми препаратами.

Наиболее выраженные и статистически значимые эффекты были зарегистрированы в отношении уровня триглицеридов. На 50-й день эксперимента введение ТАА не привело к значимому росту ТГ по сравнению с интактным контролем (К-), что может свидетельствовать о формировании процесса активации компенсаторных и адаптивных механизмов в ответ на токсическое воздействие на

данном этапе [49, 50]. Однако к 100-му дню в группе К+ отмечалось существенное повышение концентрации ТГ, что согласуется с выводами [51, 52], о развитии стойких метаболических нарушений при длительной интоксикации ТАА. В то же время, в условиях применяемой экспериментальной модели, показан выраженный корригирующий эффект двух исследуемых препаратов. Так, комбинация ТАА с АДМ и ТАА с МГ-10 статистически значимо снижала уровень ТГ относительно группы К- ($p=0,015$ и $p=0,0012$ соответственно). При этом группа ТАА+МГ-10 демонстрировала наименьшие значения ТГ как на 50-й, так и на 100-й день, что указывает на устойчивый и потенциально более выраженный гипотриглицеридемический эффект данного комплексного соединения. Подобный результат может быть следствием сбалансированного сочетания действующих веществ, формирующих состав МГ-10, а именно, антиоксидантной и детоксикационной активности ацетилцистеина [53, 54] с протекторным действием оксиметилурацила на репаративные и метаболические процессы в гепатоцитах [55, 56]. В контексте ТАА-индуцированного повреждения печени, наблюдаемое снижение показателя на фоне коррекции МГ-10, предположительно, можно связать с ослаблением окислительного стресса, частичным восстановлением митохондриального β -окисления и транспорта липидов, что ограничивает избыточный синтез и накопление триглицеридов в гепатоцитах, однако данный механизм требует дальнейшего экспериментального подтверждения.

Динамика уровня общего холестерина не демонстрировала статистически значимых изменений на 50-е сутки эксперимента во всех опытных группах по сравнению с отрицательным контролем. Отсутствие существенных сдвигов в показателях ХСТ, в отличие от динамики триглицеридов, может свидетельствовать о более высокой устойчивости систем, регулирующих гомеостаз холестерина (синтез, катаболизм, экскреция), к хроническому токсическому воздействию ТАА, в исследуемый период наблюдения. Действительно, в работе Waters et al. [57] показано, что снижение уровня ТГ в плазме происходило в период от 3 до 31 часа после введения ТАА крысам, в то время как повышение уровня ХСТ развивалось лишь спустя 79 часов после начала интоксикации. Кроме того, в исследовании Provost et al. [58] было установлено, что на фоне введения ТАА, спустя 24 часа, наблюдалось снижение концентрации триглицеридов в плазме крови экспериментальных животных без сопутствующих изменений уровня холестерина. Зафиксированный в условиях действия ТАА на организм характер метаболических изменений липидного профиля, существенно отличался от выявленных эффектов других протестированных соединений (этионина, WY-14,643 и рифампицина), при применении которых наблюдалось параллельное снижение концентрации как триглицеридов, так и холестерина.

К 100-му дню в группе ТАА+МГ-10 было зафиксировано статистически значимое повышение уровня ХСТ относительно группы К- ($p=0,0108$). На первый взгляд, результат может показаться противоречащим, отмеченному выше, гипотриглицеридемическому эффекту препарата. Однако, в условиях тяжелого токсического поражения печени и блокады основных метаболических путей может происходить компенсаторная активация альтернативных резервных механизмов [59–62]. Процесс восстановления функционального состояния печени сопровождается включением ведущих транскрипционных факторов — стерол-регуляторных элемент-связывающих белков (SREBP). При снижении внутриклеточного уровня холестерина SREBP мигрируют в ядро и усиливают экспрессию генов, отвечающих за его эндогенный биосинтез [63]. В то же время стадия образования и накопления жирных кислот, триглицеридов и их производных осуществляется либо по определённой схеме,

либо сохраняется неизменной [64]. В целом, наблюдаемая динамика, по-видимому, отражает сложность перераспределения энергетических ресурсов в условиях восстановления функции органа. Вероятно, отсутствие аналогичного значимого повышения ХСТ в группе ТАА+АДМ, где уровень ТГ также снизился, но менее выражено, косвенно подтверждает гипотезу о более мощном и, как следствие, более комплексном влиянии соединения МГ-10 на метаболизм печени.

Заключение. Таким образом, полученные данные демонстрируют, что препарат МГ-10, предположительно, оказывает значимое корректирующее влияние на липидный обмен экспериментальных животных при хронической ТАА-интоксикации, в первую очередь, проявляя устойчивый гипотриглицеридемический эффект. Наблюдаемое повышение уровня холестерина на поздних сроках эксперимента в данной группе требует дальнейшего углубленного изучения, включая анализ фракций липопротеинов и активности основных ферментов биосинтеза, для выявления механизмов, лежащих в основе патогенетического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Z.P., Ouyang G.Q., Huang G.Z., Wei J., Dai L., He S.Q., Yuan G.D. Global burden of cirrhosis and other chronic liver diseases due to nonalcoholic fatty liver disease, 1990-2019 // *World J. Hepatol.* – 2023. – V. 15, No 11. – P. 1210-1225. – DOI: 10.4254/wjh.v15.i11.1210.
2. Gao B., Bataller R. Alcoholic liver disease: pathogenesis and new therapeutic targets // *Gastroenterology.* – 2011. – V. 141, No 5. – P. 1572-1585. – DOI: 10.1053/j.gastro.2011.09.002.
3. Gu X., Manautou J.E. Molecular mechanisms underlying chemical liver injury // *Expert Rev. Mol. Med.* – 2012. – V. 14. – P. e4. – DOI: 10.1017/S1462399411002110.
4. Pollard K.M., Christy J.M., Cauvi D.M., Kono D.H. Environmental Xenobiotic Exposure and Autoimmunity // *Curr. Opin. Toxicol.* – 2018. – V. 10. – P. 15-22. – DOI: 10.1016/j.cotox.2017.11.009.
5. Li Y., Fan H., Li B., Liu X. Environmental Impact of Xenobiotic Aromatic Compounds and Their Biodegradation Potential in Comamonas testosteroni // *Int. J. Mol. Sci.* – 2024. – V. 25, No 24. – P. 13317. – DOI: 10.3390/ijms252413317.
6. Miglani R., Parveen N., Kumar A., Ansari M.A., Khanna S., Rawat G., Panda A.K., Bisht S.S., Upadhyay J., Ansari M.N. Degradation of Xenobiotic Pollutants: An Environmentally Sustainable Approach // *Metabolites.* – 2022. – V. 12, No 9. – P. 818. – DOI: 10.3390/metabo12090818.
7. Kumar M., Sarma D.K., Shubham S., Kumawat M., Verma V., Prakash A., Tiwari R. Environmental Endocrine-Disrupting Chemical Exposure: Role in Non-Communicable Diseases // *Front. Public Health.* – 2020. – V. 8. – P. 553850. – DOI: 10.3389/fpubh.2020.553850.
8. Rai M., Paudel N., Sakhrie M., Gemmati D., Khan I.A., Tisato V., Kanase A., Schulz A., Singh A.V. Perspective on Quantitative Structure–Toxicity Relationship (QSTR) Models to Predict Hepatic Biotransformation of Xenobiotics // *Livers.* – 2023. – V. 3, No 3. – P. 448-462. – DOI: 10.3390/livers3030032.
9. Lerapetritou M.G., Georgopoulos P.G., Roth C.M., Androulakis L.P. Tissue-level modeling of xenobiotic metabolism in liver: An emerging tool for enabling clinical translational research // *Clin. Transl. Sci.* – 2009. – V. 2, No 3. – P. 228-237. – DOI: 10.1111/j.1752-8062.2009.00092.x.
10. Darenskiy D.I. Features of the development and treatment of lipid metabolism disorders in patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease: A review // *Consilium Medicum.* – 2025. – V. 27, No 10. – P. 594-603. – DOI: 10.26442/20751753.2025.10.203461.
11. Abdulhameed A.A.R., Lim V., Bahari H., Khoo B.Y., Abdullah M.N.H., Tan J.J., Yong Y.K. Adverse Effects of Bisphenol A on the Liver and Its Underlying Mechanisms: Evidence from In Vivo and In Vitro Studies // *Biomed Res. Int.* – 2022. – V. 2022. – P. 8227314. – DOI: 10.1155/2022/8227314.
12. Chakraborty S., Anand S., Numan M., Bhandari R.K. Ancestral bisphenol A exposure led to non-alcoholic fatty liver disease and sex-specific alterations in proline and bile metabolism pathways in the liver // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2025. – V. 44, No 4. – P. 958-972. – DOI: 10.1093/etoxnl/vgae081.
13. Roth K., Yang Z., Agarwal M., Liu W., Peng Z., Long Z., Birbeck J., Westrick J., Liu W., Petriello M.C. Exposure to a mixture of legacy, alternative, and replacement per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) results in sex-dependent modulation of cholesterol metabolism and liver injury // *Environ. Int.* – 2021. – V. 157. – P. 106843. – DOI: 10.1016/j.envint.2021.106843.

14. Foulds C.E., Treviño L.S., York B., Walker C.L. Endocrine-disrupting chemicals and fatty liver disease // *Nat. Rev. Endocrinol.* – 2017. – V. 13, No 8. – P. 445-457. – DOI: 10.1038/nrendo.2017.42.
15. Rudraiah S., Zhang X., Wang L. Nuclear Receptors as Therapeutic Targets in Liver Disease: Are We There Yet? // *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* – 2016. – V. 56. – P. 605–626. – DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-010715-103209.
16. Meyer J.N., Leung M.C., Rooney J.P., Sendoel A., Hengartner M.O., Kisby G.E., Bess A.S. Mitochondria as a target of environmental toxicants // *Toxicol. Sci.* – 2013. – V. 134, No 1. – P. 1-17. – DOI: 10.1093/toxsci/kft102.
17. Mihajlovic M., Vinken M. Mitochondria as the Target of Hepatotoxicity and Drug-Induced Liver Injury: Molecular Mechanisms and Detection Methods // *Int. J. Mol. Sci.* – 2022. – V. 23, No 6. – P. 3315. – DOI: 10.3390/ijms23063315.
18. Barouki R., Samson M., Blanc E.B., Colombo M., Zucman-Rossi J., Lazaridis K.N., Miller G.W., Coumoul X. The exposome and liver disease - how environmental factors affect liver health // *J. Hepatol.* – 2023. – V. 79, No 2. – P. 492-505. – DOI: 10.1016/j.jhep.2023.02.034.
19. Beier J.I., Arteel G.E. Environmental exposure as a risk-modifying factor in liver diseases: Knowns and unknowns // *Acta Pharm. Sin. B.* – 2021. – V. 11, No 12. – P. 3768-3778. – DOI: 10.1016/j.apsb.2021.09.005.
20. Enciso N., Amiel J., Fabián-Domínguez F., Pando J., Rojas N., Cisneros-Huamani C., Nava E., Enciso J. Model of Liver Fibrosis Induction by Thioacetamide in Rats for Regenerative Therapy Studies // *Anal. Cell. Pathol.* – 2022. – V. 2022. – P. 2841894. – DOI: 10.1155/2022/2841894.
21. Alshawnani A.R., Hagar H., Shaheen S., Alhusaini A.M., Arafah M.M., Faddah L.M., Alharbi F.M., Sharma A.K., Fayed A., Badr A.M. A promising antifibrotic drug, pyridoxamine attenuates thioacetamide-induced liver fibrosis by combating oxidative stress, advanced glycation end products, and balancing matrix metalloproteinases // *Eur. J. Pharmacol.* – 2022. – V. 923. – P. 174910. – DOI: 10.1016/j.ejphar.2022.174910.
22. Shaker M.E., Eisa N.H., Elgaml A., El-Mesery A., El-Shafey M., El-Dosoky M., El-Mowafy M., El-Mesery M. Ingestion of mannose ameliorates thioacetamide-induced intrahepatic oxidative stress, inflammation and fibrosis in rats // *Life Sci.* – 2021. – V. 286. – P. 120040. – DOI: 10.1016/j.lfs.2021.120040.
23. Shin M.R., Lee J.A., Kim M., Lee S., Oh M., Moon J., Nam J.W., Choi H., Mun Y.J., Roh S.S. Gardeniae Fructus Attenuates Thioacetamide-Induced Liver Fibrosis in Mice via Both AMPK/SIRT1/NF- κ B Pathway and Nrf2 Signaling // *Antioxidants.* – 2021. – V. 10, No 11. – P. 1837. – DOI: 10.3390/antiox10111837.
24. Staňková P., Kučera O., Lotková H., Roušar T., Endlicher R., Cervinková Z. The toxic effect of thioacetamide on rat liver in vitro // *Toxicol. In Vitro.* – 2010. – V. 24, No 8. – P. 2097-2103. – DOI: 10.1016/j.tiv.2010.06.011.
25. Lo R.C., Kim H. Histopathological evaluation of liver fibrosis and cirrhosis regression // *Clin. Mol. Hepatol.* – 2017. – V. 23, No 4. – P. 302-307. – DOI: 10.3350/cmh.2017.0078.
26. Hammerich L., Tacke F. Hepatic inflammatory responses in liver fibrosis // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* – 2023. – V. 20, No 10. – P. 633-646. – DOI: 10.1038/s41575-023-00807-x.
27. Xie Y., Wang G., Wang H., Yao X., Jiang S., Kang A., Zhou F., Xie T., Hao H. Cytochrome P450 dysregulations in thioacetamide-induced liver cirrhosis in rats and the counteracting effects of hepatoprotective agents // *Drug Metab. Dispos.* – 2012. – V. 40, No 4. – P. 796-802. – DOI: 10.1124/dmd.111.043539.
28. Ingawale D.K., Mandlik S.K., Naik S.R. Models of hepatotoxicity and the underlying cellular, biochemical and immunological mechanism(s): a critical discussion // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* – 2014. – V. 37, No 1. – P. 118-133. – DOI: 10.1016/j.etap.2013.08.015.
29. Ezhilarasan D. Molecular mechanisms in thioacetamide-induced acute and chronic liver injury models // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* – 2023. – V. 99. – P. 104093. – DOI: 10.1016/j.etap.2023.104093.
30. Hajovsky H., Hu G., Koen Y., Sarma D., Cui W., Moore D.S., Staudinger J.L., Hanzlik R.P. Metabolism and toxicity of thioacetamide and thioacetamide S-oxide in rat hepatocytes // *Chem. Res. Toxicol.* – 2012. – V. 25, No 9. – P. 1955-1963. – DOI: 10.1021/tx3002719.
31. Wallace M.C., Hamesch K., Lunova M., Kim Y., Weiskirchen R., Strnad P., Friedman S.L. Standard operating procedures in experimental liver research: thioacetamide model in mice and rats // *Lab. Anim.* – 2015. – V. 49, No 1 Suppl. – P. 21-29. – DOI: 10.1177/0023677215573040.
32. Gong J., Tu W., Liu J., Tian D. Hepatocytes: A key role in liver inflammation // *Front. Immunol.* – 2023. – V. 13. – P. 1083780. – DOI: 10.3389/fimmu.2022.1083780.
33. Higashi T., Friedman S.L., Hoshida Y. Hepatic stellate cells as key target in liver fibrosis // *Adv. Drug Deliv. Rev.* – 2017. – V. 121. – P. 27-42. – DOI: 10.1016/j.addr.2017.05.007.
34. Luedde T., Kaplowitz N., Schwabe R.F. Cell death and cell death responses in liver disease: mechanisms and clinical relevance // *Gastroenterology.* – 2014. – V. 147, No 4. – P. 765-783.e4. – DOI: 10.1053/j.gastro.2014.07.018.

35. Zhou S., Gu J., Liu R., Wei S., Wang Q., Shen H., Dai Y., Zhou H., Zhang F., Lu L. Spermine Alleviates Acute Liver Injury by Inhibiting Liver-Resident Macrophage Pro-Inflammatory Response Through ATG5-Dependent Autophagy // *Front. Immunol.* – 2018. – V. 9. – P. 948. – DOI: 10.3389/fimmu.2018.00948.
36. Kisseleva T., Brenner D. Molecular and cellular mechanisms of liver fibrosis and its regression // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* – 2021. – V. 18, No 3. – P. 151-166. – DOI: 10.1038/s41575-020-00372-7.
37. Tsuchida T., Friedman S.L. Mechanisms of hepatic stellate cell activation // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* – 2017. – V. 14, No 7. – P. 397-411. – DOI: 10.1038/nrgastro.2017.38.
38. Roehlen N., Crouchet E., Baumert T.F. Liver Fibrosis: Mechanistic Concepts and Therapeutic Perspectives // *Cells.* – 2020. – V. 9, No 4. – P. 875. – DOI: 10.3390/cells9040875.
39. Fabregat I., Moreno-Càceres J., Sánchez A., Dooley S., Dewidar B., Giannelli G., Ten Dijke P. IT-LIVER Consortium. TGF- β signalling and liver disease // *FEBS J.* – 2016. – V. 283, No 12. – P. 2219-2232. – DOI: 10.1111/febs.13665.
40. Shirato T., Homma T., Lee J., Kurahashi T., Fujii J. Oxidative stress caused by a SOD1 deficiency ameliorates thioacetamide-triggered cell death via CYP2E1 inhibition but stimulates liver steatosis // *Arch. Toxicol.* – 2017. – V. 91, No 3. – P. 1319-1333. – DOI: 10.1007/s00204-016-1785-9.
41. Wei D.D., Wang J.S., Duan J.A., Kong L.Y. Metabolomic Assessment of Acute Cholestatic Injuries Induced by Thioacetamide and by Bile Duct Ligation, and the Protective Effects of Huang-Lian-Jie-Du-Decoction // *Front. Pharmacol.* – 2018. – V. 9. – P. 458. – DOI: 10.3389/fphar.2018.00458.
42. Farghali H., Canová N.K., Zakhari S. Hepatoprotective properties of extensively studied medicinal plant active constituents: possible common mechanisms // *Pharmaceutical biology.* – 2015. – V. 53, No 6. – P. 781-791. – DOI: 10.3109/13880209.2014.950387.
43. Полухина А.В., Винницкая Е.В., Сандлер Ю.Г., Хайменова Т.Ю. Адemetионин в лечении неалкогольной жировой болезни печени // *Медицинский Совет.* – 2017. – № 15. – С. 104-111. – DOI: 10.21518/2079-701X-2017-15-104-111.
44. Vergani L., Baldini F., Khalil M., Voci A., Putignano P., Miraglia N. New Perspectives of S-Adenosylmethionine (SAMe) Applications to Attenuate Fatty Acid-Induced Steatosis and Oxidative Stress in Hepatic and Endothelial Cells // *Molecules (Basel, Switzerland).* – 2020. – V. 25, No 18. – P. 4237. – DOI: 10.3390/molecules25184237.
45. Li H., Liu N.N., Peng Z.G. Effect of bicyclol on blood biomarkers of NAFLD: a systematic review and meta-analysis // *BMJ open.* – 2020. – V. 10, No 12. – P. e039700. – DOI: 10.1136/bmjopen-2020-039700.
46. Dlodla P.V., Nkambule B.B., Mazibuko-Mbeje S.E., Nyambuya T.M., Marcheggiani F., Cirilli I., Ziqubu K., Shabalala S.C., Johnson R., Louw J., Damiani E., Tiano L. N-Acetyl Cysteine Targets Hepatic Lipid Accumulation to Curb Oxidative Stress and Inflammation in NAFLD: A Comprehensive Analysis of the Literature // *Antioxidants (Basel, Switzerland).* – 2020. – V. 9, No 12. – P. 1283. – DOI: 10.3390/antiox9121283.
47. Karedath J., Javed H., Ahsan Talpur F., Lal B., Kumari A., Kivan H., Anirudh Chunchu V., Hirani S. Effect of Vitamin E on Clinical Outcomes in Patients With Non-alcoholic Fatty Liver Disease: A Meta-Analysis // *Cureus.* – 2022. – V. 14, No 12. – P. e32764. – DOI: 10.7759/cureus.32764.
48. Мышкин В.А., Еникеев Д.А. Антиоксиданты пиримидиновой структуры в качестве средств коррекции перекисного окисления липидов, индуцированного токсическим фактором // *Медицинский вестник Башкортостана.* – 2014. – Т. 9, № 5. – С. 143-146.
49. Zuñiga-Aguilar E., Ramirez-Fernández O. Fibrosis and hepatic regeneration mechanism // *Transl. Gastroenterol. Hepatol.* – 2022. – V. 7. – P. 9. – DOI: 10.21037/tgh.2020.02.21.
50. Radun R., Trauner M. Role of FXR in Bile Acid and Metabolic Homeostasis in NASH: Pathogenetic Concepts and Therapeutic Opportunities // *Semin. Liver Dis.* – 2021. – V. 41, No 4. – P. 461-475. – DOI: 10.1055/s-0041-1731707.
51. Ebaid H., Bashandy S.A., Morsy F.A., Al-Tamimi J., Hassan I., Alhazza I.M. Protective effect of gallic acid against thioacetamide-induced metabolic dysfunction of lipids in hepatic and renal toxicity // *J. King Saud Univ. Sci.* – 2023. – V. 35, No 3. – P. 102531. – DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102531.
52. Wu J., Gong L., Li Y., Qu J., Yang Y., Wu R., Fan G., Ding M., Xie K., Li F., Li X. Tao-Hong-Si-Wu-Tang improves thioacetamide-induced liver fibrosis by reversing ACSL4-mediated lipid accumulation and promoting mitophagy // *J. Ethnopharmacol.* – 2024. – V. 333. – P. 118456. – DOI: 10.1016/j.jep.2024.118456.
53. Aldini G., Altomare A., Baron G., Vistoli G., Carini M., Borsani L., Sergio F. N-Acetylcysteine as an antioxidant and disulphide breaking agent: the reasons why // *Free Radic. Res.* – 2018. – V. 52, No 7. – P. 751-762. – DOI: 10.1080/10715762.2018.1468564.
54. Zhitkovich A. N-Acetylcysteine: Antioxidant, Aldehyde Scavenger, and More // *Chem. Res. Toxicol.* – 2019. – V. 32, No 7. – P. 1318-1319. – DOI: 10.1021/acs.chemrestox.9b00152.

55. Myshkin V.A., Enikeyev D.A. Hepatoprotection against chemical influence: comparative effects of 5-hydroxy-6-methyluracil (oxymethyluracil), complex compound «oxymethyluracil + sodium succinate» and silymarine // *Arch. Euromedica*. – 2014. – V. 4, No 1. – P. 45-49.
56. Khazimullina Y.Z., Gimadieva A.R., Khairullina V.R., Kudoyarov E.R., Karimov D.O., Mustafin A.G. Synthesis and Study of the Hepatoprotective Activity of New Uracil Derivatives // *Russ. J. Bioorg. Chem.* – 2025. – V. 51. – P. 117-127. – DOI: 10.1134/S1068162025010157.
57. Waters N.J., Waterfield C.J., Farrant R.D., Holmes E., Nicholson J.K. Metabonomic deconvolution of embedded toxicity: application to thioacetamide hepato- and nephrotoxicity // *Chem. Res. Toxicol.* – 2005. – V. 18, No 4. – P. 639-654. – DOI: 10.1021/tx049869b.
58. Provost J.P., Hanton G., Net J.L. Plasma triglycerides: an overlooked biomarker of hepatotoxicity in the rat // *Comp. Clin. Pathol.* – 2003. – V. 12, No 2. – P. 95-101.
59. Horn P., Tacke F. Metabolic reprogramming in liver fibrosis // *Cell Metab.* – 2024. – V. 36, No 7. – P. 1439-1455. – DOI: 10.1016/j.cmet.2024.05.003.
60. Delgado M.E., Cárdenas B.I., Farran N., Fernandez M. Metabolic Reprogramming of Liver Fibrosis // *Cells*. – 2021. – V. 10, No 12. – P. 3604. – DOI: 10.3390/cells10123604.
61. Zhang D., Shi C., Wang Y., Guo J., Gong Z. Metabolic Dysregulation and Metabolite Imbalances in Acute-on-chronic Liver Failure: Impact on Immune Status // *J. Clin. Transl. Hepatol.* – 2024. – V. 12, No 10. – P. 865-877. – DOI: 10.14218/JCTH.2024.00203.
62. Zhang I.W., Curto A., López-Vicario C., Casulleras M., Duran-Güell M., Flores-Costa R., Colsch B., Aguilar F., Aransay A.M., Lozano J.J., Hernández-Tejero M., Toapanta D., Fernández J., Arroyo V., Clària J. Mitochondrial dysfunction governs immunometabolism in leukocytes of patients with acute-on-chronic liver failure // *J. Hepatol.* – 2022. – V. 76, No 1. – P. 93-106. – DOI: 10.1016/j.jhep.2021.08.009.
63. Saxena N., Chandra N.C. Cholesterol: A Prelate in Cell Nucleus and its Serendipity // *Curr. Mol. Med.* – 2020. – V. 20, No 9. – P. 692-707. – DOI: 10.2174/1566524020666200413112030.
64. Shi L., Chen H., Zhang Y., An D., Qin M., Yu W., Wen B., He D., Hao H., Xiong J. SLC13A2 promotes hepatocyte metabolic remodeling and liver regeneration by enhancing de novo cholesterol biosynthesis // *EMBO J.* – 2025. – V. 44, No 5. – P. 1442-1463. – DOI: 10.1038/s44318-025-00362-y.

REFERENCES

1. Liu, Z.P., Ouyang, G.Q., Huang, G.Z., Wei, J., Dai, L., He, S.Q. & Yuan, G.D. (2023) Global burden of cirrhosis and other chronic liver diseases due to nonalcoholic fatty liver disease, 1990-2019. *World J. Hepatol.* 15 (11), 1210-1225, doi: 10.4254/wjh.v15.i11.1210.
2. Gao, B. & Bataller, R. (2011) Alcoholic liver disease: pathogenesis and new therapeutic targets. *Gastroenterology*. 141 (5), 1572-1585, doi: 10.1053/j.gastro.2011.09.002.
3. Gu, X. & Manautou, J.E. (2012) Molecular mechanisms underlying chemical liver injury. *Expert Rev. Mol. Med.* 14, e4, doi: 10.1017/S1462399411002110.
4. Pollard, K.M., Christy, J.M., Cauvi, D.M. & Kono, D.H. (2018) Environmental Xenobiotic Exposure and Autoimmunity. *Curr. Opin. Toxicol.* 10, 15-22, doi: 10.1016/j.cotox.2017.11.009.
5. Li, Y., Fan, H., Li, B. & Liu, X. (2024) Environmental Impact of Xenobiotic Aromatic Compounds and Their Biodegradation Potential in *Comamonas testosteroni*. *Int. J. Mol. Sci.* 25 (24), 13317, doi: 10.3390/ijms252413317.
6. Miglani, R., Parveen, N., Kumar, A., Ansari, M.A., Khanna, S., Rawat, G., Panda, A.K., Bisht, S.S., Upadhyay, J. & Ansari, M.N. (2022) Degradation of Xenobiotic Pollutants: An Environmentally Sustainable Approach. *Metabolites*. 12 (9), 818, doi: 10.3390/metabo12090818.
7. Kumar, M., Sarma, D.K., Shubham, S., Kumawat, M., Verma, V., Prakash, A. & Tiwari, R. (2020) Environmental Endocrine-Disrupting Chemical Exposure: Role in Non-Communicable Diseases. *Front. Public Health*. 8, 553850, doi: 10.3389/fpubh.2020.553850.
8. Rai, M., Paudel, N., Sakhrie, M., Gemmati, D., Khan, I.A., Tisato, V., Kanase, A., Schulz, A. & Singh, A.V. (2023) Perspective on Quantitative Structure-Toxicity Relationship (QSTR) Models to Predict Hepatic Biotransformation of Xenobiotics. *Livers*. 3 (3), 448-462, doi: 10.3390/livers3030032.
9. Lerapetritou, M.G., Georgopoulos, P.G., Roth, C.M. & Androulakis, L.P. (2009) Tissue-level modeling of xenobiotic metabolism in liver: An emerging tool for enabling clinical translational research. *Clin. Transl. Sci.* 2 (3), 228-237, doi: 10.1111/j.1752-8062.2009.00092.x.
10. Darenkiy, D.I. (2025) Features of the development and treatment of lipid metabolism disorders in patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease: A review. *Consilium Medicum*. 27 (10), 594-603, doi: 10.26442/20751753.2025.10.203461.
11. Abdulhameed, A.A.R., Lim, V., Bahari, H., Khoo, B.Y., Abdullah, M.N.H., Tan, J.J. & Yong, Y.K. (2022) Adverse Effects of Bisphenol A on the Liver and Its Underlying Mechanisms: Evidence from In Vivo and In Vitro Studies. *Biomed Res. Int.* 2022, 8227314, doi: 10.1155/2022/8227314.

12. Chakraborty, S., Anand, S., Numan, M. & Bhandari, R.K. (2025) Ancestral bisphenol A exposure led to non-alcoholic fatty liver disease and sex-specific alterations in proline and bile metabolism pathways in the liver. *Environ. Toxicol. Chem.* 44 (4), 958-972, doi: 10.1093/etojnl/vgae081.
13. Roth, K., Yang, Z., Agarwal, M., Liu, W., Peng, Z., Long, Z., Birbeck, J., Westrick, J., Liu, W. & Petriello, M.C. (2021) Exposure to a mixture of legacy, alternative, and replacement per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) results in sex-dependent modulation of cholesterol metabolism and liver injury. *Environ. Int.* 157, 106843, doi: 10.1016/j.envint.2021.106843.
14. Foulds, C.E., Treviño, L.S., York, B. & Walker, C.L. (2017) Endocrine-disrupting chemicals and fatty liver disease. *Nat. Rev. Endocrinol.* 13 (8), 445-457, doi: 10.1038/nrendo.2017.42.
15. Rudraiah, S., Zhang, X. & Wang, L. (2016) Nuclear Receptors as Therapeutic Targets in Liver Disease: Are We There Yet? *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* 56, 605-626, doi: 10.1146/annurev-pharmtox-010715-103209.
16. Meyer, J.N., Leung, M.C., Rooney, J.P., Sendoel, A., Hengartner, M.O., Kisby, G.E. & Bess, A.S. (2013) Mitochondria as a target of environmental toxicants. *Toxicol. Sci.* 134 (1), 1-17, doi: 10.1093/toxsci/kft102.
17. Mihajlovic, M. & Vinken, M. (2022) Mitochondria as the Target of Hepatotoxicity and Drug-Induced Liver Injury: Molecular Mechanisms and Detection Methods. *Int. J. Mol. Sci.* 23 (6), 3315, doi: 10.3390/ijms23063315.
18. Barouki, R., Samson, M., Blanc, E.B., Colombo, M., Zucman-Rossi, J., Lazaridis, K.N., Miller, G.W. & Coumoul, X. (2023) The exposome and liver disease - how environmental factors affect liver health. *J. Hepatol.* 79 (2), 492-505, doi: 10.1016/j.jhep.2023.02.034.
19. Beier, J.I. & Arteel, G.E. (2021) Environmental exposure as a risk-modifying factor in liver diseases: Knowns and unknowns. *Acta Pharm. Sin. B.* 11 (12), 3768-3778, doi: 10.1016/j.apsb.2021.09.005.
20. Enciso, N., Amiel, J., Fabián-Domínguez, F., Pando, J., Rojas, N., Cisneros-Huamaní, C., Nava, E. & Enciso, J. (2022) Model of Liver Fibrosis Induction by Thioacetamide in Rats for Regenerative Therapy Studies. *Anal. Cell. Pathol.* 2022, 2841894, doi: 10.1155/2022/2841894.
21. Alshanwani, A.R., Hagar, H., Shaheen, S., Alhusaini, A.M., Arafah, M.M., Faddah, L.M., Alharbi, F.M., Sharma, A.K., Fayed, A. & Badr, A.M. (2022) A promising antifibrotic drug, pyridoxamine attenuates thioacetamide-induced liver fibrosis by combating oxidative stress, advanced glycation end products, and balancing matrix metalloproteinases. *Eur. J. Pharmacol.* 923, 174910, doi: 10.1016/j.ejphar.2022.174910.
22. Shaker, M.E., Eisa, N.H., Elgaml, A., El-Mesery, A., El-Shafey, M., El-Dosoky, M., El-Mowafy, M. & El-Mesery, M. (2021) Ingestion of mannose ameliorates thioacetamide-induced intrahepatic oxidative stress, inflammation and fibrosis in rats. *Life Sci.* 286, 120040, doi: 10.1016/j.lfs.2021.120040.
23. Shin, M.R., Lee, J.A., Kim, M., Lee, S., Oh, M., Moon, J., Nam, J.W., Choi, H., Mun, Y.J. & Roh, S.S. (2021) Gardeniae Fructus Attenuates Thioacetamide-Induced Liver Fibrosis in Mice via Both AMPK/SIRT1/NF- κ B Pathway and Nrf2 Signaling. *Antioxidants.* 10 (11), 1837, doi: 10.3390/antiox10111837.
24. Staňková, P., Kučera, O., Lotková, H., Roušar, T., Endlicher, R. & Cervinková, Z. (2010) The toxic effect of thioacetamide on rat liver in vitro. *Toxicol. In Vitro.* 24 (8), 2097-2103, doi: 10.1016/j.tiv.2010.06.011.
25. Lo, R.C. & Kim, H. (2017) Histopathological evaluation of liver fibrosis and cirrhosis regression. *Clin. Mol. Hepatol.* 23 (4), 302-307, doi: 10.3350/cmh.2017.0078.
26. Hammerich, L. & Tacke, F. (2023) Hepatic inflammatory responses in liver fibrosis. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 20 (10), 633-646, doi: 10.1038/s41575-023-00807-x.
27. Xie, Y., Wang, G., Wang, H., Yao, X., Jiang, S., Kang, A., Zhou, F., Xie, T. & Hao, H. (2012) Cytochrome P450 dysregulations in thioacetamide-induced liver cirrhosis in rats and the counteracting effects of hepatoprotective agents. *Drug Metab. Dispos.* 40 (4), 796-802, doi: 10.1124/dmd.111.043539.
28. Ingawale, D.K., Mandlik, S.K. & Naik, S.R. (2014) Models of hepatotoxicity and the underlying cellular, biochemical and immunological mechanism(s): a critical discussion. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 37 (1), 118-133, doi: 10.1016/j.etap.2013.08.015.
29. Ezhilarasan, D. (2023) Molecular mechanisms in thioacetamide-induced acute and chronic liver injury models. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 99, 104093, doi: 10.1016/j.etap.2023.104093.
30. Hajovsky, H., Hu, G., Koen, Y., Sarma, D., Cui, W., Moore, D.S., Staudinger, J.L. & Hanzlik, R.P. (2012) Metabolism and toxicity of thioacetamide and thioacetamide S-oxide in rat hepatocytes. *Chem. Res. Toxicol.* 25 (9), 1955-1963, doi: 10.1021/tx3002719.
31. Wallace, M.C., Hamesch, K., Lunova, M., Kim, Y., Weiskirchen, R., Strnad, P. & Friedman, S.L. (2015) Standard operating procedures in experimental liver research: thioacetamide model in mice and rats. *Lab. Anim.* 49 (1 Suppl), 21-29, doi: 10.1177/0023677215573040.
32. Gong, J., Tu, W., Liu, J. & Tian, D. (2023) Hepatocytes: A key role in liver inflammation. *Front. Immunol.* 13, 1083780, doi: 10.3389/fimmu.2022.1083780.

33. Higashi, T., Friedman, S.L. & Hoshida, Y. (2017) Hepatic stellate cells as key target in liver fibrosis. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 121, 27-42, doi: 10.1016/j.addr.2017.05.007.
34. Luedde, T., Kaplowitz, N. & Schwabe, R.F. (2014) Cell death and cell death responses in liver disease: mechanisms and clinical relevance. *Gastroenterology.* 147 (4), 765-783.e4, doi: 10.1053/j.gastro.2014.07.018.
35. Zhou, S., Gu, J., Liu, R., Wei, S., Wang, Q., Shen, H., Dai, Y., Zhou, H., Zhang, F. & Lu, L. (2018) Spermine Alleviates Acute Liver Injury by Inhibiting Liver-Resident Macrophage Pro-Inflammatory Response Through ATG5-Dependent Autophagy. *Front. Immunol.* 9, 948, doi: 10.3389/fimmu.2018.00948.
36. Kisseleva, T. & Brenner, D. (2021) Molecular and cellular mechanisms of liver fibrosis and its regression. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 18 (3), 151-166, doi: 10.1038/s41575-020-00372-7.
37. Tsuchida, T. & Friedman, S.L. (2017) Mechanisms of hepatic stellate cell activation. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 14 (7), 397-411, doi: 10.1038/nrgastro.2017.38.
38. Roehlen, N., Crouchet, E. & Baumert, T.F. (2020) Liver Fibrosis: Mechanistic Concepts and Therapeutic Perspectives. *Cells.* 9 (4), 875, doi: 10.3390/cells9040875.
39. Fabregat, I., Moreno-Cáceres, J., Sánchez, A., Dooley, S., Dewidar, B., Giannelli, G., Ten Dijke, P. & IT-LIVER Consortium. (2016) TGF- β signalling and liver disease. *FEBS J.* 283 (12), 2219-2232, doi: 10.1111/febs.13665.
40. Shirato, T., Homma, T., Lee, J., Kurahashi, T. & Fujii, J. (2017) Oxidative stress caused by a SOD1 deficiency ameliorates thioacetamide-triggered cell death via CYP2E1 inhibition but stimulates liver steatosis. *Arch. Toxicol.* 91 (3), 1319-1333, doi: 10.1007/s00204-016-1785-9.
41. Wei, D.D., Wang, J.S., Duan, J.A. & Kong, L.Y. (2018) Metabolomic Assessment of Acute Cholestatic Injuries Induced by Thioacetamide and by Bile Duct Ligation, and the Protective Effects of Huang-Lian-Jie-Du-Decoction. *Front. Pharmacol.* 9, 458, doi: 10.3389/fphar.2018.00458.
42. Farghali, H., Canová, N.K. & Zakhari, S. (2015) Hepatoprotective properties of extensively studied medicinal plant active constituents: possible common mechanisms. *Pharmaceutical biology.* 53 (6), 781-791, doi: 10.3109/13880209.2014.950387.
43. Polukhina, A.V., Vinnitskaya, E.V., Sandler, Yu.G. & Khaimenova T.Yu. (2017) [Ademetionine in the treatment of non-alcoholic fatty liver disease]. *Meditsinskiy Sovet = Medical Council.* (15), 104-111, doi: 10.21518/2079-701X-2017-15-104-111. (In Russian).
44. Vergani, L., Baldini, F., Khalil, M., Voci, A., Putignano, P. & Miraglia, N. (2020) New Perspectives of S-Adenosylmethionine (SAME) Applications to Attenuate Fatty Acid-Induced Steatosis and Oxidative Stress in Hepatic and Endothelial Cells. *Molecules (Basel, Switzerland).* 25 (18), 4237, doi: 10.3390/molecules25184237.
45. Li, H., Liu, N.N. & Peng, Z.G. (2020) Effect of bicyclol on blood biomarkers of NAFLD: a systematic review and meta-analysis. *BMJ open.* 10 (12), e039700, doi: 10.1136/bmjopen-2020-039700.
46. Dlodla, P.V., Nkambule, B.B., Mazibuko-Mbeje, S.E., Nyambuya, T.M., Marcheggiani, F., Cirilli, I., Ziqubu, K., Shabalala, S.C., Johnson, R., Louw, J., Damiani, E. & Tiano, L. (2020) N-Acetyl Cysteine Targets Hepatic Lipid Accumulation to Curb Oxidative Stress and Inflammation in NAFLD: A Comprehensive Analysis of the Literature. *Antioxidants (Basel, Switzerland).* 9 (12), 1283, doi: 10.3390/antiox9121283.
47. Karedath, J., Javed, H., Ahsan Talpur, F., Lal, B., Kumari, A., Kivan, H., Anirudh Chunchu, V. & Hirani, S. (2022) Effect of Vitamin E on Clinical Outcomes in Patients With Non-alcoholic Fatty Liver Disease: A Meta-Analysis. *Cureus.* 14 (12), e32764, doi: 10.7759/cureus.32764.
48. Myshkin, V.A. & Enikeev, D.A. (2014) [Antioxidants of pyrimidine structure as means of correcting lipid peroxidation induced by a toxic factor]. *Meditsinskiy vestnik Bashkortostana = Bashkortostan Medical Journal.* 9 (5), 143-146. (In Russian).
49. Zuñiga-Aguilar, E. & Ramírez-Fernández, O. (2022) Fibrosis and hepatic regeneration mechanism. *Transl. Gastroenterol. Hepatol.* 7, 9, doi: 10.21037/tgh.2020.02.21.
50. Radun, R. & Trauner, M. (2021) Role of FXR in Bile Acid and Metabolic Homeostasis in NASH: Pathogenetic Concepts and Therapeutic Opportunities. *Semin. Liver Dis.* 41 (4), 461-475, doi: 10.1055/s-0041-1731707.
51. Ebaid, H., Bashandy, S.A., Morsy, F.A., Al-Tamimi, J., Hassan, I. & Alhazza, I.M. (2023) Protective effect of gallic acid against thioacetamide-induced metabolic dysfunction of lipids in hepatic and renal toxicity. *J. King Saud Univ. Sci.* 35 (3), 102531, doi: 10.1016/j.jksus.2022.102531.
52. Wu, J., Gong, L., Li, Y., Qu, J., Yang, Y., Wu, R., Fan, G., Ding, M., Xie, K., Li, F. & Li, X. (2024) Tao-Hong-Si-Wu-Tang improves thioacetamide-induced liver fibrosis by reversing ACSL4-mediated lipid accumulation and promoting mitophagy. *J. Ethnopharmacol.* 333, 118456, doi: 10.1016/j.jep.2024.118456.
53. Aldini, G., Altomare, A., Baron, G., Vistoli, G., Carini, M., Borsani, L. & Sergio, F. (2018) N-Acetylcysteine as an antioxidant and disulphide breaking agent: the reasons why. *Free Radic. Res.* 52 (7), 751-762, doi: 10.1080/10715762.2018.1468564.

54. Zhitkovich, A. (2019) N-Acetylcysteine: Antioxidant, Aldehyde Scavenger, and More. *Chem. Res. Toxicol.* 32 (7), 1318-1319, doi: 10.1021/acs.chemrestox.9b00152.
55. Myshkin, V.A. & Enikeyev, D.A. (2014) Hepatoprotection against chemical influence: comparative effects of 5-hydroxy-6-methyluracil (oxymethyluracil), complex compound «oxymethyluracil + sodium succinate» and silymarine. *Arch. Euromedica.* 4 (1), 45-49.
56. Khazimullina, Y.Z., Gimadieva, A.R., Khairullina, V.R., Kudoyarov, E.R., Karimov, D.O. & Mustafin, A.G. (2025) Synthesis and Study of the Hepatoprotective Activity of New Uracil Derivatives. *Russ. J. Bioorg. Chem.* 51, 117-127, doi: 10.1134/S1068162025010157.
57. Waters, N.J., Waterfield, C.J., Farrant, R.D., Holmes, E. & Nicholson, J.K. (2005) Metabonomic deconvolution of embedded toxicity: application to thioacetamide hepato- and nephrotoxicity. *Chem. Res. Toxicol.* 18 (4), 639-654, doi: 10.1021/tx049869b.
58. Provost, J.P., Hanton, G. & Net, J.L. (2003) Plasma triglycerides: an overlooked biomarker of hepatotoxicity in the rat. *Comp. Clin. Pathol.* 12 (2), 95-101.
59. Horn, P. & Tacke, F. (2024) Metabolic reprogramming in liver fibrosis. *Cell Metab.* 36 (7), 1439-1455, doi: 10.1016/j.cmet.2024.05.003.
60. Delgado, M.E., Cárdenas, B.I., Farran, N. & Fernandez, M. (2021) Metabolic Reprogramming of Liver Fibrosis. *Cells.* 10 (12), 3604, doi: 10.3390/cells10123604.
61. Zhang, D., Shi, C., Wang, Y., Guo, J. & Gong, Z. (2024) Metabolic Dysregulation and Metabolite Imbalances in Acute-on-chronic Liver Failure: Impact on Immune Status. *J. Clin. Transl. Hepatol.* 12 (10), 865-877, doi: 10.14218/JCTH.2024.00203.
62. Zhang, I.W., Curto, A., López-Vicario, C., Casulleras, M., Duran-Güell, M., Flores-Costa, R., Colsch, B., Aguilar, F., Aransay, A.M., Lozano, J.J., Hernández-Tejero, M., Toapanta, D., Fernández, J., Arroyo, V. & Clària, J. (2022) Mitochondrial dysfunction governs immunometabolism in leukocytes of patients with acute-on-chronic liver failure. *J. Hepatol.* 76 (1), 93-106, doi: 10.1016/j.jhep.2021.08.009.
63. Saxena, N. & Chandra, N.C. (2020) Cholesterol: A Prelate in Cell Nucleus and its Serendipity. *Curr. Mol. Med.* 20 (9), 692-707, doi: 10.2174/1566524020666200413112030.
64. Shi, L., Chen, H., Zhang, Y., An, D., Qin, M., Yu, W., Wen, B., He, D., Hao, H. & Xiong, J. (2025) SLC13A2 promotes hepatocyte metabolic remodeling and liver regeneration by enhancing de novo cholesterol biosynthesis. *EMBO J.* 44 (5), 1442-1463, doi: 10.1038/s44318-025-00362-y.

DYNAMICS OF LIPID METABOLISM INDICATORS IN RATS UNDER CHRONIC INTOXICATION WITH THIOACETAMIDE AND AGAINST THE BACKGROUND OF CORRECTION

D. A. Smolyankin, A. O. Khmel, T. G. Yakupova, A. A. Gizatulina, N. Yu. Khusnutdinova, E. F. Repina, Yu. V. Ryabova, D. O. Karimov, A. R. Gimadieva

A comparative analysis of the effects of the hepatoprotectors ademetonine (ADM) and the complex compound MG-10 on lipid metabolism parameters was performed using a model of chronic thioacetamide (TAA) intoxication in rats. Enzymatic colorimetric analysis was used to determine the concentration of triglycerides (TG) and total cholesterol (TC) in blood serum on days 50 and 100. MG-10 was found to have a pronounced hypotriglyceridemic effect both at the intermediate and final stages of the study. By day 100, a statistically significant increase in TC was observed in the TAA+MG-10 group, while TG levels remained reduced. The use of ADM led to a less pronounced decrease in triglyceride levels. The results demonstrate the possible complex corrective effect of MG-10 on lipid metabolism in TAA-induced liver injury.

Keywords: thioacetamide; lipid metabolism; triglycerides; total cholesterol; ademetonine; MG-10; hepatoprotection; chronic intoxication; experimental model; rats.

Поступила в редакцию 19.01.2026 г.

Смолянкин Денис Анатольевич

научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: smolyankin.denis@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-7957-2399. SPIN-код: 5635-3202.

Smolyankin Denis Anatolyevich

Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Хмель Александра Олеговна

младший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: khmel.al01@gmail.com.

ORCID: 0009-0008-3068-3961. SPIN-код: 6583-2620.

Khmel Alexandra Olegovna

Junior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Якупова Татьяна Георгиевна

научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: tanya.kutlina.92@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-1236-8246. SPIN-код: 8191-2085.

Yakupova Tatyana Georgievna

Researcher, Genetics Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Гизатуллина Алина Анваровна

младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: alinagisa@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-7321-0864. SPIN-код: 6820-8953.

Gizatullina Alina Anvarovna

Junior Researcher, Genetics Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Хуснутдинова Надежда Юрьевна

научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: h-n-yu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0001-5596-8180. SPIN-код: 8024-6287.

Khusnutdinova Nadezhda Yuryevna

Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Репина Эльвира Фаридовна

кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: e.f.repina@bk.ru.

ORCID: 0000-0001-8798-0846. SPIN-код: 7669-0218.

Repina Elvira Faridovna

Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Рябова Юлия Владимировна

кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

E-mail: ryabovaiuvl@gmail.com.

ORCID: 0000-0003-2677-0479. SPIN-код: 5062-2526.

Ryabova Yulia Vladimirovna

Candidate of Medical Sciences, Head of the Toxicology Laboratory of the Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Каримов Денис Олегович

кандидат медицинских наук, заведующий отделом токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», г. Уфа, Россия.

Старший научный сотрудник отдела исследований общественного здоровья, ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко», г. Москва, Россия.

E-mail: karimovdo@gmail.com.

ORCID: 0000-0003-0039-6757. SPIN-код: 8063-3531.

Гимадиева Альфия Раисовна

кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории фармакофорных циклических систем, Уфимский институт химии ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Уфа, Россия.

E-mail: alf_gim@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-2995-310X. SPIN-код: 3528-8244.

Karimov Denis Olegovich

Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa research institute of occupational health and human ecology, Ufa, Russia.

Senior Research, Department of Public Health Research, N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russia.

Gimadieva Alfiya Raisovna

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Pharmacophoric Cyclic Systems, Ufa Institute of Chemistry UFRC RAS, Ufa, Russia.

**АНАЛИЗ ВИДОВОГО СОСТАВА СЕМЕЙСТВА *ASTERACEAE* Bercht. & J. Presl
ВО ФЛОРЕ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

© 2026. А. А. Теймуров, М. А-М. Астамирова, М. А. Тайсумов

В статье приводится критический анализ видового состава семейства *Asteraceae* Bercht. & J. Presl во флоре Чеченской Республики. Установлено, что семейство представлено 288 видами, относящимися к 83 родам. Выявлены восемь ведущих родов (*Hieracium*, *Cirsium*, *Artemisia*, *Centaurea*, *Senecio*, *Anthemis*, *Inula*, *Carduus*), которые в совокупности составляют ядро флоры сложноцветных региона. Значительную долю (47 % от общего числа родов) занимают одновидовые роды, что свидетельствует о гетерогенности флоры и ее насыщенности миграционными элементами. Проведен анализ высотно-пооясного распределения видов, позволивший выделить центры концентрации таксономического разнообразия в лесном, субальпийском и семиаридном поясах. Исследована хорологическая структура семейства, в которой доминируют бореальные геоэлементы (52,08 %) с ведущей ролью кавказских видов (27,78 %), при существенном участии древнесредиземноморских (17,01 %) и голарктических (18,41 %) элементов. Выявлена группа многопооясных видов (17 видов), диапазон распространения которых охватывает от четырех до пяти высотных поясов, что коррелирует с их хорологической принадлежностью и экологической пластичностью. Охарактеризована роль представителей семейства в сложении растительных сообществ – от эдификаторных полынных формаций до пионерных группировок на нарушенных местообитаниях. Полученные данные вносят вклад в понимание закономерностей формирования флоры Кавказского перешейка и могут быть использованы при мониторинге биоразнообразия и разработке мер по охране растительного мира региона.

Ключевые слова: *Asteraceae*, флора Чеченской Республики таксономический анализ, высотная пооясность, хорология, географический элемент, биоморфа, многопооясные виды, Кавказ.

Введение. Исследование таксономии и хорологии многовидовых семейств цветковых растений в районе со сложной геоморфологией, каким является территория Чеченской Республики, представляет значительный интерес не только в теоретическом, но и в практическом отношении для сохранения биоразнообразия или оценки ресурсов. Своеобразие этой части Большого Кавказа связано с многообразием климатических и природных особенностей, создающих широкий спектр местообитаний с разнообразными экологическими условиями. Немаловажно и то, что согласно флористическому районированию А. Л. Иванова с соавторами [1], исследуемый регион располагается на стыке четырех флористических округов (Центрально-Предкавказского, Терского, Дагестанского и Восточно-Предкавказского), относящихся к четырем провинциям, трем областям и двум подцарствам Голарктического флористического царства. Совокупность перечисленных факторов обуславливает высокое таксономическое богатство систематических групп и разнообразие геоботанических выделов растительного мира.

В контексте нашего исследования в первую очередь следует отметить, что номенклатурная история названия семейства *Asteraceae* требует четкого разграничения между ранними упоминаниями, формальным описанием и валидной публикацией названия.

Первое обособление группы сложноцветных в ранге отдельного класса («Classis IV. Compositae») связано с именем голландского ботаника Адриана ван Ройена и датируется 1740 годом [2]. Название семейства в латинизированной форме «*Asteraceae*» было валидно опубликовано чешскими ботаниками Фридрихом (Бедржихом) фон

Берхтольдом и Яном Сватоплуком Преслом в 1820 году [3]. Независимо от них, в 1822 году бельгийский ботаник Бартелеми Шарль Жозеф Дюмортье также использовал это название, указав своё авторство как *Asteraceae* Dumort. [4]. Однако, согласно принципу приоритета, закреплённому Международным кодексом номенклатуры водорослей, грибов и растений [5], действительным считается более раннее авторство – Berchtold & Presl. В соответствии с тем же Кодексом, для данного семейства сохранено в качестве допустимого альтернативного историческое название *Compositae* Giseke, обнародованное Паулем Дитрихом Гизеке в 1792 году [6].

На сегодняшний день *Asteraceae*, включая от 24 000 до 30 000 видов и от 1 600 до 1 700 родов, признается самым крупным по числу видов в мировой флоре [7, 8]. Первенство по числу видов во флоре Кавказа в целом и его отдельных регионов также принадлежит данному семейству.

Видовой состав *Asteraceae* в пределах Чеченской Республики рассматривался в фундаментальных кавказских сводках [9–11]. Более поздние флористические находки и таксономические уточнения по семейству приводятся в региональных монографиях и диссертациях [12–19].

Настоящая статья посвящена анализу видового разнообразия, хорологии и эколого-ценотических предпочтений видов *Asteraceae* флоры Чеченской Республики. Формирование современного видового состава *Asteraceae* в данной флоре неразрывно связано с процессами адаптации видов к экологическим режимам на фоне естественной динамики среды и антропогенной трансформации ландшафтов. Уникальное сочетание физико-географических условий – от полупустынь до альпийского пояса – предопределяет высокую мозаичность местообитаний и обилие экологических ниш. Это способствует насыщению региональной флоры представителями семейства *Asteraceae*, различающимися по своему систематическому положению и хорологии.

Методы исследования. Для составления таксономического списка *Asteraceae* обобщены многолетние данные собственных полевых исследований авторов, выполнена камеральная обработка коллекций, хранящихся в различных гербариях и критически проанализированы сведения из упомянутых выше литературных источников. Список составлен по системе Адольфа Энглера в последовательности принятой во «Флоре Северного Кавказа» А. И. Галушко [10]. Номенклатура и объемы таксонов приняты в основном по электронной базе данных «Plants of the World Online» [20]. Авторы названий таксонов приведены в соответствии с «International Plant Names Index» [21].

Видовой состав на уровне семейств любой естественноисторической территории обладает индивидуальными хорологическими особенностями. Их описание нами проведено с помощью географического анализа, базирующегося на классификации геоэлементов. Принцип выделения таких элементов строится на общности ареалов видов, что в свою очередь опирается на представление о фитохорионах различного иерархического уровня (от провинций до царств). Предпринятая нами хорологическая классификация видов *Asteraceae* построена по системе географических элементов, предложенной А. Л. Ивановым с соавторами [1], с внесением изменений, касающихся положения кавказских геоэлементов в общей структуре и их номенклатуры.

Классификация жизненных форм выполнена по системе К. Раункиера [22]. В соответствии с данной системой для классификации исследуемого семейства сложноцветных приняты пять основных биоморф (фанерофиты, хамефиты, гемикриптофиты, криптофиты, терофиты) без их дальнейшей детализации.

Результаты и их обсуждение. Как и следовало ожидать, анализ указанных выше региональных монографий и диссертаций выявляет лидирующее положение

семейства *Asteraceae* во флоре Чеченской Республики в целом и на отдельных её территориях. По имеющимся данным [13, 14] во флоре Чеченской Республики к данному семейству принадлежит 303 вида относящихся к 80 родам. Составленный нами список (табл. 1) включает 288 видов, относящихся к 83 родам. Расхождения в численности видов и родов могут быть объяснены появлением новых номенклатурных комбинаций, изменением синонимии и выявлением некоторых новых для флоры Чеченской Республики родов (соответственно и видов). Так, например, впервые для этой территории в нашем списке приводятся: *Kemulariella rosea*¹, *Rhaponticum pulchrum*, *Artemisia daghestanica*, *Helichrysum nogaicum*, *Cyclachaena xanthiifolia*, *Jurinea polyclonos*.

Анализ таксономической структуры семейства *Asteraceae* во флоре Чеченской Республики позволяет выявить четкую иерархию родового представительства, отражающую как исторические пути формирования флоры, так и современную экологическую дифференциацию. На вершине этой иерархии находятся роды-лидеры с числом видов десять и более, которые составляют ядро флоры сложноцветных региона. К этой группе относятся *Hieracium* (18 видов), *Cirsium* (17), *Artemisia* и *Centaurea* (по 16), *Senecio* (12), *Anthemis* (11), а также *Inula* и *Carduus* (по 10). Суммарно эти восемь родов включают 114 видов, что составляет около 40 % от общего числа видов семейства. Доминирование *Hieracium* и *Cirsium* указывает на значительную роль процессов гибридизации и апомиксиса, характерных для этих таксонов, и на их связь с луговыми и лесными сообществами среднегорий. Высокое положение *Artemisia* и *Centaurea* маркирует влияние аридных и степных ландшафтов, подчеркивая зональные черты равнинной части республики.

Таблица 1

Конспект видов *Asteraceae* флоры Чеченской Республики
(высотное распределение, жизненные формы, географические элементы)

№ пп	Название вида	Высотный пояс						ЖФ по Раункиеру	Геоэлемент ²
		Полупустынный	Степной	Семиаридный	Лесной	Субальпийский	Альпийский		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<i>Eupatorium cannabinum</i> L.			+	+			Нк	Палеаркт
2	<i>Solidago virgaurea</i> L.				+	+		Нк	Евро-Сиб
3	<i>Solidago caucasica</i> Kem.-Nath.				+	+	+	Нк	Общекавк
4	<i>Bellis perennis</i> L.				+			Нк	Адвент
5	<i>Aster alpinus</i> L.					+	+	Нк	Панбор

¹ Полные названия видов с указанием авторов см. в таблице 1.

² Плурирег – Плурирегиональный; Голаркт – Голарктический; Палеаркт – Палеарктический; Панбор – Панбореальный; Евро-Сиб – Евро-сибирский; Евро-Кавк – Евро-кавказский; Европ – Европейский; Общекавк – Общекавказский; Эукавк – Эукавказский; Восточнокавк – Восточнокавказский; Даг – Дагестанский; Эвксин – Эвксинский; Понт-Южносиб – Понтичско-южносибирский; Понт – Понтический; Общедр – Общедревнесредиземноморский; Задрср – Западнодревнесредиземноморский; Средизем – Средиземноморский; Востдрср – Восточнодревнесредиземноморский; Армено-Иран – Армено-иранский; Ирано-Туран – Туран-Туранский; Предкавк – Предкавказский; Субсредизем – Субсредиземноморский; Субкавк – Субкавказский; Субпонт – Субпонтический; Субтуран – Субтуранский; Адвент – Адвентивный.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
6	<i>Aster bessarabicus</i> Bernh. ex Reichenb.			+	+			Нк	Понт		
7	<i>Aster ibericus</i> Bieb.					+	+	Нк	Эукавк		
8	<i>Kemulariella rosea</i> (Stev. ex Bieb.) Tamamsch.			+	+	+	+	Нк	Востоchnокавк		
9	<i>Galatella pastuchovii</i> (Kem.-Nath.) Tzvel.	+	+					Нк	Понт		
10	<i>Galatella dracunculoides</i> (Lam.) Nees	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб		
11	<i>Galatella linosyris</i> (L.) Reichenb. f.	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб		
12	<i>Galatella villosa</i> (L.) Reichenb.	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб		
13	<i>Tripolium vulgare</i> Nees	+	+					Нк	Голаркт		
14	<i>Erigeron alpinus</i> L.							+	Нк	Общедр	
15	<i>Erigeron venustus</i> Botsch.						+	+	Нк	Общекавк	
16	<i>Erigeron uniflorus</i> Vierh.							+	Нк	Голаркт	
17	<i>Erigeron caucasicus</i> Stev.						+	+	Нк	Общекавк	
18	<i>Erigeron orientalis</i> Boiss.				+	+	+	+	Нк	Субкавк	
19	<i>Erigeron pseudoelongatus</i> Botsch.				+	+	+		Нк	Общекавк	
20	<i>Erigeron podolicus</i> Bess.				+	+	+		Нк	Палеаркт	
21	<i>Erigeron acris</i> L.	+	+	+	+				Нк	Голаркт	
22	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.						+		Тр	Голаркт	
23	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist			+	+	+			Тр	Адвент	
24	<i>Bombycilaena erecta</i> (L.) Smoljan.	+	+						Тр	Задрер	
25	<i>Filago eriocephala</i> Guss.	+	+						Тр	Задрер	
26	<i>Filago vulgaris</i> Lam.	+	+	+					Тр	Задрер	
27	<i>Filago arvensis</i> L.	+	+	+					Тр	Палеаркт	
28	<i>Antennaria caucasica</i> Boriss.						+	+	+	Нк	Армено-Иран
29	<i>Helichrysum arenarium</i> (L.) Moench	+	+							Нк	Палеаркт
30	<i>Helichrysum nogaicum</i> Tzvel.	+								Нк	Востдрер
31	<i>Omalotheca supina</i> (L.) DC.						+	+		Нк	Голаркт
32	<i>Cladochaeta candidissima</i> (Bieb.) DC.				+	+				Нк	Эукавк
33	<i>Inula helenium</i> L.				+	+				Нк	Палеаркт
34	<i>Inula thapsoides</i> (Willd.) Spreng.						+			Нк	Армено-Иран
35	<i>Inula conyza</i> DC.				+	+				Нк	Понт
36	<i>Inula orientalis</i> Lam.							+	+	Нк	Общекавк
37	<i>Inula ensifolia</i> L.			+	+	+				Нк	Евро-Кавк
38	<i>Inula aspera</i> Poir.			+	+	+				Нк	Понт-Южносиб
39	<i>Inula germanica</i> L.			+	+					Нк	Евро-Кавк
40	<i>Inula caspica</i> Blum	+	+							Нк	Туран
41	<i>Inula oculus-christi</i> L.			+	+					Нк	Понт-Южносиб
42	<i>Inula britannica</i> L.			+	+	+				Нк	Палеаркт
43	<i>Pulicaria dysenterica</i> (L.) Bernh.	+	+			+				Нк	Общедр
44	<i>Pulicaria vulgaris</i> Gaertn.	+	+			+				Тр	Евро-Кавк
45	<i>Carpesium cernuum</i> L.						+			Нк	Общедр
46	<i>Telekia speciosa</i> (Schreb.) Baumg.						+			Нк	Евро-Кавк
47	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.					+	+			Тр	Адвент
48	<i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz et Pav.			+		+				Тр	Адвент
49	<i>Sigesbeckia orientalis</i> L.					+	+			Тр	Адвент
50	<i>Ambrosia artemisiaefolia</i> L.			+		+				Тр	Адвент
51	<i>Ambrosia trifida</i> L.			+						Тр	Адвент
52	<i>Cyclachaena xanthiifolia</i> (Nutt.) Fresen.	+	+							Тр	Адвент
53	<i>Xanthium californicum</i> Greene	+	+							Тр	Адвент
54	<i>Xanthium strumarium</i> L.			+	+	+	+			Тр	Адвент
55	<i>Xanthium spinosum</i> L.			+	+					Тр	Адвент
56	<i>Bidens tripartita</i> L.			+	+	+				Тр	Плюрирег
57	<i>Anthemis altissima</i> L.	+	+							Тр	Средизем
58	<i>Anthemis tinctoria</i> L.			+	+	+				Нк	Евро-Кавк

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
59	<i>Anthemis sosnovskyana</i> Fed.					+	+	Нк	Общекавк
60	<i>Anthemis ruthenica</i> Bieb.	+	+					Нк	Понт
61	<i>Anthemis marschalliana</i> Willd.			+		+	+	Нк	Оукавк
62	<i>Anthemis iberica</i> Bieb.						+	Нк	Оукавк
63	<i>Anthemis melanoloma</i> Trautv.			+	+	+		Нк	Оукавк
64	<i>Anthemis cotula</i> L.		+	+				Тр	Евро-Кавк
65	<i>Anthemis fruticulosa</i> Bieb.			+				Сн	Оукавк
66	<i>Anthemis dumetorum</i> Sosn.			+	+			Нк	Общекавк
67	<i>Anthemis triumphettii</i> (L.) All.					+	+	Нк	Евро-Кавк
68	<i>Achillea leptophylla</i> Bieb.	+	+					Нк	Понт
69	<i>Achillea micrantha</i> Bieb.	+	+					Нк	Понт-Южносиб
70	<i>Achillea filipendulina</i> Lam.			+	+			Нк	Востдрср
71	<i>Achillea biebersteinii</i> Afan.	+						Нк	Востдрср
72	<i>Achillea nobilis</i> L.	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб
73	<i>Achillea millefolium</i> L.	+	+	+	+	+		Нк	Палеаркт
74	<i>Achillea setacea</i> Waldst. et Kit.			+	+	+		Нк	Палеаркт
75	<i>Achillea ptarmicifolia</i> Willd.				+	+		Нк	Оукавк
76	<i>Achillea biserrata</i> Bieb.					+		Нк	Армено-Иран
77	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.					+	+	Нк	Евро-Сиб
78	<i>Matricaria recutita</i> L.			+				Тр	Голаркт
79	<i>Matricaria discoidea</i> DC.		+	+	+			Тр	Панбор
80	<i>Tripleurospermum caucasicum</i> (Willd.) Hayek					+	+	Нк	Общекавк
81	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.			+				Тр	Палеаркт
82	<i>Tripleurospermum parviflorum</i> (Willd.) Pobed.	+	+					Тр	Армено-Иран
83	<i>Tanacetum coccineum</i> (Willd.) Grierson					+	+	Нк	Субкавк
84	<i>Tanacetum achilleifolium</i> (Bieb.) Sch. Bip.	+	+					Нк	Понт-Южносиб
85	<i>Tanacetum corymbosum</i> (L.) Sch. Bip.					+		Нк	Европ
86	<i>Tanacetum tricholobum</i> (Sosn. ex Manden.) Chandjian					+	+	Нк	Восточнокавк
87	<i>Tanacetum millefolium</i> (L.) Tzvel.		+	+				Нк	Понт-Южносиб
88	<i>Tanacetum daghestanicum</i> (Rupr. ex Boiss.) Chandjian					+	+	Нк	Восточнокавк
89	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	+	+	+				Нк	Голаркт
90	<i>Tanacetum silaifolium</i> (Steven ex DC.) Sch. Bip.			+		+	+	Нк	Оукавк
91	<i>Tanacetum parthenifolium</i> (Willd.) Sch. Bip.			+	+			Нк	Общедр
92	<i>Artemisia abrotanum</i> L.	+						Сн	Понт-Южносиб
93	<i>Artemisia arenaria</i> DC.	+						Сн	Понт-Южносиб
94	<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit.			+				Тр	Палеаркт
95	<i>Artemisia annua</i> L.		+		+			Тр	Палеаркт
96	<i>Artemisia daghestanica</i> Krasch. et A.Poretzky			+				Нк	Восточнокавк
97	<i>Artemisia lerceana</i> Web. ex Stechm.	+	+					Сн	Понт-Южносиб
98	<i>Artemisia taurica</i> Willd.	+	+	+				Нк	Понт
99	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	+	+	+	+	+		Нк	Голаркт
100	<i>Artemisia santonicum</i> L.	+	+					Нк	Понт-Южносиб
101	<i>Artemisia chamaemelifolia</i> Vill.	+	+	+				Сн	Субкавк
102	<i>Artemisia austriaca</i> Jacq.	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб
103	<i>Artemisia campestris</i> L.			+				Нк	Голаркт
104	<i>Artemisia marschalliana</i> Spreng.			+				Нк	Палеаркт
105	<i>Artemisia absinthium</i> L.		+	+	+	+		Нк	Понт-Южносиб
106	<i>Artemisia caucasica</i> Willd.					+	+	Сн	Субкавк
107	<i>Artemisia splendens</i> Willd.						+	Нк	Общекавк
108	<i>Tussilago farfara</i> L.			+	+			Кр	Палеаркт
109	<i>Petasites hybridus</i> (L.) Gaertn., Mey. et Schreb.				+			Кр	Европ
110	<i>Petasites albus</i> (L.) Gaertn.			+	+			Кр	Евро-Кавк
111	<i>Doronicum macrophyllum</i> Fisch. ex Hornem.				+	+		Нк	Общекавк

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
112	<i>Doronicum oblongifolium</i> DC.					+		Нк	Палеаркт
113	<i>Senecio propinquus</i> Schischk.			+	+			Нк	Эукавк
114	<i>Senecio kolenatianus</i> C.A. Mey.						+	Нк	Общекавк
115	<i>Senecio viscosus</i> L.			+				Тр	Палеаркт
116	<i>Senecio vulgaris</i> L.		+	+	+			Тр	Палеаркт
117	<i>Senecio sosnovskyi</i> Sof.						+	Тр	Общекавк
118	<i>Senecio taraxacifolius</i> (Bieb.) DC.						+	Нк	Общекавк
119	<i>Senecio vernalis</i> Waldst. et Kit.	+	+	+				Тр	Палеаркт
120	<i>Senecio noeanus</i> Rupr.	+	+					Тр	Ирано-Туран
121	<i>Senecio jacobaea</i> L.					+		Нк	Палеаркт
122	<i>Senecio schischkinianus</i> Sof.	+						Нк	Предкавк
123	<i>Senecio erucifolius</i> L.	+	+					Нк	Палеаркт
124	<i>Senecio macrophyllus</i> Bieb.					+		Нк	Предкавк
125	<i>Caucasalia macrophylla</i> (Bieb.) B.Nord.					+	+	Нк	Общекавк
126	<i>Tephroseris cladobotrys</i> (Ledeb.) Griseb.					+		Нк	Эукавк
127	<i>Tephroseris caucasigena</i> (Schischk.) Czerep.						+	Нк	Эукавк
128	<i>Tephroseris karjaginii</i> (Sof.) Holub						+	Нк	Эукавк
129	<i>Tephroseris subfloccosa</i> (Schischk.) Czer.					+	+	Нк	Общекавк
130	<i>Dolichorrhiza renifolia</i> (C.A. Mey.) Galushko			+	+	+		Нк	Эукавк
131	<i>Dolichorrhiza caucasica</i> (Bieb.) Galushko						+	Нк	Общекавк
132	<i>Ligularia subsagittata</i> Pojark.					+	+	Нк	Общекавк
133	<i>Echinops sphaerocephalus</i> L.	+	+	+				Нк	Палеаркт
134	<i>Xeranthemum squarrosum</i> Boiss.		+					Тр	Субтуран
135	<i>Xeranthemum annuum</i> L.	+	+					Тр	Субпонт
136	<i>Xeranthemum cylindraceum</i> Sibth. et Smith		+					Тр	Задрер
137	<i>Carlina vulgaris</i> L.			+	+	+	+	Нк	Евро-Кавк
138	<i>Arctium lappa</i> L.		+		+			Нк	Палеаркт
139	<i>Arctium nemorosum</i> Lej.				+			Нк	Европ
140	<i>Arctium palladinii</i> (Marc.) Grossh.					+		Нк	Эукавк
141	<i>Jurinea filicifolia</i> Boiss.						+	Нк	Эукавк
142	<i>Jurinea arachnoidea</i> Bunge	+	+					Нк	Понт
143	<i>Jurinea annae</i> Sosn.			+				Нк	Эукавк
144	<i>Jurinea ciscaucasica</i> (Sosn.) Ilin	+						Нк	Предкавк
145	<i>Jurinea multiflora</i> (L.) B. Fedtsch.	+						Нк	Понт-Южносиб
146	<i>Jurinea marjanae</i> Taisumov et Astamirova			+		+		Нк	Эукавк
147	<i>Jurinea polyclonos</i> (L.) DC.	+						Нк	Понт
148	<i>Jurinella subacaulis</i> (Fisch. Et C.A. Mey.) Iljin						+	Нк	Субкавк
149	<i>Jurinella moschus</i> (Habl.) Bobr.						+	Нк	Общекавк
150	<i>Carduus nutans</i> L.	+	+	+	+	+		Нк	Палеаркт
151	<i>Carduus hamulosus</i> Ehrh.	+	+	+				Нк	Понт
152	<i>Carduus acanthocephalus</i> C.A. Mey.				+	+		Нк	Восточнокавк
153	<i>Carduus crispus</i> L.		+	+	+	+		Нк	Палеаркт
154	<i>Carduus acanthoides</i> L.		+	+				Нк	Палеаркт
155	<i>Carduus seminudus</i> Bieb.	+	+					Нк	Общекавк
156	<i>Carduus uncinatus</i> Bieb.	+	+					Нк	Субпонт
157	<i>Carduus arabicus</i> Jacq.		+					Тр	Востдрер
158	<i>Carduus adpressus</i> C.A. Mey.				+	+		Нк	Общекавк
159	<i>Carduus cinereus</i> Bieb.		+					Тр	Ирано-Туран
160	<i>Cirsium rhizocephalum</i> C.A. Mey.				+	+		Нк	Общекавк
161	<i>Cirsium obvallatum</i> (Bieb.) Fisch.					+		Нк	Субкавк
162	<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.		+	+	+	+		Нк	Палеаркт
163	<i>Cirsium elodes</i> Bieb.		+					Нк	Субкавк
164	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.			+	+			Нк	Палеаркт

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
165	<i>Cirsium ciliatum</i> (Murr.) Moench				+			Нк	Общекавк
166	<i>Cirsium canum</i> (L.) All.				+			Нк	Евро-Сиб
167	<i>Cirsium incanum</i> (S.G. Gmel.) Fisch.		+	+				Нк	Евро-Сиб
168	<i>Cirsium depilatum</i> Boiss. et Bal.				+	+		Нк	Общекавк
169	<i>Cirsium simplex</i> C.A. Mey.				+	+		Нк	Общекавк
170	<i>Cirsium arachnoideum</i> (Bieb.) Bess.				+	+		Нк	Эукавк
171	<i>Cirsium osseticum</i> (Adams) Petrak				+	+		Нк	Общекавк
172	<i>Cirsium tomentosum</i> C.A. Mey.						+	Нк	Субкавк
173	<i>Cirsium pugnax</i> Somm. et Levier			+	+	+	+	Нк	Эукавк
174	<i>Cirsium sinuatum</i> (Trautv.) Boiss.			+		+		Нк	Эукавк
175	<i>Cirsium balkharicum</i> Charadze					+		Нк	Эукавк
176	<i>Cirsium echinus</i> (Bieb.) Hand.-Mazz.			+		+		Нк	Общекавк
177	<i>Picnomon acarna</i> (L.) Cass.		+		+			Нк	Общедр
178	<i>Onopordum acanthium</i> L.	+	+	+	+			Нк	Палеаркт
179	<i>Silybum marianum</i> (L.) Gaertn.		+		+			Нк	Палеаркт
180	<i>Crupina vulgaris</i> Cass.		+		+			Тг	Общедр
181	<i>Serratula erucifolia</i> (L.) Boriss.	+	+					Нк	Понт
182	<i>Serratula quinquefolia</i> Bieb. ex Willd.				+			Нк	Общекавк
183	<i>Serratula radiata</i> (Waldst. et Kit.) Bieb.			+		+		Нк	Понт-Южносиб
184	<i>Rhaponticum pulchrum</i> Fisch. et C.A. Mey.			+				Нк	Армено-Иран
185	<i>Acroptilon repens</i> (L.) DC.	+	+	+				Нк	Палеаркт
186	<i>Aetheopappus caucasicus</i> Sosn.					+	+	Нк	Общекавк
187	<i>Psephellus absinthifolius</i> Galushko		+	+				Нк	Даг
188	<i>Psephellus salviifolius</i> Boiss.			+	+	+		Нк	Эукавк
189	<i>Psephellus dealbatus</i> (Willd.) Boiss.		+	+	+	+		Нк	Общекавк
190	<i>Psephellus andinus</i> Galushko et Alieva					+	+	Нк	Даг
191	<i>Psephellus prokhanovii</i> Galushko			+				Нк	Эукавк
192	<i>Centaurea solstitialis</i> L.	+	+					Нк	Понт
193	<i>Centaurea orientalis</i> L.		+	+				Нк	Понт
194	<i>Centaurea diffusa</i> Lam.		+					Нк	Понт
195	<i>Centaurea squarrosa</i> Willd.		+	+				Нк	Востдрср
196	<i>Centaurea adpressa</i> Ledeb.		+	+				Нк	Понт-Южносиб
197	<i>Centaurea apiculata</i> Ledeb.	+	+	+				Нк	Понт-Южносиб
198	<i>Centaurea depressa</i> Bieb.		+	+				Нк	Востдрср
199	<i>Centaurea cheiranthifolia</i> Willd.					+	+	Нк	Субкавк
200	<i>Centaurea arenaria</i> Bieb. ex Willd.	+						Нк	Понт
201	<i>Centaurea ovina</i> Pall. ex Willd.	+	+					Нк	Эукавк
202	<i>Centaurea willdenowii</i> Czer.					+	+	Нк	Общекавк
203	<i>Centaurea iberica</i> Trev. ex Spreng.		+		+			Нк	Ирано-Туран
204	<i>Centaurea cyanus</i> L.			+	+	+		Тг	Голаркт
205	<i>Centaurea abbreviata</i> (C.Koch.) Hand.-Mazz.				+	+		Нк	Общекавк
206	<i>Centaurea salicifolia</i> Bieb.				+	+		Нк	Субкавк
207	<i>Centaurea pseudotanaitica</i> Galushko		+					Нк	Предкавк
208	<i>Rhaponticoides ruthenica</i> (Lam.) M.V. Agab. et Greuter.		+		+			Нк	Понт-Южносиб
209	<i>Cnicus benedictus</i> L.		+					Тг	Общедр
210	<i>Carthamus lanatus</i> L.		+					Тг	Общедр
211	<i>Cichorium intybus</i> L.		+	+				Нк	Палеаркт
212	<i>Lapsana communis</i> L.				+			Тг	Евро-Сиб
213	<i>Lapsana grandiflora</i> Bieb.				+	+		Нк	Субкавк
214	<i>Lapsana intermedia</i> Bieb.				+			Тг	Евро-Кавк
215	<i>Hypochoeris radicata</i> L.				+			Нк	Европ
216	<i>Trommsdorffia maculata</i> (L.) Bernh.				+	+		Нк	Евро-Сиб
217	<i>Leontodon asperrimus</i> (Willd.) Ball			+				Нк	Армено-Иран

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
218	<i>Leontodon hispidus</i> L.		+	+	+	+	+	Нк	Евро-Кавк	
219	<i>Leontodon caucasicus</i> (Bieb.) Fisch.						+	Нк	Эукавк	
220	<i>Leontodon danubialis</i> Jacq.		+					Нк	Евро-Кавк	
221	<i>Picris hieracioides</i> L.		+	+				Нк	Палеаркт	
222	<i>Picris pauciflora</i> Willd.			+				Тр	Средизем	
223	<i>Picris strigosa</i> Bieb.		+					Нк	Армено-Иран	
224	<i>Picris canescens</i> V. Vassil.	+	+		+			Нк	Общекавк	
225	<i>Garhadiolus papposus</i> Boiss. et Buhse		+					Тр	Армено-Иран	
226	<i>Podospermum meyeri</i> C.Koch						+	Нк	Востдрер	
227	<i>Podospermum canum</i> C.A. Mey.		+	+				Нк	Средизем	
228	<i>Podospermum laciniatum</i> (L.) DC.		+					Нк	Средизем	
229	<i>Scorzonera mollis</i> Bieb.	+	+	+				Нк	Субпонт	
230	<i>Scorzonera parviflora</i> Jacq.	+						Нк	Палеаркт	
231	<i>Scorzonera stricta</i> Hornem.		+		+			Нк	Понт-Южносиб	
232	<i>Scorzonera filifolia</i> Boiss.			+				Нк	Эукавк	
233	<i>Scorzonera biebersteinii</i> Lipsch.	+	+	+				Нк	Общекавк	
234	<i>Scorzonera taurica</i> Bieb.		+					Нк	Понт-Южносиб	
235	<i>Tragopogon tuberosus</i> C.Koch.	+	+					Нк	Общекавк	
236	<i>Tragopogon filifolius</i> Rehm. ex Boiss.			+	+	+		Нк	Эукавк	
237	<i>Tragopogon dubius</i> Scop.	+	+					Нк	Палеаркт	
238	<i>Tragopogon dasyrhynchus</i> Artemczuk	+						Нк	Понт	
239	<i>Tragopogon brevirostris</i> DC.		+	+				Нк	Эукавк	
240	<i>Tragopogon graminifolius</i> DC.		+		+			Нк	Востдрер	
241	<i>Tragopogon reticulatus</i> Boiss. et Huet						+	+	Нк	Армено-Иран
242	<i>Sonchus arvensis</i> L.		+	+	+			Нк	Плюрирег	
243	<i>Sonchus palustris</i> L.	+	+					Нк	Палеаркт	
244	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill			+				Тр	Голаркт	
245	<i>Sonchus oleraceus</i> L.			+	+	+		Тр	Плюрирег	
246	<i>Reichardia dichotoma</i> (Fisch. et C.A.Mey. ex DC.) Freyn			+				Нк	Армено-Иран	
247	<i>Prenanthes purpurea</i> L.				+			Нк	Евро-Кавк	
248	<i>Lactuca tatarica</i> (L.) C.A. Mey.			+	+	+		Нк	Палеаркт	
249	<i>Lactuca saligna</i> L.	+	+					Нк	Общедр	
250	<i>Lactuca serriola</i> L.			+				Тр	Палеаркт	
251	<i>Scariola viminea</i> (L.) F.W.Schmidt			+				Нк	Запдрер	
252	<i>Mycelis muralis</i> (L.) Dumort.			+	+			Нк	Евро-Кавк	
253	<i>Cicerbita prenanthoides</i> (Bieb.) Beauverd				+	+		Нк	Общекавк	
254	<i>Cicerbita racemosa</i> (Willd.) Beauverd				+	+	+	Нк	Субкавк	
255	<i>Cicerbita macrophylla</i> (Willd.) Wallr.				+	+		Нк	Евро-Сиб	
256	<i>Taraxacum stevenii</i> DC.						+	Нк	Армено-Иран	
257	<i>Taraxacum erythrospermum</i> Andr. ex Bess.			+		+		Нк	Евро-Сиб	
258	<i>Taraxacum porphyranthum</i> Boiss.					+	+	Нк	Общекавк	
259	<i>Taraxacum confusum</i> Schischk.				+	+	+	Нк	Общекавк	
260	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.		+	+	+	+		Нк	Палеаркт	
261	<i>Taraxacum tenuisectum</i> Somm. et Levier						+	Нк	Эукавк	
262	<i>Chondrilla juncea</i> L.	+						Нк	Субсредизем	
263	<i>Chondrilla latifolia</i> Bieb.	+						Нк	Субпонт	
264	<i>Crepis pulchra</i> L.			+	+			Тр	Запдрер	
265	<i>Crepis pannonica</i> (Jacq.) C. Koch			+				Нк	Понт-Южносиб	
266	<i>Crepis caucasica</i> C.A. Mey.				+	+		Нк	Эукавк	
267	<i>Crepis marschallii</i> (C.A. Mey.) F. Schultz		+					Нк	Субкавк	
268	<i>Crepis sonchifolia</i> (Bieb.) C.A. Mey.			+				Нк	Общекавк	
269	<i>Crepis rhoeadifolia</i> Bieb.			+		+		Нк	Субпонт	
270	<i>Lagoseris sancta</i> (L.) K. Maly	+	+	+	+			Тр	Общедр	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
271	<i>Hieracium litwinowianum</i> Zahn			+				Нк	Общекавк
272	<i>Hieracium virosum</i> Pall.		+					Нк	Палеаркт
273	<i>Hieracium robustum</i> Fries		+					Нк	Палеаркт
274	<i>Hieracium simplicicaule</i> (Somm. et Levier) Peter				+	+		Нк	Эукавк
275	<i>Hieracium macrolepis</i> Boiss.				+	+		Нк	Субкавк
276	<i>Hieracium hypoglaucum</i> (Litv. et Zahn) Juxip				+	+	+	Нк	Эвксин
277	<i>Hieracium laevigatum</i> Willd.				+			Нк	Палеаркт
278	<i>Hieracium bupleurifolium</i> Tausch				+	+		Нк	Евро-Кавк
279	<i>Hieracium longiscarpum</i> (Boiss. et Korsch) Zahn					+		Нк	Армено-Иран
280	<i>Hieracium pilosella</i> L.			+	+	+		Нк	Евро-Кавк
281	<i>Hieracium longipes</i> (C. Koch ex Naeg et Peter) Juxip				+			Нк	Субкавк
282	<i>Hieracium umbellatum</i> L.			+				Нк	Голаркт
283	<i>Hieracium procerum</i> Fries			+	+	+		Нк	Востдрр
284	<i>Hieracium sosnowskyi</i> (Zahn) Juxip				+			Нк	Эукавк
285	<i>Hieracium echioides</i> Lumn.			+				Нк	Палеаркт
286	<i>Hieracium lasiophorum</i> (Naeg. et Peter) Juxip				+			Нк	Евро-Кавк
287	<i>Hieracium gudergomiense</i> Juxip				+	+		Нк	Эукавк
288	<i>Hieracium longiscapum</i> Boiss. et Kotschy ex Naeg. et Peter					+	+	Нк	Общекавк

Следующую позицию занимают роды, насчитывающие от семи до девяти видов. Это *Erigeron*, *Achillea* и *Tanacetum* (по 9 видов), а также *Jurinea* и *Tragopogon* (по 7). Данная группа является переходной и включает таксоны, широко распространенные в различных типах растительности – от луговых степей до каменистых обнажений. Их видовое разнообразие отражает мозаичность условий в предгорьях и на известняковых субстратах. Далее следуют роды, представленные четырьмя-шестью видами: *Taraxacum*, *Scorzonera*, *Crepis* (по 6), *Psephellus* (5), а также *Picris*, *Tephrosieris*, *Sonchus*, *Leontodon* и *Galatella* (по 4). В этой группе заметна примесь как элементов высокогорных ковров (*Tephrosieris*), так и сорно-рудеральных комплексов (*Sonchus*, *Taraxacum*).

Значительную часть флоры составляют роды с малым числом видов. Двадцать два рода имеют от двух до трех видов, что суммарно составляет около 50 видов (17,36 %). Среди них такие экологически различные таксоны, как *Petasites*, *Solidago*, *Ambrosia*, *Xanthium*, *Bidens* и *Galinsoga*. Эта группа интересна тем, что включает как аборигенные роды, приуроченные к специфическим местообитаниям (например, прибрежные *Petasites*), так и адвентивные виды-неофиты (*Ambrosia*, *Galinsoga*), динамика расселения которых в регионе требует внимания.

Наконец, наиболее многочисленной (39 родов) является группа родов, представленных во флоре одним видом, к которой относятся такие таксоны, как *Tussilago*, *Silybum*, *Echinops*, *Cichorium*, *Leucanthemum*, *Bellis* и многие другие. Несмотря на то, что каждый из них представлен всего одним видом, их совокупная роль в сложении растительного покрова чрезвычайно велика. Именно к этой группе принадлежат виды-пионеры (*Tussilago*), эдификаторы специфических сообществ (*Silybum* на залежах, *Bidens* по берегам водоемов) и важные ресурсные растения (*Cichorium*). Высокий процент одновидовых родов (47 % от общего числа родов) свидетельствует о гетерогенности флоры, ее насыщенности миграционными элементами и видами, находящимися на периферии своих ареалов.

Анализ высотно-поясного распределения восьми наиболее крупных родов семейства *Asteraceae* во флоре Чеченской Республики выявляет отчетливую дифференциацию их экологических стратегий и центров видового разнообразия. Распределение видов по поясам носит неравномерный характер и позволяет разделить роды на группы, тяготеющие к определенным высотным уровням.

Наибольшее видовое богатство исследуемых родов сосредоточено в трех поясах: лесном, субальпийском и семиаридном, которые выступают основными центрами концентрации разнообразия сложноцветных в регионе. При этом отчетливо прослеживается снижение числа видов в экстремальных условиях – как в засушливой полупустыне, так и в суровом альпийском поясе, что свидетельствует о наличии экологических фильтров на обоих концах высотного градиента.

Роды *Hieracium* и *Cirsium* демонстрируют ярко выраженную приуроченность к среднегорьям, достигая пика своего разнообразия в субальпийском поясе (9 и 11 видов соответственно). Значительное число видов этих родов также отмечено в лесном и семиаридном поясах, что указывает на их экологическую пластичность, однако основное видообразование у ястребинки и бодяка связано с условиями высокотравья и лугов верхнего лесного и субальпийского поясов. Противоположную стратегию демонстрирует род *Artemisia*, центр разнообразия которого смещен в нижние аридные пояса: максимальное число видов полыни сосредоточено в семиаридном (9), степном (8) и полупустынном (8) поясах, тогда как в высокогорьях ее присутствие резко сокращается. Это подчеркивает роль полыней как эдификаторов равнинных и предгорных засушливых ландшафтов.

Род *Centaurea* выделяется относительной равномерностью распределения при явном тяготении к степному и лесному поясам (по 10 видов), что отражает широкий экологический диапазон васильков и их способность осваивать как открытые лугово-степные пространства, так и лесные опушки и поляны. Сходную картину демонстрирует *Inula*, виды которой предпочитают семиаридный (7), лесной (8) и степной (6) пояса, избегая высокогорий. *Carduus*, напротив, показывает два пика разнообразия – в степном (8) и лесном (7) поясах, полностью отсутствуя в альпийском, что типично для рудеральных и лугово-степных видов. Роды *Senecio* и *Anthemis* характеризуются относительно равномерным распределением по всем поясам с небольшим увеличением числа видов в семиаридном поясе у пупавки и в альпийском у крестовника, что говорит об их высокой экологической валентности и способности проникать в самые разные местообитания.

Особого внимания заслуживает поведение родов на верхних пределах распространения. В альпийском поясе, несмотря на суровые условия, представлены все крупные роды, кроме *Carduus*, однако число их видов здесь минимально (от 1 до 3). Наибольшего видового разнообразия в альпике достигают роды *Senecio* и *Anthemis* (по 3 вида), что позволяет рассматривать их как наиболее адаптированные к высокогорным условиям. В полупустынном поясе, напротив, лидирует *Artemisia* (8 видов), тогда как *Hieracium* и *Cirsium* здесь полностью отсутствуют, что подчеркивает контрастность экологических условий равнин и среднегорной части профиля.

Очень наглядно отмеченные закономерности высотно-поясного распределения видов крупных родов демонстрирует диаграмма (рис. 1).

Таким образом, пространственное распределение видового разнообразия *Asteraceae* отражает экологическую дифференциацию родов вдоль градиента аридности-гумидности и высотной поясности.

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать ряд выводов о структуре *Asteraceae* флоры Чеченской Республики в соответствии с современной классификацией, предложенной в монографии «Systematics, Evolution, and Biogeography of Compositae» [7]. Прежде всего, обращает на себя внимание явное доминирование подсемейства *Asteroideae*, на долю которого приходится почти половина всего видового разнообразия семейства – 45,84%. Это свидетельствует о том, что облик

Asteraceae в исследуемом регионе определяют наиболее эволюционно продвинутые группы семейства, характерные для Голарктики.

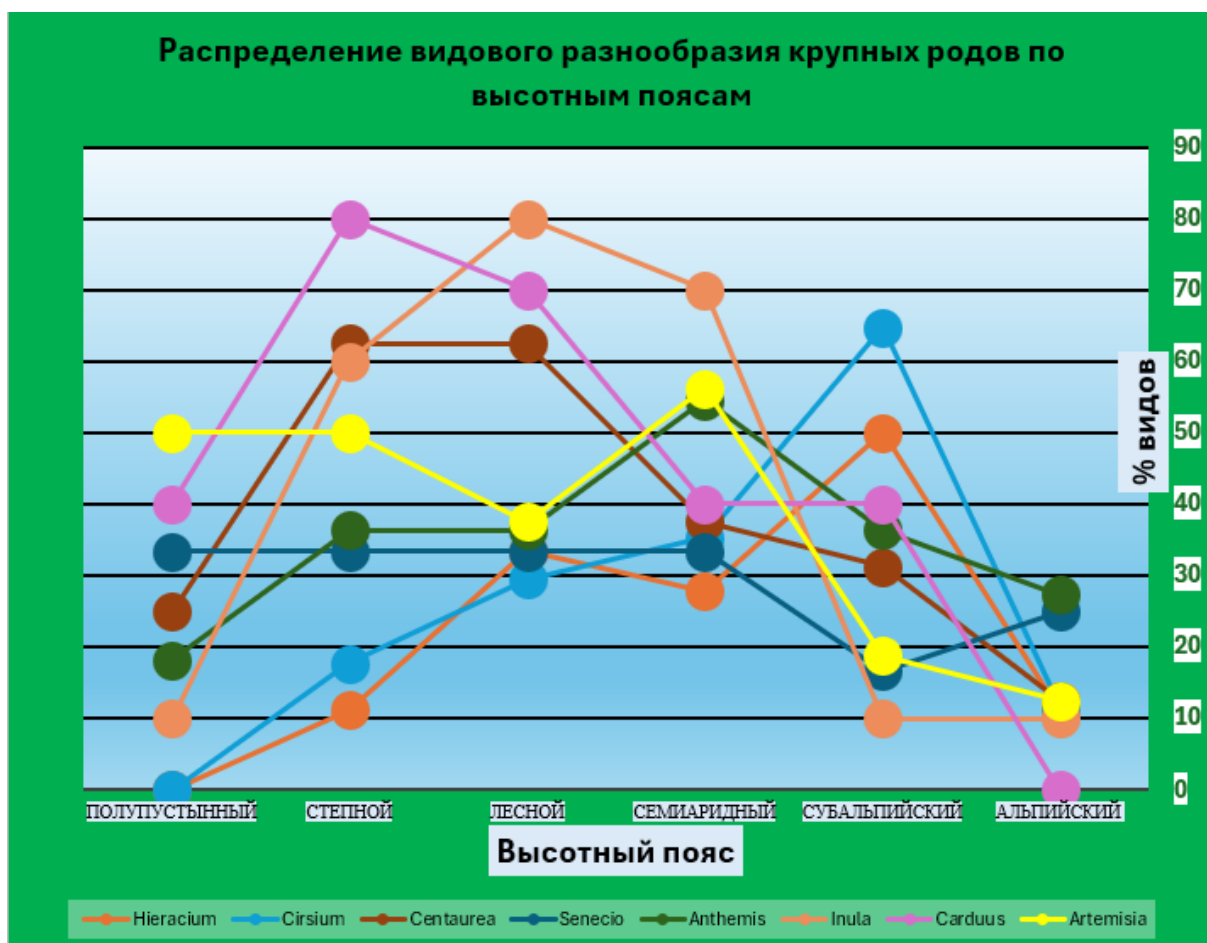


Рис. 1. Распределение видов крупных родов по высотным поясам

Таблица 2

Надродовые таксоны семейства *Asteraceae* представленные во флоре Чеченской Республики

Надродовые таксоны	Кол-во видов	
	абс. ч-ло	%
Подсемейство <i>Cichorioideae</i> (Juss.) Chevall.	78	27,08
<i>Cichorieae</i> Lam. & DC.	78	27,08
Подсемейство <i>Carduoideae</i> Cass. ex Sweet	40	13,89
<i>Cardueae</i> Cass.	40	13,89
Подсемейство <i>Mutisioideae</i> (Cass.) Lindl.	38	13,19
<i>Mutisieae</i> Cass.	38	13,19
Подсемейство <i>Asteroideae</i> (Cass.) Lindl.	132	45,84
«Базальные» трибы <i>Asteroideae</i>	121	42,01
<i>Senecioneae</i> Cass.	25	8,68
<i>Astereae</i> Cass.	22	7,64
<i>Inuleae</i> Cass.	14	4,86
<i>Anthemideae</i> Cass.	51	17,71
<i>Gnaphalieae</i> (Cass.) Lecoq. & Juillet	9	3,12
Комплекс триб «<i>Heliantheae alliance</i>»	11	3,83
<i>Heliantheae</i> Cass.	10	3,47
<i>Eupatorieae</i> Cass.	1	0,36
ИТОГО:	288	100

Внутри самого подсемейства *Asteroideae* наблюдается четкое разделение на две неравные по объему группы. Подавляющее большинство видов (121 из 132, или 91,7 %) относится к так называемым «базальным» трибам, таким как *Anthemideae*, *Senecioneae*, *Astereae*. и другие. Особо выделяется триба *Anthemideae*, которая является самой многочисленной, составляя 17,71 % от общего числа видов. Это типичная черта для флор Древнего Средиземья, где велико значение полыней, тысячелистников и других представителей этой группы. В то же время комплекс триб «*Heliantheae alliance*», широко представленный в тропиках и Новом Свете, играет во флоре республики минимальную роль, насчитывая всего 11 преимущественно заносных видов (3,83 %).

Примечательно, что оставшиеся три подсемейства – *Cichorioideae*, *Carduoideae* и *Mutisioideae*, – хотя и уступают *Asteroideae* по общему числу видов, в сумме составляют более половины видового богатства (54,16 %). Каждое из них представлено в регионе только одной трибой, что указывает на их четкую филогенетическую обособленность. Наиболее крупным среди них является подсемейство *Cichorioideae* (27,08 %), объединяющее виды трибы *Cichorieae*, которые успешно освоили умеренные широты. Значительна также доля подсемейств *Carduoideae* (13,89 %) с трибой *Cardueae*, классическим компонентом евразийских флор, и *Mutisioideae* (13,19 %) с трибой *Mutisieae*, присутствие которой может указывать на древние флористические связи Кавказа.

Рассмотрение ареалогических особенностей видов семейства *Asteraceae* флоры Чеченской Республики позволяет выявить ряд интересных ботанико-географических закономерностей, обусловленных как историческими факторами формирования флоры, так и современной экологической дифференциацией территории. Центральной закономерностью выступает отчетливая приуроченность различных географических элементов к определенным высотным уровням.

Анализ географической структуры (табл. 3) показывает безусловное доминирование бореальных геоэлементов, которые в совокупности составляют 150 видов, или 52,08 % от всей флоры сложноцветных. Внутри этой группы ведущая роль принадлежит кавказскому геоэлементу, объединяющему 80 видов (27,78 %). Данная фракция включает 40 общекавказских (13,89 %), 33 эукавказских (11,46 %), 5 восточнокавказских (1,74 %) и 2 дагестанских вида (0,69 %). Столь высокий уровень кавказского эндемизма подтверждает, что территория Чеченской Республики является частью центра автохтонного видообразования в пределах Кавказского перешейка, а видовые концентрации в семиаридном поясе и выше (роды *Anthemis*, *Jurinea*, *Cirsium*, *Campanula* и др.) служат непосредственным доказательством активных микроэволюционных процессов в высокогорьях.

Таблица 3

Спектр геотипов³ и геоэлементов семейства *Asteraceae* Чеченской Республики

Геотипы и геоэлементы	к-во видов	%
<i>I</i>	2	3
Плюрирегиональные	3	1,04
Плюрирегиональный	3	1,04
Общеголарктические	53	18,40
Голарктический	12	4,17
Палеарктический	41	14,24
Бореальные	150	52,08
Панбореальный	2	0,69

³ Геотипы выделены жирным шрифтом

Окончание табл. 3

<i>1</i>	2	3
Евро-сибирский	8	2,78
Евро-кавказский	17	5,90
Европейский	4	1,39
Кавказский	80	27,78
<i>Общекавказский</i>	40	13,89
<i>Эукавказский</i>	33	11,46
<i>Восточнокавказский</i>	5	1,74
<i>Дагестанский</i>	2	0,69
Эвксинский	1	0,35
Понтическо-южносибирский	23	7,99
Понтический	15	5,21
Древнесредиземноморские	49	17,01
Общедревнесредиземноморский	10	3,47
Западнодревнесредиземноморский	6	2,08
Средиземноморский	4	1,39
Восточнодревнесредиземноморский	9	3,13
Ирано-туранский	3	1,04
Армено-иранский	12	4,17
Туранский	1	0,35
Предкавказский	4	1,39
Связующие	22	7,64
Субсредиземноморский	1	0,35
Субкавказский	15	5,21
Субпонтический	5	1,74
Субтуранский	1	0,35
Адвентивные	11	3,82
Адвентивный	11	3,82
Итого:	288	100

Понтическо-южносибирские и понтические виды, насчитывающие 23 (7,99 %) и 15 (5,21%) видов соответственно, формируют связующее звено между бореальным и древнесредиземноморским комплексами, тяготея преимущественно к степному и семиаридному поясам. Их присутствие отражает исторические миграции вдоль северного обрамления Кавказа и внедрение равнинных элементов в предгорные ландшафты.

Древнесредиземноморские геоэлементы составляют 49 видов (17,01 %). Наибольший вклад в эту группу вносят армено-иранские (12 видов, 4,17 %), общедревнесредиземноморские (10 видов, 3,47 %) и восточнодревнесредиземноморские виды (9 видов, 3,13 %). Концентрация этих видов в полупустынном, степном и семиаридном поясах, где доминируют роды *Artemisia* и *Centaurea*, указывает на устойчивые флорогенетические связи с аридными центрами Передней Азии и Восточного Средиземноморья. Сравнительно невысокая доля собственно средиземноморских видов (4 вида, 1,39 %) свидетельствует об опосредованном влиянии Средиземноморья через восточные миграционные пути.

Голарктическая группа, включающая палеарктические (41 вид, 14,24 %) и голарктические (12 видов, 4,17 %) элементы, занимает 18,41 % флоры. Эти виды, такие как *Tussilago farfara*, *Artemisia vulgaris*, *Cirsium vulgare*, обладают широкой экологической амплитудой, а их максимальное разнообразие приурочено к нарушенным местообитаниям и антропогенным ландшафтам. Сходную экологию демонстрируют плюрирегиональные виды (1,04 %), представленные космополитными сорняками.

Адвентивная фракция насчитывает 11 видов (3,82 %), среди которых преобладают североамериканские неофиты (*Ambrosia artemisiifolia*, *Ambrosia trifida*, *Cyrlachaena xanthiifolia*, виды *Xanthium* и *Galinsoga*). Их распространение ограничено преимущественно степным и лесостепным поясами, что свидетельствует о начальных этапах натурализации и требует дальнейшего мониторинга.

Сравнительный анализ связующих геоэлементов (субкавказский – 15 видов, 5,21 %; субпонтический – 5 видов, 1,74 %) показывает их промежуточное положение между основными хорологическими группами и подчеркивает гетерогенность флоры, формировавшейся в зоне контакта различных флористических влияний.

Несомненный интерес в ботанико-географическом аспекте представляют особенности распространения многопоясных видов, т.е. случаи, когда высотный диапазон распространения одного вида может перекрывать больше половины высотной поясной колонки (табл. 4).

Таблица 4

Многопоясные виды семейства *Asteraceae* во флоре Чеченской Республики

№ пп	Название вида	Геоэлемент	Полупустынный	Степной	Семиаридный	Лесной	Субальпийский	Альпийский
1.	<i>Artemisia vulgaris</i>	Голарктический	+	+	+	+	+	
2.	<i>Leontodon hispidus</i>	Евро-кавказский		+	+	+	+	+
3.	<i>Achillea millefolium</i>	Палеарктический	+	+	+	+	+	
4.	<i>Carduus nutans</i>	Палеарктический	+	+	+	+	+	
5.	<i>Xanthium strumarium</i>	Адвентивный		+	+	+	+	
6.	<i>Erigeron acris</i>	Голарктический	+	+	+	+		
7.	<i>Lagoseris sancta</i>	Общедревнесредиземноморский	+	+	+	+		
8.	<i>Psephellus dealbatus</i>	Общекавказский		+	+	+	+	
9.	<i>Carduus crispus</i>	Палеарктический		+	+	+	+	
10.	<i>Cirsium vulgare</i>	Палеарктический		+	+	+	+	
11.	<i>Onopordum acanthium</i>	Палеарктический	+	+	+	+		
12.	<i>Taraxacum officinale</i>	Палеарктический		+	+	+	+	
13.	<i>Artemisia absinthium</i>	Понтическо-южносибирский		+	+	+	+	
14.	<i>Kemulariella rosea</i>	Восточнокавказский			+	+	+	+
15.	<i>Carlina vulgaris</i>	Евро-кавказский			+	+	+	+
16.	<i>Erigeron orientalis</i>	Субкавказский			+	+	+	+
17.	<i>Cirsium pugnax</i>	Эукавказский			+	+	+	+

Анализ распространения многопоясных видов семейства *Asteraceae* во флоре Чеченской Республики, то есть видов, высотный диапазон которых охватывает четыре и более пояса, позволяет выявить отчетливые закономерности, касающиеся их хорологической принадлежности, экологической пластичности и стратегий освоения горных территорий.

Первую, наиболее показательную группу составляют четыре вида, чей высотный диапазон охватывает пять поясов: *Artemisia vulgaris*, *Leontodon hispidus*, *Achillea millefolium* и *Carduus nutans*. Обращает на себя внимание, что все они отсутствуют лишь в одном из крайних поясов: *Artemisia vulgaris*, *Achillea millefolium* и *Carduus nutans* не поднимаются в альпийский пояс, тогда как *Leontodon hispidus*, напротив, не встречается в полупустынном поясе. По географической принадлежности эти виды

относятся к голарктическому (*Artemisia vulgaris*), евро-кавказскому (*Leontodon hispidus*) и палеарктическому (*Achillea millefolium*, *Carduus nutans*) элементам, то есть обладают обширными ареалами, выходящими далеко за пределы Кавказа. Все они являются гемикриптофитами, что обеспечивает им успешную перезимовку в различных климатических условиях. Данная группа демонстрирует максимальную для региона экологическую валентность, осваивая спектр местообитаний от сухих степей и семиаридных предгорий до лесного и субальпийского поясов, и лишь жесткие климатические ограничения высокогорий или крайне аридных равнин служат для них естественным барьером.

Вторую группу образуют 13 видов, распространенных в четырех высотных поясах. Эта группа отличается значительной гетерогенностью в хронологическом отношении. Здесь представлены: палеарктические виды (*Carduus crispus*, *Cirsium vulgare*, *Onopordum acanthium*, *Taraxacum officinale*), голарктические (*Erigeron acris*), общедревнесредиземноморский (*Lagoseris sancta*), понтико-южносибирский (*Artemisia absinthium*), общекавказский (*Psephellus dealbatus*), восточнокавказский (*Kemulariella rosea*), евро-кавказские (*Carlina vulgaris*), субкавказский (*Erigeron orientalis*), эукавказский (*Cirsium pugnax*), адвентивный (*Xanthium strumarium*).

При внимательном рассмотрении выявляются две различные стратегии внутри этой группы. Первая подгруппа тяготеет к средним и нижним поясам, отсутствуя в альпийском, а иногда и в субальпийском поясе. Это преимущественно палеарктические, голарктические и древнесредиземноморские элементы, связанные с нарушенными местообитаниями, залежами, пастбищами и антропогенными ландшафтами. Их присутствие в четырех поясах обеспечивается не столько адаптацией к естественным высотным градиентам, сколько проникновением вдоль дорог и поселений. Вторая подгруппа (*Kemulariella rosea*, *Carlina vulgaris*, *Erigeron orientalis*, *Cirsium pugnax*) представляет собой кавказские эндемичные элементы, которые, напротив, тяготеют к верхним поясам (семиаридный – альпийский), отсутствуя в полупустынном и степном. Эти виды демонстрируют приспособленность к условиям средне- и высокогорий и не спускаются на равнины, что подчеркивает их более узкую экологическую специализацию по сравнению с широкоареальными видами первой группы.

Сравнивая две выделенные группы, можно заключить, что способность вида осваивать максимальное число высотных поясов (5) коррелирует с его принадлежностью к числу широкоареальных палеарктических, голарктических и евро-кавказских гемикриптофитов, не имеющих жесткой привязки к специфическим условиям. При сокращении числа поясов до четырех в составе группы появляются две разнонаправленные стратегии: с одной стороны, это также широкоареальные виды, не доходящие до высокогорий, с другой – кавказские эндемы, сконцентрированные в верхних поясах и не спускающиеся на равнины. Особого внимания заслуживает присутствие в четырехпоясной группе адвентивного вида *Xanthium strumarium*, что свидетельствует о процессах активного освоения чужеродными растениями горных территорий и требует дальнейшего мониторинга.

С большой численностью данного семейства коррелируют отличная способность к рассеиванию семян, взрывообразно быстрая эволюция, множество случаев параллельной эволюции внутри семейства и способность колонизировать и адаптироваться к широкому спектру экологических местообитаний по типу сорных растений [22].

Представители семейства *Asteraceae* играют ключевую роль в сложении некоторых растительных сообществ Чеченской Республики, выступая в качестве

эдификаторов, доминантов и пионеров восстановительных сукцессий в различных природно-климатических условиях.

Основополагающее значение в формировании естественной растительности региона имеют виды рода *Artemisia*. Выступая в роли мощных эдификаторов, они участвуют в создании обширных полынных, полынно-солянковых и полупустынно-степных сообществ в равнинной части республики. Полыни не просто доминируют в травостое, но и определяют специфическую среду геоботанических выделов, влияя на аллелопатический режим и структурную организацию фитоценозов в засушливых условиях равнин и предгорий.

В условиях нарушенных местообитаний сложноцветные берут на себя функции первопроходцев. Виды *Tussilago*, *Cirsium*, *Carduus* и *Erigeron* первыми захватывают обнажения, гари и залежи. Они формируют пионерные сообщества, запуская механизмы восстановительных сукцессий на лишенных растительности субстратах. Ярким примером краткосрочного, но взрывного доминирования на залежах является *Silybum marianum*. Этот нитрофильный рудеральный вид формирует почти чистые заросли на богатых азотом почвах бывших пашен в первые 2–4 года, но утрачивает позиции из-за накопления войлока и собственной биологии монокарпика, уступая место корневищным злакам или другим крупнотравным сложноцветным.

В специфических условиях стабильного проточного переувлажнения выдающуюся роль играют виды белокопытника. *Petasites hybridus* доминирует на открытых, хорошо прогреваемых сырых луговинах и прирусловых валах, формируя чистые, труднопроходимые массивы. В свою очередь, *Petasites albus* образует прибрежные полосы и подпологовые заросли в тенистых ущельях и у холодных родников, часто в комплексе с ольхой или ивой. Оба вида приурочены к богатым азотом аллювиальным субстратам и определяют облик растительности в местообитаниях припойменных участков и вокруг родников.

Заключение. В целом, таксономический спектр *Asteraceae* Чеченской Республики типичен для флор Кавказского перешейка: при доминировании небольшого числа крупных родов, определяющих облик зональной растительности, исключительное разнообразие придают роды с малым числом видов, отражающие как богатство экологических ниш, так и сложную историю формирования флоры под влиянием миграций, видообразования и антропогенной трансформации ландшафтов.

Распределение видового богатства крупных родов *Asteraceae* по высотным поясам Чеченской Республики подчиняется четкой закономерности: субальпийский и лесной пояса служат центрами разнообразия мезофильных родов (*Hieracium*, *Cirsium*), семиаридный и степной – ксерофильных и гемиксерофильных родов (*Artemisia*, частично *Centaurea*, *Carduus*), а роды с широкой экологической амплитудой (*Senecio*, *Anthemis*) равномерно распределены по всему профилю, демонстрируя максимумы в разных поясах. Это отражает сложную историю формирования флоры региона, где переплелись миграционные потоки из Средиземноморья, Передней Азии и Бореальной области, а также процессы автохтонного видообразования в условиях высотной поясности Кавказа.

Таксономическая структура *Asteraceae* флоры Чеченской Республики характеризуется как типичная для умеренных и древнесредиземноморских областей. Ее основу составляет подсемейство *Asteroideae* при ведущей роли трибы *Anthemideae*, тогда как тропические линии (*Heliantheae* alliance) представлены крайне ограниченно. Существенный вклад подсемейств *Cichorioideae*, *Carduoideae* и *Mutisioideae*, каждое из которых входит в число крупнейших таксонов, дополняет картину, подчеркивая как современное разнообразие, так и исторические корни флоры региона.

Хорологический спектр *Asteraceae* Чеченской Республики характеризуется абсолютным преобладанием бореальных, прежде всего кавказских, элементов при существенной роли древнесредиземноморских видов в нижних поясах и относительно невысокой долей адвентивных растений. Это соотношение отражает исторически сложившуюся структуру флоры, где на фоне местного видообразования в среднегорьях сохраняются реликтовые связи с аридными центрами и прослеживается современное внедрение чужеродных видов.

Анализ многопоясных видов *Asteraceae* показывает, что высотный диапазон вида определяется, прежде всего, его хорологической принадлежностью и связанной с ней экологической пластичностью. Наибольшей "проницаемостью" высотных барьеров обладают плюрирегиональные, палеарктические и голарктические виды, тогда как кавказские эндемы, даже будучи широко распространенными в пределах региона, сохраняют более четкую приуроченность к определенным поясам, преимущественно средне- и высокогорным.

Сложноцветные Чеченской Республики демонстрируют все многообразие экологических стратегий семейства – от стабильных полынных формаций до динамичных пионерных группировок и специализированных прибрежно-водных сообществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. Л., Сигида С. И., Мишвелов Е. Г., Белоусов А. И. Географический анализ флоры Российского Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 38-53. – DOI: 10.31161/1995-0675-2023-17-4-38-53. – EDN: TBXPTW
2. Royen, A. Florae leydenensis prodromus, exhibens plantas quae in horto academico lugduno-batavo aluntur. Lugduni batavorum, 1740. – 538 pp.
3. Berchtold, F., Presl, J.S. O Pŕirozenosti rostlin aneb Rostlinář, obsahujcĕj hednánĕj o ŕiwoybyťj rostlin pro sebe a z ohledu giných ŕiwoků, podlé stawu nynĕgss ylo znanĕj, pýtĕwu rostlin; názwoslowĕj audů; hospodárstĕwj gegich; rozssĕřenĕj po semi a spůsow rostlinář ŕĕjĕditi a zacowati. Oddĕlení 1. K. W. Enders, Praha, 1820. – 300 pp.
4. Dumortier, B.C.J. Commentationes botanicae. Observations botaniques, dédiées à la Société d'Horticulture de Tournay. – Tournay: Imprimerie de Ch. Casterman-Dieu, 1822. – 116 pp.
5. Официальный сайт Международной ассоциации по таксономии растений (International Association for Plant Taxonomy, IAPT) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iaptglobal.org/> (дата обращения: 27.01.2026).
6. Giseke, P.D. Praelectiones in Ordines Naturales Plantarum. – Hamburgi: Apud Benj. Gottl. Hoffmanni, 1792. – 758 pp.
7. Systematics, Evolution, and Biogeography of Compositae / editors V. A. Funk, A. Susanna, T. F. Steussy, R. J. Bayer. – Vienna : International Association for Plant Taxonomy, University of Vienna, 2009. – XIX, 965 p. – ISBN 978-3-9501754-3-1.
8. Fu, Z.X., Jiao, B.H., Nie, B., Zhang, G.J., Gao, T.G. & China Phylogeny Consortium. A comprehensive generic-level phylogeny of the sunflower family: Implications for the systematics of Chinese Asteraceae. *Journal of Systematics and Evolution*. – 2016. – Vol. 54, No 4. – P. 416–437. – DOI: 10.1111/jse.12216 PDF
9. Гроссгейм, А. А. Определитель растений Кавказа. – М. «Советская наука», 1949. – 747 с.
10. Галушко, А. И. Флора Северного Кавказа. Определитель / А. И. Галушко. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1980. – Т. 3. – 328 с.
11. Конспект флоры Кавказа: В 3 томах / отв. ред. акад. А.Л. Тахтаджян. Т. 3. ч. 1 Ред. Ю.Л. Меницкого и др. СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 469 с.
12. Абдурзакова, А.С. Флора Терско-Кумской низменности и ее анализ: монография / А.С. Абдурзакова. – Назрань. Изд-во: Пилигрим, 2010. – 147 с.
13. Умаров, М.У. Конспект флоры Чеченской Республики / М.У. Умаров, М.А. Тайсумов. – Грозный: Изд-во АН ЧР, 2011. – 151 с.
14. Омархаджиева, Ф.С., Флора Чеченской Республики и ее анализ: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01 / Фатима Сагудиновна Омархаджиева. – Астрахань, 2011. – 292 с.

15. Исраилова, С.А. Флора антропофитов Чеченской Республики и её анализ: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01 / Сацита Аднановна Исраилова. – Астрахань, 2012. – 178 с.
16. Шахгириева, З.И., Умаров М.У., Теймуров А.А. Комплексный анализ биоразнообразия флоры аридных котловин Чечни и Ингушетии. Монография. – Грозный, изд-во ЧГУ, 2014. – 148 с.
17. Астамирова, М.А.-М. Конспект верхнеальпийской флоры центральной и восточной части главного Кавказского хребта: монография / М.А.-М. Астамирова. – Грозный, 2014. – 124 с.
18. Тайсумов, М. А. Анализ флоры бассейна реки Аргун (Восточный Кавказ) : монография / М. А. Тайсумов, Э. Ш. Дудагова, М. А.-М. Астамирова. – Грозный : «АЛЕФ», 2023. – 242 с. – ISBN 978-5-00212-361-2
19. Байбатырова, Э.Р. Экологические особенности флоры лесов восточной части Российского Кавказа: дис. ... канд. биол. наук: 1.5.15. / Байбатырова Элина Руслановна; – Ставрополь, 2024. – 215 с.
20. Plants of the World Online : сайт / Kew Royal Botanic Gardens. – Лондон, 2025. – URL: <http://plantsoftheworldonline.org> (дата обращения: 12.02.2026)
21. International Plant Names Index : сайт / The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University Herbaria & Libraries, Australian National Herbarium. – [Лондон, Кембридж (США), Канберра], 2025. – URL: <https://www.ipni.org> (дата обращения: 12.02.2026)
22. Raunkiaer, C. The life forms of plants and statistical plant geography / C. Raunkiaer. – Oxford: Clarendon, 1934. – 632 p.
23. Burt, B. L. Compositae and the study of functional evolution // Trans. Bot. Soc. Edinb. – Vol. 39. – 1961. – P. 216-232.

REFERENCES

1. Ivanov, A. L., Sigida, S. I., Mishvelov, E. G., & Belousov, A. I. (2023). Geographical analysis of the Russian Caucasus flora. Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences, 17(4), 38–53. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2023-17-4-38-53> (In Russian)
2. Royen, A. (1740). *Florae leydenensis prodromus, exhibens plantas quae in horto academico lugduno-batavo aluntur* [Prodromus of the Leiden flora, exhibiting the plants which are cultivated in the Leiden academic garden]. Apud Samuelem Luchtmans.
3. Berchtold, F., & Presl, J. S. (1820). *O Přírozenosti rostlin aneb Rostlinář, obsahující hebnánj o žiwobytj rostlin pro sebe a z ohledu giných žiwoků, podle stawu nyněss ylo znanj, pýtww rostlin; názwoslowj audů; hospodářstwj gegich; rozssjřenj po semí a spůsob rostlinář zjřditi a zacowati* [On the nature of plants or a herbal, containing a treatise on the life of plants in themselves and in relation to other living beings, according to the present state of knowledge; the morphology of plants; the terminology of parts; their economy; their distribution over the earth; and a method to arrange and establish a herbarium]. K. W. Enders.
4. Dumortier, B. C. J. (1822). *Commentationes botanicae. Observations botaniques, dédiées à la Société d'Horticulture de Tournay* [Botanical commentaries. Botanical observations, dedicated to the Horticultural Society of Tournay]. Imprimerie de Ch. Casterman-Dieu.
5. International Association for Plant Taxonomy. (n.d.). Home. IAPT. Retrieved January 27, 2026, from <https://www.iaptglobal.org/>
6. Giseke, P. D. (1792). *Praelectiones in ordines naturales plantarum* [Lectures on the natural orders of plants]. Apud Benj. Gottl. Hoffmanni.
7. Funk, V. A., Susanna, A., Steussy, T. F., & Bayer, R. J. (Eds.). (2009). *Systematics, evolution, and biogeography of Compositae*. International Association for Plant Taxonomy, University of Vienna.
8. Fu, Z.-X., Jiao, B.-H., Nie, B., Zhang, G.-J., Gao, T.-G., & China Phylogeny Consortium. (2016). A comprehensive generic-level phylogeny of the sunflower family: Implications for the systematics of Chinese Asteraceae. *Journal of Systematics and Evolution*, 54(4), 416–437. <https://doi.org/10.1111/jse.12216>
9. Grossheim, A. A. (1949). *Key to plants of the Caucasus*. Soviet Science. (In Russian)
10. Galushko, A. I. (1980). *Flora of the North Caucasus. Key (Vol. 3)*. Rostov University Press. (In Russian)
11. Takhtadzhyan, A. L. (Ed.). (2008). *Conspectus of the flora of the Caucasus: In 3 volumes (Vol. 3, part 1)*. KMK Scientific Press. (In Russian)
12. Abdurazakova, A. S. (2010). *Flora of the Terek-Kuma lowland and its analysis [Monograph]*. Pilgrim. (In Russian)
13. Umarov, M. U., & Taysumov, M. A. (2011). *Conspectus of the flora of the Chechen Republic*. Academy of Sciences of the Chechen Republic Press. (In Russian)
14. Omarhadzhieva, F. S. (2011). *Flora of the Chechen Republic and its analysis [Candidate dissertation, Astrakhan State University]*. (In Russian)
15. Israilova, S. A. (2012). *Flora of anthropophytes of the Chechen Republic and its analysis [Candidate dissertation, Astrakhan State University]*. (In Russian)

16. Shakhgirieva, Z. I., Umarov, M. U., & Teymurov, A. A. (2014). Comprehensive analysis of the biodiversity of the flora of the arid basins of Chechnya and Ingushetia [Monograph]. Chechen State University Press. (In Russian)
17. Astamirova, M. A.-M. (2014). Conspectus of the upper alpine flora of the central and eastern parts of the main Caucasus range [Monograph]. [Publisher not identified]. (In Russian)
18. Taysumov, M. A., Dudagova, E. Sh., & Astamirova, M. A.-M. (2023). Analysis of the flora of the Argun River basin (Eastern Caucasus) [Monograph]. ALEF. (In Russian)
19. Baybatyrova, E. R. (2024). Ecological features of the flora of forests in the eastern part of the Russian Caucasus [Candidate dissertation, North Caucasus Federal University]. (In Russian)
20. Royal Botanic Gardens, Kew. (2025). Plants of the World Online. Retrieved February 12, 2026, from <http://plantsoftheworldonline.org>
21. The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University Herbaria & Libraries, & Australian National Herbarium. (2025). International Plant Names Index. Retrieved February 12, 2026, from <https://www.ipni.org>
22. Raunkiaer, C. (1934). The life forms of plants and statistical plant geography. Clarendon Press.
23. Burtt, B. L. (1961). Compositae and the study of functional evolution. Transactions of the Botanical Society of Edinburgh, 39, 216–232.

AN ANALYSIS OF THE *ASTERACEAE* Bercht. & J. Presl IN THE FLORA OF THE CHECHEN REPUBLIC

A. A. Teimurov, M. A.-M. Astamirova, M. A. Taisumov

The article provides a critical analysis of the species composition of the Asteraceae family Bercht. & J. Presl in the flora of the Chechen Republic. It is established that the family is represented by 288 species belonging to 83 genera. Eight leading genera (*Hieracium*, *Cirsium*, *Artemisia*, *Centaurea*, *Senecio*, *Anthemis*, *Inula*, *Carduus*) have been identified, which together form the core of the flora of the Compositaceae region. A significant proportion (47 % of the total number of genera) is occupied by monotypic genera, which indicates the heterogeneity of the flora and its saturation with migratory elements. The analysis of the altitude-belt distribution of species has been carried out, which made it possible to identify the centers of concentration of taxonomic diversity in the forest, subalpine and semiarid belts. The chorological structure of the family is studied, which is dominated by boreal geoelements (52.08 %) with the leading role of Caucasian species (27.78 %), with significant participation of Ancient Mediterranean (17.01 %) and Holarctic (18.41 %) elements. A group of multi-belt species (17 species) has been identified, whose distribution range covers from four to five high-altitude belts, which correlates with their chorological affiliation and ecological plasticity. The role of representatives of the family in the formation of plant communities is characterized, from edificatory wormwood formations to pioneer groups in disturbed habitats. The data obtained contribute to understanding the patterns of formation of the flora of the Caucasian Isthmus and can be used in monitoring biodiversity and developing measures to protect the flora of the region.

Key words: *Asteraceae*, flora, Chechen Republic, taxonomic analysis, altitudinal zonation, chorology, geographical element, biomorph, multi-belt species, Caucasus.

Поступила в редакцию 22.02.2026 г.

Теймуров Абдулгамид Абулкасумович

кандидат биологических наук;
доцент кафедры биологии и биоразнообразия,
Дагестанский государственный университет,
г. Махачкала, РФ.
E-mail: gamid@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1832-7864
SPIN-код: 4332-7683
AuthorID: 174712

Teimurov Abdulgamid Abulkasumovich

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
of the Department of Biology and Biodiversity,
Dagestan State University, Makhachkala, RF.

Астамирова Маржан Абдул-Межидовна

доктор географических наук;
профессор кафедры биологии и методики ее преподавания, Чеченский государственный педагогический университет, г. Грозный, ЧР, РФ;
заведующий отделом биологических исследований, Академия наук Чеченской Республики, г. Грозный, ЧР, РФ;
главный научный сотрудник отдела биологических исследований, Комплексный научно-исследовательский институт РАН, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: astamirova@bk.ru
ORCID: 0000-0003-2251-0696
SPIN-код: 2140-7193
AuthorID: 750924

Astamirova Marzhan Abdul-Mezhidovna

Doctor of Geographical Sciences;
Professor of the Department of Biology and Methods of Teaching It, Chechen State Pedagogical University;
Head of the Department of Biological Research, Academy of Sciences of the Chechen Republic;
Chief Researcher of the Department of Biological Research, Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences.
Grozny, Chechen Republic, RF.

Тайсумов Муса Анасович

доктор биологических наук;
вице-президент, Академия наук Чеченской Республики, г. Грозный, ЧР, РФ;
профессор кафедры основ безопасности и защиты Родины, Чеченский государственный педагогический университет, г. Грозный, ЧР, РФ;
главный научный сотрудник отдела биологических исследований, Комплексный научно-исследовательский институт РАН, г. Грозный, ЧР, РФ.
E-mail: musa_taisumov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5053-8816
SPIN-код: 7179-9539
AuthorID: 447622

Taisumov Musa Anasovich

Doctor of Biological Sciences, Vice-President, Academy of Sciences of the Chechen Republic;
Professor of the Department of Fundamentals of Security and Homeland Protection, Chechen State Pedagogical University;
Chief Researcher of the Department of Biological Research, Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences.
Grozny, Chechen Republic, RF.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ L-КАРНИТИНА В КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ДЕКСАМЕТАЗОН- ИНДУЦИРОВАННОЙ МИОПАТИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЖИВОТНЫХ

© 2026. В. В. Труш, В. И. Соболев

На половозрелых крысах-самках изучена эффективность L-карнитина в дозе, эквивалентной умеренной терапевтической для человека (L-CAR, 100 мг/кг/сутки, внутривнутрибрюшинно), в компенсации негативных эффектов длительно вводимого дексаметазона (ДМ, 0,25 мг/кг/2-е суток, внутривнутрибрюшинно, на протяжении от 10 до 60 дней) на скелетную мышцу смешанного типа с преимущественным преобладанием гликолитических волокон (*m. tibial anterior*).

Препараты животным опытных групп вводили на протяжении 10 (10ДМ-, 10L-CAR- и 10ДМ+L-CAR-группы), 30 (30ДМ-, 30L-CAR- и 30ДМ+L-CAR-группы) и 60 (60ДМ-, 60L-CAR- и 60ДМ+L-CAR-группы) дней в дозах, эквивалентных умеренным терапевтическим для человека, внутривнутрибрюшинно: L-карнитин – в дозе 100 мг/кг/сутки, ДМ – в дозе 0,25 мг/кг, 1 раз в 2 суток.

Введение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном предотвратило развитие типичных для ДМ-групп признаков миопатических изменений: уменьшение массы мышцы и количества активируемых ее двигательных единиц, снижение амплитуды М-ответов на фоне их полифазии. У 30-60% особей, получавших дексаметазон с L-карнитином, наблюдалось выраженное облегчение синаптической передачи при оптимальной частоте (30 имп/с) стимуляции нервно-мышечного аппарата на фоне не уменьшенной, как у животных ДМ-группы, а нормальной и даже увеличенной амплитуды М-ответов (на 94–59 % спустя 10 и 60 дней введения пары препаратов, $p < 0,05$ относительно контроля). Кроме того, для животных ДМ+L-CAR-групп не было характерно типичных для ДМ-групп гораздо более существенного, чем у контроля, посттетанического облегчения на фоне сниженной амплитуды 1-го М-ответа в серии. Все эти факты указывают в пользу отсутствия типичной для ДМ-групп исходной заблокированности синапсов при комплексном применении дексаметазона с L-карнитином.

Применение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном несколько снизило частоту встречаемости патологически значимой депрессии синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата: эта депрессия встречалась у 20 % особей только 30ДМ+L-CAR-группы, тогда как при изолированном применении дексаметазона она регистрировалась во всех ДМ-группах с частотой 20–30 %. В то же время спустя 30 и 60 дней комплексного применения дексаметазона с L-карнитином наблюдалось более выраженное, в сравнении с контролем ($p < 0,05$), снижение амплитуды М-ответов при высокочастотной стимуляции (70 имп/с) малоберцового нерва относительно исходного уровня, указывающее в пользу снижения лабильности синапсов.

В случае субхронического комплексного применения дексаметазона с L-карнитином (спустя 30–60 дней) у 50–30 % особей регистрировалась сниженная надежность синаптической передачи при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) нервно-мышечного аппарата. Данный факт на фоне признаков сниженной лабильности синапсов, но при этом отсутствия признаков их исходной заблокированности, указывает в пользу постсинаптических нарушений у животных, субхронически получавших дексаметазон с L-карнитином.

L-карнитин в дозе 100 мг/кг/сутки, эквивалентной умеренной терапевтической для человека (1,5 г/сутки), в модельных экспериментах на животных проявил достаточно высокую эффективность в компенсации электрофизиологических проявлений дексаметазон-индуцированной миопатии.

Ключевые слова: скелетная мышца; дексаметазон; ятрогенный гиперкортицизм; стероидная миопатия; L-карнитин, крысы.

Введение. Несмотря на широкое использование глюкокортикостероидов (ГКС) в клинической практике и высокую частоту их негативных побочных эффектов на опорно-двигательный аппарат, вопрос, касающийся способов компенсации стероидной миопатии, остается не решенным. В качестве рабочей гипотезы в настоящей работе

было высказано предположение относительно возможной эффективности L-карнитина в компенсации электрофизиологических проявлений стероидной миопатии.

Выбор L-карнитина для возможной компенсации стероидной миопатии был обусловлен следующими обстоятельствами. В последнее время в медицине интенсивно развивается метаболическое направление, направленное на коррекцию обменных процессов при различных патологиях, в том числе нарушений клеточного энергообмена, вызванных вторичными митохондриальными дисфункциями различного генеза. Одними из относительно безопасных метаболически активных веществ, идентичных собственным молекулам животного организма, являются L-карнитин и его эфир ацетилкарнитин, играющие ключевую роль в клеточном метаболизме и характеризующиеся хорошим профилем безопасности [1].

L-карнитин, участвуя в транспорте длинноцепочечных жирных кислот в митохондрии клеток и тем самым стимулируя β -окисление в них, используется как средство энерготропной терапии. Кроме того, L-карнитин оказывает антиоксидантное [2], антигипоксическое, дезинтоксикационное [3], гиполипидемическое [4], мембраностабилизирующее [5], антиапоптотическое [6], анаболическое [1] и стабилизирующее митохондрии [5] действие, регулирует активность пируватдегидрогеназного комплекса в клетках, способствуя эффективному использованию углеводов в процессе энергообмена и предотвращая лактатацидоз при высокой его интенсивности.

Некоторые из выше перечисленных эффектов карнитина могут оказаться потенциально полезными для ослабления определенных патогенетических звеньев стероидной миопатии. В частности, известно, что одним из механизмов индукции стероидной миопатии является повреждение митохондрий в мышечных волокнах [7] и внутриклеточная депривация АТФ, обуславливающая сильную активацию АМРК и, как следствие, повышение активности пути FoxO3 – атрогены (MuRF-1, Fbx32). В связи с этим потенциальным протекторным эффектом могут обладать препараты энерготропного действия, улучшающие митохондриальный биогенез и оказывающие протекторный эффект в отношении структуры митохондрий, в том числе L-карнитин [5, 8].

Кроме того, весьма полезными в ослаблении патогенетических механизмов стероидной миопатии могут быть способность L-карнитина оказывать прямое и косвенное антиоксидантное и противовоспалительное действие, повышать чувствительность тканей к инсулину и облегчать реализацию анаболических его эффектов на клетки, повышать доступность энергетических субстратов для мышечных волокон и экспрессию рецепторов для андрогенов в них, оказывать антиапоптотическое действие путем подавления трансдукции проапоптотического сигнала Fas и генерации церамида [1, 2, 9].

Установлена способность карнитина препятствовать возрастной дегенерации мышечных волокон II типа и дегенерации мышечных волокон, вызванной денервацией, ускоряя процессы их реиннервации, уменьшать повреждение скелетных мышц при физической нагрузке, ослаблять раковую саркопению и тяжесть наследственно обусловленных миопатий Беккера и Дюшена [10–13].

Между тем, известно, что ГКС способствуют накоплению карнитина в различных органах (кроме печени), а высокие дозы L-карнитина, в свою очередь, оказывают непосредственное активирующее влияние на GR-рецепторы к ГКС [14], обуславливая возникновение иммуносупрессорных и противовоспалительных эффектов, во многом идентичных таковым ГКС. В то же время установлено, что активация процессов мышечной дистрофии под действием ГКС преимущественно обусловлена реализацией

их эффектов через рецепторы GR, потому что мышцы с нокаутом гена GR оказываются устойчивыми к дексаметазон-индуцированной мышечной дистрофии [15]. В связи с этим можно предположить достаточно сложное взаимодействие между терапевтическими дозами ГКС и карнитина в их влиянии на скелетные мышцы, обуславливающее особенности эффектов L-карнитина на периферическое звено нервно-мышечного аппарата в условиях гиперкортицизма, отличные от таковых в норме или при других патологических состояниях, в том числе сопровождающихся вторичными митохондриальными дисфункциями.

В связи с этим *целью настоящей работы* явилось изучение эффективности умеренных терапевтических доз L-карнитина (100 мг/кг/сутки, внутривенно) для компенсации негативных эффектов длительно вводимого дексаметазона (0,25 мг/кг/2-е суток, внутривенно, на протяжении от 10 до 60 дней) на скелетную мышцу смешанного типа с преимущественным преобладанием гликолитических волокон (*m. tibial anterior*).

При выборе дозы L-карнитина для субхронического введения крысам исходили из следующих обстоятельств. Известно, что при повышении концентрации карнитина в крови до уровня более 40–60 мкмоль/л (концентрация эндогенного L-карнитина в плазме крови) его реабсорбция в почках начинает снижаться [16], что способствует сохранению гомеостаза L-карнитина в крови. В связи с этим введение слишком высоких доз L-карнитина в организм сопровождается выделением его излишков с мочой и не приводит к существенному повышению его содержания в скелетных мышцах и других органах. Верхний допустимый уровень суточного потребления L-карнитина в составе специализированных пищевых продуктов – 900 мг/сут, а верхний безопасный уровень суточного потребления L-карнитина в составе БАД и лекарственных препаратов для взрослых составляет 2000 мг (29 мг на 1 кг массы тела) [17]. В спортивной медицине для повышения физической выносливости спортсменов L-карнитин рекомендуют в дозе 30–75 мг/кг в сутки (2–5 г/сутки) в течение не менее чем двух недель [18]. При расчете суточной дозы L-карнитина для крыс мы исходили из умеренной суточной его дозы для человека – 1,5 г/сутки. Эквивалентная этой дозе для человека доза для мелких лабораторных животных (крыс) с учетом их удельной площади поверхности тела, определяющей уровень основного обмена, составляет 100 мг/кг/сутки. Подобная доза L-карнитина применялась в модельных экспериментах на животных в работах других специалистов по оценке эффективности L-карнитина в улучшении функционального состояния скелетных мышц, гепатопротекторного его действия и улучшения детоксикационной функции печени [11, 19]. Дозу дексаметазона для субхронического введения крысам также рассчитывали, исходя из умеренной терапевтической его дозы для человека (4 мг/сутки).

Методика. Все эксперименты выполнены в соответствии с директивой Европейского совета (The European Council Directive 86/609/EEC) по соблюдению этических принципов в работе с лабораторными животными и «Руководством по проведению доклинических исследований лекарственных средств» [20]. Эксперименты проводились на половозрелых крысах-самках (исходная масса тела – 195–205 г, виварий Республиканского лабораторного центра санитарно-эпидемиологической службы, г. Донецк), разделенных на 4 группы: контрольную (n=10), I опытную (n=30, получали дексаметазон, ДМ-группа), II опытную (n=30, получали дексаметазон в комплексе с L-карнитином, ДМ+L-CAR-группа) и III опытную (n=30, получали L-карнитин, L-CAR-группа). Дексаметазон («KRKA», Словения) вводили 1 раз в 2-е суток, внутривенно в дозе 0,25 мг/кг. L-карнитин (торговая марка «Элькар» производства фирмы Пикфарма,

Россия) вводили в дозе 100 мг/кг, ежедневно, в водном растворе, внутривенно. Препараты вводили на протяжении 10, 30 и 60 дней. Соответственно животные каждой опытной группы были в последующем разделены на 3 подгруппы в зависимости от количества дней введения препаратов: 10ДМ-, 30ДМ- и 60ДМ-, 10ДМ+L-CAR, 30ДМ+L-CAR- и 60ДМ+L-CAR-, 10L-CAR-, 30L-CAR- и 60L-CAR-группы.

По окончании периода введения препаратов на наркотизированных животных (тиопентал натрия, 100 мг/кг, внутривенно) проводили острый опыт, в котором с помощью метода стимуляционной электромиографии изучали некоторые электрофизиологические параметры *m. tibial anterior* в условиях вызванного ее возбуждения, которое индуцировали путем раздражения сверхпороговым электрическим током малоберцового нерва при разных режимах его стимуляции с использованием методических подходов, описанных в более ранней нашей работе [21].

По окончании острого опыта в условиях глубокого наркоза проводили эвтаназию животных путем введения летальной дозы (300 мг/кг) тиопентала натрия.

Статистическую значимость различий между средними арифметическими величинами сравниваемых групп (при условии сохранения нормального закона распределения, W-тест Шапиро-Уилка) определяли при заданном уровне значимости $p < 0,05$ с помощью двухвыборочного t-теста Стьюдента для выборок с различными дисперсиями и F-статистики, значимость различий между относительными величинами устанавливали с помощью U-критерия Манна-Уитни.

Результаты и обсуждение. Изолированное введение дексаметазона сопровождалось гораздо меньшей прибавкой массы тела крыс за 2-месячный период (+ 25 % относительно исходного значения), по сравнению с таковой контрольной группы (+ 50 %), вследствие чего масса тела крыс ДМ-группы спустя 10, 30 и 60 дней введения дексаметазона значительно отличалась от соответствующих контрольных значений ($p < 0,01$, табл. 1).

Таблица 1

Средние значения ($\bar{X} \pm m$) массы тела и окружности живота крыс контрольной группы и животных, получавших дексаметазон (ДМ) и L-карнитин (L-CAR) изолированно и в комплексе, в динамике 2-месячного экспериментального периода

Параметры	Группы животных			
	Контроль	ДМ	ДМ+L-CAR	L-CAR
Исходные значения				
Масса тела, г	202,0±2,24	200,6±2,61	200,9±2,40	201,0±1,71
Окружность живота, см	15,8±0,53	15,7±0,52	15,7±0,49	15,7±0,50
Через 10 дней экспериментальных воздействий				
Масса тела, г	222,5±2,98●	193,6±2,15*	203,8±2,85*x	226,0±1,87●
Окружность живота, см	16,1±0,56	15,4±0,53	15,5±0,42	15,8±0,45
Масса печени, г	8,7±0,19	8,6±0,20	8,7±0,41	8,7±0,42
Через 30 дней экспериментальных воздействий				
Масса тела, г	260,0±4,21●	213,1±2,70*●	215,8±2,17*●	252,7±2,88●
Окружность живота, см	17,3±0,60	18,9±0,72●	16,0±0,52x	15,8±0,46
Масса печени, г	9,0±0,19	9,9±0,23*	7,9±0,25x	8,7±0,34
Через 60 дней экспериментальных воздействий				
Масса тела, г	303,0±5,28●	249,3±5,70*●	272,7±4,92*●x	327,0±3,92*●
Окружность живота, см	18,3±0,65	26,6±1,03*●	17,7±0,58x	16,8±0,59
Масса печени, г	9,2±0,20	10,4±0,29*	9,2±0,52	8,9±0,45

* – различия статистически значимы ($p < 0,05$) относительно соответствующих значений контрольной группы; ● – различия статистически значимы ($p < 0,05$) относительно исходного значения параметра соответствующей группы; x – различия между соответствующими ДМ+L-CAR- и ДМ-группами статистически значимы ($p < 0,05$)

Кроме того, для животных ДМ-группы было характерно первоначальное снижение аппетита (спустя первые 10 дней), а в последующем (спустя 30–60 дней введения) – повышенный аппетит и гиперфагия, обуславливающие определенные изменения жирового обмена, которые проявлялись у крыс 30ДМ- и 60ДМ-групп в значимом относительно исходного уровня ($p < 0,05$) увеличении окружности живота (на 20–69 %) и повышении этого параметра у животных 60ДМ-группы относительно контроля (на 45 %, $p < 0,05$). Кроме того, у крыс 30ДМ- и 60ДМ-групп после вскрытия отмечались излишние жировые отложения в области брюшной полости и значимое относительно контроля ($p < 0,05$) увеличение массы печени (на 10–13 %, табл. 1). Данные факты указывают в пользу развития висцерального ожирения под влиянием субхронически вводимого дексаметазона.

Длительное изолированное применение L-карнитина обуславливало аналогичный контрольному прирост массы тела за 2-месячный период (+ 63 %, $p > 0,05$ относительно контроля), но при этом отмечалась тенденция к уменьшению окружности живота, не достигавшая статистически значимого характера (табл. 1).

У животных, получавших дексаметазон с L-карнитином, наблюдался значимо больший ($p < 0,05$), в сравнении с ДМ-группой, но при этом меньший, в сравнении с контролем ($p < 0,05$), прирост массы тела за 2-месячный период введения препаратов (+ 36 %) на фоне соответствующих контролю окружности живота и массы печени (табл. 1). Данные факты косвенно указывают в пользу отсутствия выраженного висцерального ожирения у животных, подвергавшихся субхроническому введению дексаметазона и L-карнитина.

Изолированное введение дексаметазона сопровождалось ($p < 0,05$ относительно контроля) спустя 30 дней применения уменьшением массы мышцы (на 9 %), количества активируемых двигательных единиц (ДЕ) (на 43 %) и амплитуды М-ответов (на 31 %) на фоне их полифазии (табл. 2), что свидетельствует в пользу миопатических изменений исследуемой мышцы. Спустя 60 дней введения дексаметазона, несмотря на то, что средняя амплитуда М-ответов нормализовалась, но наблюдалось значимое относительно контроля ($p < 0,05$) их удлинение (на 64 %) на фоне уменьшенных массы мышцы (на 8 %) и количества активируемых ДЕ (на 40 %) и сохранности у части животных низкоамплитудных полифазных М-ответов, что косвенно указывает в пользу нормализации амплитуды М-ответов за счет увеличения плотности ДЕ в результате коллатерального спрутинга дистрофически измененных или утративших иннервацию вследствие нейропатических изменений мышечных волокон.

L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, предотвратил все отмеченные для ДМ-групп изменения массы мышцы, количества активируемых ДЕ, амплитуды и длительности М-ответов (табл. 2). Более того, амплитуда М-ответов спустя 10 и 60 дней введения пары препаратов (ДМ+L-карнитин) и масса мышцы спустя 60 дней комплексного применения дексаметазона и L-карнитина превосходили уровень контроля ($p < 0,05$), что было характерно и для субхронического изолированного применения L-карнитина. Кроме того, при комплексном применении дексаметазона с L-карнитином частота полифазии М-ответов (10–20 %) была ниже таковой ДМ-групп (20–40 %), и полифазные М-ответы характеризовались нормальной или повышенной, а не сниженной как в 30ДМ-группе, амплитудой (табл. 2). Все эти особенности указывают в пользу того, что у животных, получавших пару препаратов (дексаметазон+L-карнитин), косвенные признаки выраженных миопатических изменений, типичные для ДМ-групп, отсутствовали.

Таблица 2

Средние значения ($\bar{X} \pm m$) некоторых параметров М-ответа, массы и количества активируемых ДЕ *m. tibialis anterior* контрольной группы и животных, получавших дексаметазон (ДМ) и L-карнитин (L-CAR) изолированно и комплексно (ДМ+L-CAR)

Группа животных	Параметры М-ответа				Масса мышцы, мг	Количество активируемых ДЕ
	Латент-ный период, мс	Амплитуда, мВ	Длительность, мс	% полифазных потенциалов		
К	1,2±0,05	2,6±0,22	5,5±0,51	0	399,8±6,81	14,1±1,21
10ДМ	1,1±0,01 [-12*]	2,5±0,37	6,9±0,98	20	365,5±8,77 [-9*]	13,5±1,07
10L-CAR	1,1±0,04 [-13*]	6,0±0,83 [+108*]	4,8±0,64	0	438,0±22,80	12,6±1,17
10ДМ+L-CAR	1,0±0,03 [-16*]	5,6±0,60 [+94*], 124 ^x	6,0±0,43	10	415,8±9,49 14 ^x	14,3±2,81
30ДМ	1,5±0,06 [+19*]	1,8±0,20 [-31*]	5,7±0,65	40	363,9±8,50 [-9*]	8,1±0,95 [-43*]
30L-CAR	1,1±0,03 [-12*]	4,4±0,25 [+53*]	5,7±0,69	0	477,3±18,77 [+19*]	19,4±1,98 [+37*]
30ДМ+L-CAR	1,1±0,05 [-11*]	4,0±0,60 +122 ^x	5,7±0,67	20	416,0±8,28 14 ^x	17,2±1,43 113 ^x
60ДМ	1,5±0,11	3,9±0,70	9,0±1,02 [+64*]	40	366,3±10,54 [-8*]	8,4±0,88 [-40*]
60L-CAR	1,1±0,03 [-12*]	4,2±0,37 [+45*]	5,4±1,01	10	535,2±16,06 [+34*]	19,7±1,73 [+39*]
60ДМ+L-CAR	1,0±0,03 [-17*], -30 ^x	4,6±0,63 [+59*]	6,1±0,54 -32 ^x	0	511,1±16,75 [+28*], +40 ^x	15,2±2,80 [+80*]

* – в квадратных скобках указана статистически значимая разница показателя относительно соответствующего значения контрольной группы (в %, $p < 0,05$); ^x – указана статистически значимая разница показателя (в %, $p < 0,05$) между соответствующими ДМ- и ДМ+L-CAR-группами

Субхроническое введение дексаметазона (на протяжении 30–60 дней) сопровождалось более выраженной утомляемостью мышцы, в сравнении с контролем. В пользу этого указывают следующие факты. Во-первых, более существенное, чем в контроле ($p < 0,05$), уменьшение количества активируемых ДЕ мышцы после утомляющей работы (рис. 1, А). Во-вторых, значимо большее, чем в контроле ($p < 0,05$), уменьшение амплитуды М-ответов в процессе выполнения утомляющей работы: при снижении амплитуды тетануса на 50 % и 80 % относительно максимальной (рис. 1, Б, В).

L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, предотвратил развитие признаков повышенной утомляемости мышцы, типичное для изолированного применения дексаметазона. Во-первых, у животных, получавших пару препаратов (дексаметазон+L-карнитин), наблюдалось менее выраженное, в сравнении не только с ДМ-группами, но и контролем ($p < 0,05$), уменьшение количества активируемых ДЕ после утомляющей работы, что было характерно и для изолированного применения L-карнитина (рис. 1, А). Во-вторых, у животных ДМ+L-CAR-групп степень снижения амплитуды М-ответов при выполнении утомляющей работы (снижении амплитуды тетануса на 50 % и 80 % относительно максимальной) значимо не отличалась от таковой контроля (рис. 1, Б, В).

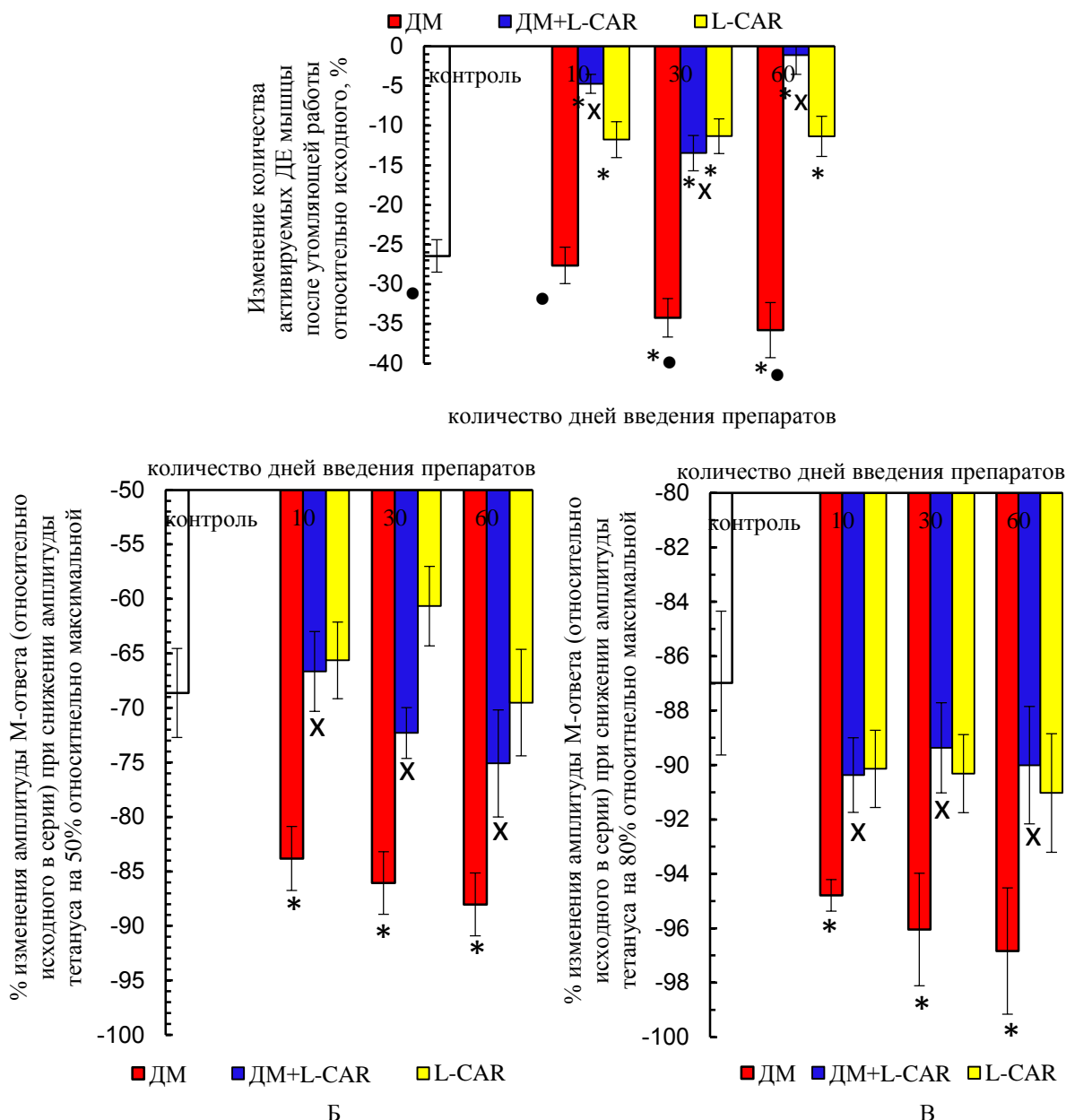


Рис. 1. Степень изменения количества активируемых ДЕ *m. tibialis anterior* после утомляющей работы относительно исходного уровня (в %, А) и амплитуды М-ответов в процессе выполнения утомляющей работы (в % относительно 1-го М-ответа) при снижении амплитуды тетануса на 50 % (Б) и 80 % (В) относительно максимальной у животных контрольной группы и получавших дексаметазон и L-карнитин изолированно и в комплексе. • – степень изменения параметра после утомляющей работы статистически значима относительно исходного уровня ($p < 0,05$); * – различия в степени изменения параметра у животных опытных групп статистически значимы относительно контрольной группы ($p < 0,05$); x – различия в степени изменения параметра между соответствующими ДМ- и ДМ+L-CAR-группами статистически значимы ($p < 0,05$)

В случае изолированного субхронического введения дексаметазона у части особей (70–40 % крыс 30ДМ- и 60ДМ-групп) отмечался патологически значимый (превышающий 10 % от амплитуды 1-го М-ответа в серии) декремент амплитуды 5-го М-ответа относительно 1-го при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) малоберцового нерва, свидетельствующий в пользу сниженной надежности синаптической передачи. И,

в целом, среднее значение этого декремента амплитуды М-ответов в 30ДМ- и 60ДМ-группах значимо ($p < 0,05$) отличалось от такового контроля (табл. 2). При этом у животных ДМ-групп патологически значимый декремент амплитуды М-ответов при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) нервно-мышечного аппарата чаще встречался до утомляющей работы, чем после ее выполнения (табл. 3). Данный факт свидетельствует в пользу того, что одной из причин сниженной надежности синаптической передачи в ДМ-группах является исходная заблокированность синапсов.

Таблица 3

Средние значения ($\bar{X} \pm m$) декремента амплитуды М-ответа (при низкочастотной стимуляции малоберцового нерва, 4 имп/с) в мышце контрольных животных и крыс, получавших дексаметазон (ДМ) и L-карнитин (L-CAR) изолированно и комплексно (ДМ+L-CAR)

Группа животных	Исходные значения (до утомляющей работы)		После утомляющей работы	
	Декремент 5-го М-ответа относительно 1-го, %	Доля особей с патологически значимым декрементом, %	Декремент 5-го М-ответа относительно 1-го, %	Доля особей с патологически значимым декрементом, %
Контроль	2,4±1,14	0	1,9±0,99	0
10ДМ	-5,7±3,87	10	-6,8±4,92	10
10ДМ+L-CAR	8,5±7,72	10	2,3±2,10	10
10L-CAR	-1,0±2,08	0	1,5±1,46	0
30ДМ	-19,5±4,02*	70	-8,8±6,09	30
30ДМ+L-CAR	-5,6±4,05 ^x	50	-7,0±3,98*	50
30L-CAR	-1,6±2,33	0	3,9±5,66	0
60ДМ	-10,4±3,21*	40	-1,6±7,06	10
60ДМ+L-CAR	-5,1±4,58	30	-6,2±4,74	30
60L-CAR	3,6±2,33	0	6,2±7,53	0

* – разница декремента амплитуды М-ответа относительно такового контроля статистически значима ($p < 0,05$); ^x – указана статистически значимая ($p < 0,05$) разница показателя между соответствующими ДМ- и ДМ+L-CAR-группами

Введение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном незначительно снизило, в сравнении с ДМ-группами, частоту встречаемости патологически значимого декремента амплитуды М-ответов при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) нервно-мышечного аппарата (до 50–30 % у животных 30ДМ+L-CAR- и 60ДМ+L-CAR-групп). При этом среднее по ДМ+L-CAR-группам значение этого декремента значимо не отличалось от контроля, а спустя 30 дней введения пары препаратов оказалось значимо меньше ($p < 0,05$), чем в 30ДМ-группе (табл. 3). Еще одна особенность ДМ+L-CAR-групп, в сравнении с ДМ-группами, заключалась в том, что частота появления патологически значимого декремента амплитуды М-ответов при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) малоберцового нерва в ДМ+L-CAR-группах не уменьшалась после выполнения утомляющей работы (табл. 3). Данный факт свидетельствует в пользу того, что сниженная надежность синаптической передачи у животных ДМ+L-CAR-групп не связана с заблокированностью синапсов, а может быть следствием постсинаптических расстройств. Таким образом, L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, ослабил, но не предотвратил появление признаков сниженной надежности синаптической передачи, типичных при субхроническом изолированном применении дексаметазона.

Изолированное введение дексаметазона сопровождалось появлением у части особей выраженного (превышающего 30 % от амплитуды 1-го М-ответа в серии) облегчения синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-

мышечного аппарата. В целом, средняя по 10ДМ- и 30ДМ-группам степень этого облегчения превышала таковую контроля ($p < 0,05$, рис. 2, А). В то же время у животных 10ДМ-группы это выраженное облегчение синаптической передачи отмечалось на фоне нормальной амплитуды 1-го М-ответа в серии и нормальной степени посттетанического облегчения (рис. 2, В, Г). У крыс 30ДМ-группы выраженное облегчение синаптической передачи отмечалось на фоне сниженной амплитуды 1-го М-ответа в серии ($p < 0,05$ относительно контроля) и гораздо более выраженного, чем в контроле ($p < 0,05$), посттетанического облегчения, что указывает в пользу исходной заблокированности синапсов и возможных пресинаптических расстройств. Причем признаки заблокированности синапсов (сниженная относительно контроля ($p < 0,05$) амплитуда М-ответа перед тетанусом и гораздо большая, чем в контроле ($p < 0,05$), степень посттетанического облегчения) сохранялись и у животных 60ДМ-группы (рис. 2, В, Г).

L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, не предотвратил выраженного облегчения синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) малоберцового нерва спустя 10 и 30 дней введения пары препаратов. В то же время, это выраженное облегчение синаптической передачи отмечалось на фоне повышенной амплитуды 1-го М-ответа в серии ($p < 0,05$ относительно контроля) и нормальной степени посттетанического облегчения (рис. 2, В, Г). Кроме того, выраженное облегчение синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата отмечалось и у части животных L-CAR-групп, и средняя по L-CAR-группам степень этого облегчения превосходила таковую контроля ($p < 0,05$, рис. 2, А, Б). Данные факты указывают в пользу того, что выраженное облегчение синаптической передачи у части особей ДМ+L-CAR-групп, подобно L-CAR-группам, вероятнее всего, было обусловлено облегчающим действием L-карнитина на этот процесс.

Изолированное введение дексаметазона сопровождалось появлением у части особей (30 % в 30ДМ- и 60ДМ-группах) патологически значимой депрессии синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции малоберцового нерва (30 имп/с, рис. 3, Б). И в целом, средняя по 30ДМ- и 60ДМ-группам степень этой депрессии значимо превосходила таковую контроля ($p < 0,05$, рис. 3, А). Кроме того, для животных всех ДМ-групп было характерно гораздо более существенное, чем у контроля, снижение амплитуды М-ответов относительно 1-го в серии при высокочастотной стимуляции (70 имп/с) малоберцового нерва. Данные факты указывают в пользу более низкой лабильности синапсов и возможных постсинаптических расстройств.

L-карнитин, вводимый в комплекс с дексаметазоном, снизил частоту появления признаков патологически значимой депрессии синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) малоберцового нерва: она встречалась только у животных 30ДМ+L-CAR-группы, но средняя по группе степень этой депрессии не отличалась значимо от контроля (рис. 3, А, Б). Степень снижения амплитуды М-ответов относительно 1-го в серии при высокочастотной стимуляции (70 имп/с) малоберцового нерва у животных 10ДМ+L-CAR- и 60ДМ+L-CAR-групп значимо не отличалась от контроля и оказалась меньше таковой 10ДМ- и 60ДМ-групп ($p < 0,05$, рис. 3В). Вместе с тем, спустя 30 дней введения пары препаратов, когда при изолированном применении дексаметазона наблюдались наиболее выраженные признаки стероидной миопатии, степень снижения амплитуды М-ответов при высокочастотной стимуляции (70 имп/с) малоберцового нерва относительно 1-го в серии превосходила таковую контроля ($p < 0,05$), но оказалась значимо меньше таковой 30ДМ-группы ($p < 0,05$, рис. 3, В). Кроме того, как уже обсуждалось ранее, спустя 30 дней комплексного применения дексаметазона и L-карнитина у 50 % особей

отмечались признаки сниженной надежности синаптической передачи. В связи с тем, что признаки сниженной надежности синаптической передачи у крыс 30ДМ+L-CAR-группы сочетались с признаками выраженной ее депрессии при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата и сниженной лабильности синапсов при высокочастотной стимуляции (70 имп/с), наиболее вероятной их причиной служили постсинаптические нарушения.

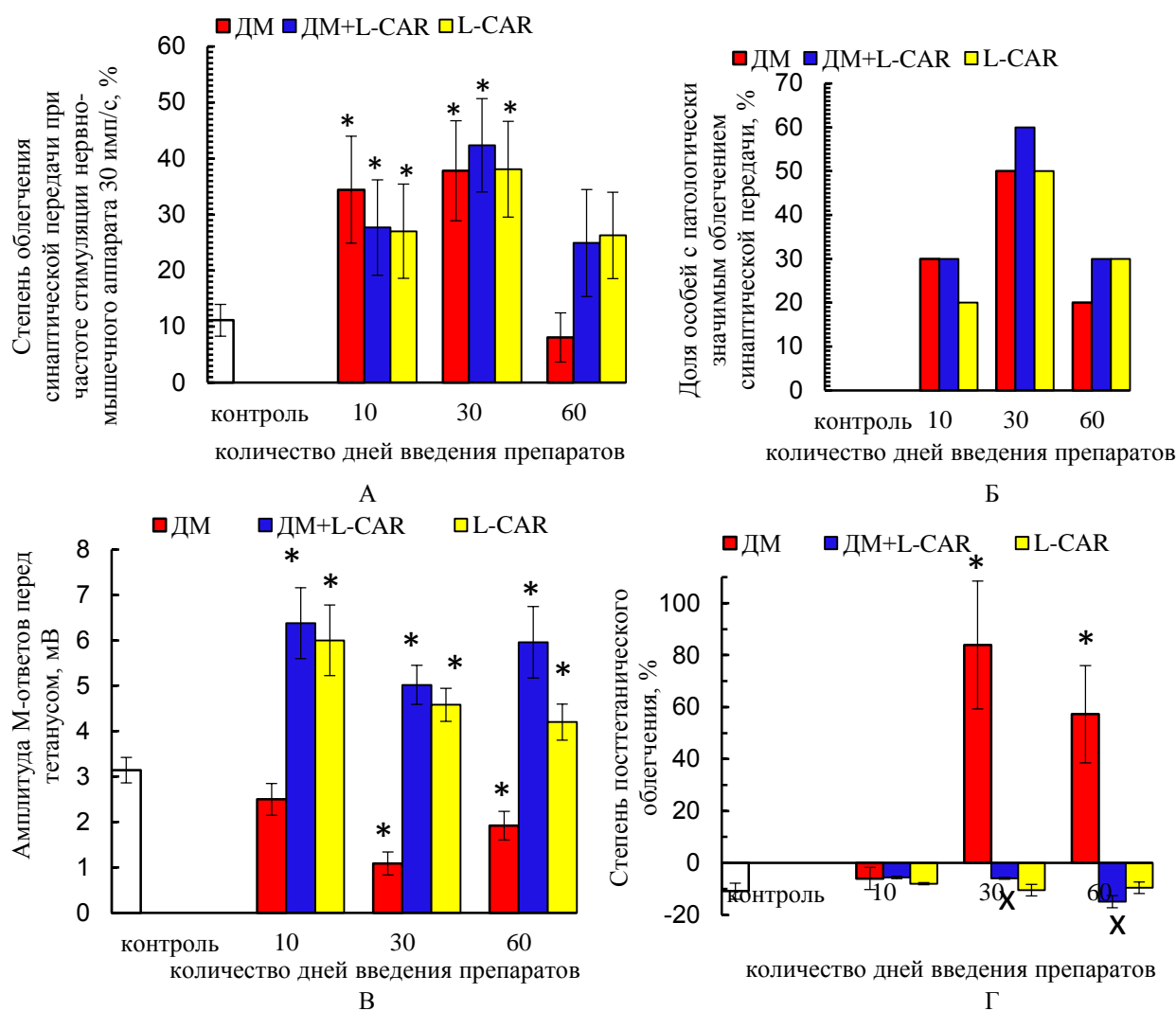


Рис. 2. Значения некоторых функциональных параметров, отражающих состояние пресинаптического звена в *m. tibialis anterior* у контрольных крыс и животных, получавших дексаметазон и L-карнитин изолированно и в комплексе. А – средние значения степени облегчения синаптической передачи и частота встречаемости патологически значимого (превышающего 30 % от амплитуды 1-го М-ответа в серии) облегчения синаптической передачи (Б) при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата, В – средние значения амплитуды М-ответов перед тетанусом и степень посттетанического облегчения после 6-секундного тетануса (Г). * – различия статистически значимы ($p < 0,05$) относительно значения соответствующего показателя контрольной группы, x – указана статистически значимая ($p < 0,05$) разница показателя между соответствующими ДМ- и ДМ+L-CAR-группами

Таким образом, L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, предотвратил развитие признаков выраженных миопатических нарушений (снижение амплитуды М-ответов на фоне их полифазии и уменьшение количества активируемых ДЕ и массы мышцы, типичных для 30ДМ-группы) и заблокированности синапсов.

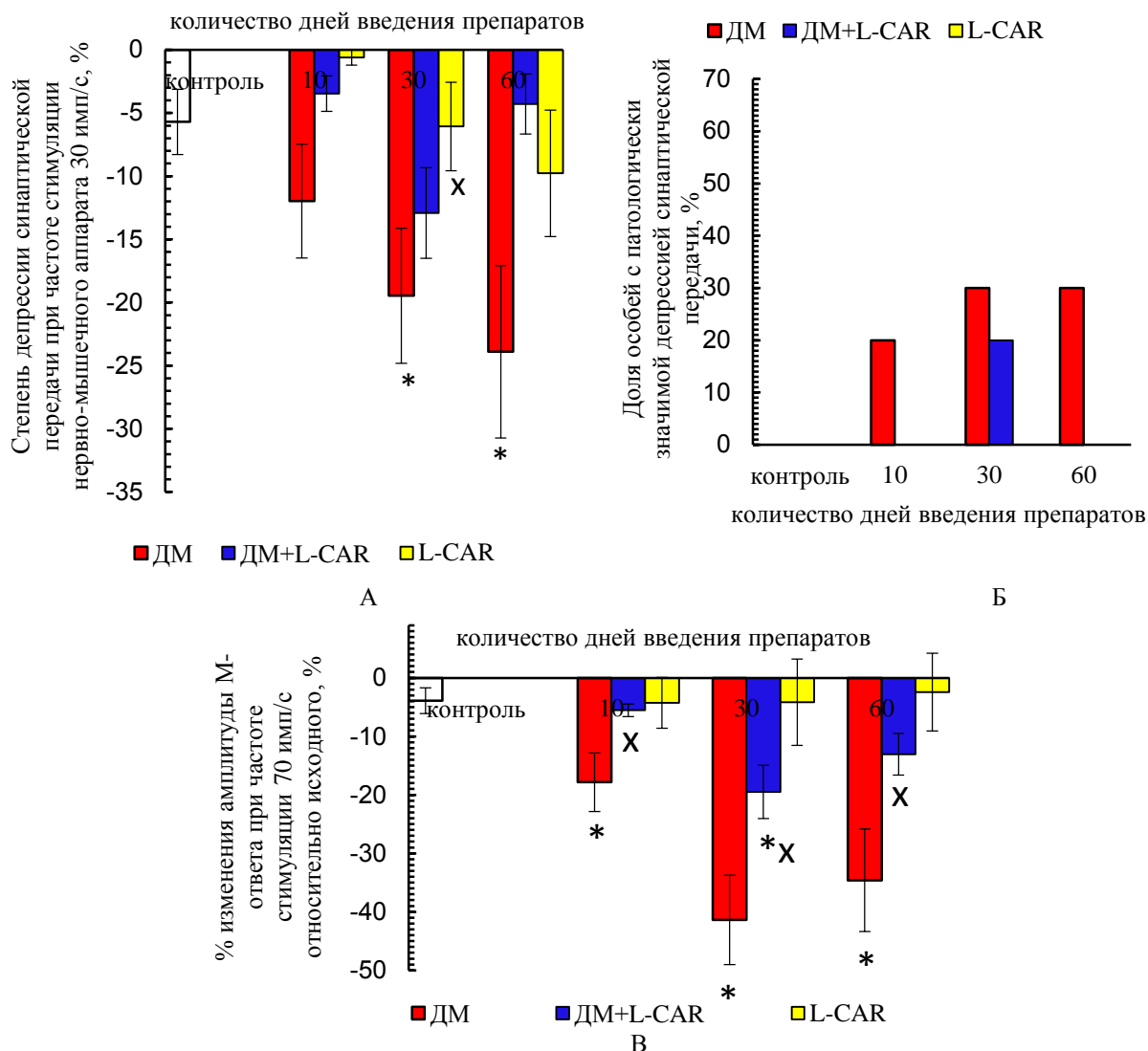


Рис. 3. Значения некоторых параметров, отражающих состояние постсинаптического звена и лабильности синапсов в *m. tibialis anterior* у контрольных крыс и животных, получавших дексаметазон и L-карнитин изолированно и в комплексе. А – средние значения степени депрессии синаптической передачи и частота встречаемости патологически значимой депрессии синаптической передачи (Б) при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата, В – средние значения степени изменения амплитуды М-ответов (в % относительно таковой 1-го в серии) при высокочастотной стимуляции малоберцового нерва (70 имп/с). * – различия статистически значимы ($p < 0,05$) относительно соответствующего значения контрольной группы, х – указана статистически значимая ($p < 0,05$) разница показателя между соответствующими ДМ- и ДМ+L-CAR-группами

Кроме того, по окончании 2-месячного периода введения пары препаратов (дексаметазон+L-карнитин) у животных не наблюдалось патологически значимой депрессии синаптической передачи и сниженной лабильности синапсов, сохранявшихся у части особей 60ДМ-группы. Вместе с тем, спустя 30 дней введения дексаметазона с L-карнитином у части особей отмечались признаки патологически значимой депрессии синаптической передачи, сниженных ее надежности и лабильности синапсов, но они были менее выражены, в сравнении с 30ДМ-группой. Наконец, L-карнитин, вводимый в комплексе с дексаметазоном, предотвратил появление признаков повышенной утомляемости нервно-мышечного аппарата, типичных для изолированного применения дексаметазона. Все это позволяет рассматривать L-

карнитин в качестве потенциально эффективного и безопасного средства для ослабления тяжести стероидной миопатии.

Таким образом, L-карнитин в дозе 100 мг/кг/сутки, эквивалентной умеренной терапевтической для человека (1,5 г/сутки), в модельных экспериментах на животных проявил достаточно высокую эффективность в компенсации электрофизиологических проявлений дексаметазон-индуцированной миопатии.

Выводы

1. Введение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном предотвратило развитие типичных для ДМ-групп признаков миопатических изменений: уменьшение массы мышцы и количества активируемых ее ДЕ, снижение амплитуды М-ответов на фоне их полифазии.

2. Введение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном обуславливало возникновение у 30–60 % особей выраженного облегчения синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата, которое отмечалось на фоне не уменьшенной, как у животных ДМ-группы, а нормальной и даже увеличенной амплитуды М-ответов (на 94–59 % спустя 10 и 60 дней введения пары препаратов, $p < 0,05$ относительно контроля). Кроме того, для животных ДМ+L-CAR-групп не было характерно гораздо более существенного, чем у контроля, посттетанического облегчения на фоне сниженной амплитуды 1-го М-ответа в серии, типичных для ДМ-групп. Все эти факты указывают в пользу отсутствия типичной для ДМ-групп исходной заблокированности синапсов при комплексном применении дексаметазона с L-карнитином.

3. Применение L-карнитина в комплексе с дексаметазоном несколько снизило частоту встречаемости патологически значимой депрессии синаптической передачи при оптимальной частоте стимуляции (30 имп/с) нервно-мышечного аппарата: эта депрессия встречалась у 20 % особей только 30ДМ+L-CAR-группы, тогда как при изолированном применении дексаметазона она регистрировалась во всех ДМ-группах с частотой 20–30 %. В то же время спустя 30 и 60 дней комплексного применения дексаметазона с L-карнитином наблюдалось более выраженное, в сравнении с контролем ($p < 0,05$), снижение амплитуды М-ответов при высокочастотной стимуляции (70 имп/с) малоберцового нерва относительно исходного уровня, указывающее в пользу снижения лабильности синапсов.

4. В случае субхронического комплексного применения дексаметазона с L-карнитином (спустя 30–60 дней) у 50–30 % особей регистрировалась сниженная надежность синаптической передачи при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) нервно-мышечного аппарата. Данный факт на фоне признаков сниженной лабильности синапсов, но при этом отсутствия признаков их исходной заблокированности, указывает в пользу постсинаптических нарушений у животных, субхронически получавших дексаметазон с L-карнитином.

5. У животных ДМ- и ДМ+L-CAR-групп наблюдался разный характер изменения частоты встречаемости сниженной надежности синаптической передачи после выполнения утомляющей работы, отражающий разные причины понижения надежности работы синапсов. Если у животных ДМ-групп патологически значимый декремент амплитуды М-ответов при низкочастотной стимуляции (4 имп/с) нервно-мышечного аппарата, чаще встречался до утомляющей работы, чем после ее выполнения, то у крыс ДМ+L-CAR-групп – с одинаковой частотой до и после утомляющей работы. Данный факт свидетельствует в пользу того, что одной из причин сниженной надежности синаптической передачи в ДМ-группах является исходная

заблокированность синапсов, тогда как у животных ДМ+L-CAR-групп – постсинаптические нарушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fielding, R., Riede, L., Lugo, J.P., Bellamine, A. L-carnitine supplementation in recovery after exercise // *Nutrients*. – 2018. – Vol. 10, No 3. – P. 349. – DOI: 10.3390/nu10030349
2. Nachvak, S.M., Shabanpur, M., Mostafai, R. & Heidari, M.R. L-Carnitine supplementation reduces biomarkers of inflammatory and oxidative stress in patients with coronary artery disease: a randomised controlled trial // *J. Arch. Physiol. Biochem.* – 2023. – Vol. 129, No 1. – P. 61-68. – DOI: 10.1080/13813455.2020.1797102
3. Chiechio, S., Canonico, P. & Grilli, M. L-Acetylcarnitine: A Mechanistically Distinctive and Potentially Rapid-Acting Antidepressant Drug // *Int. J. Mol. Sci.* – 2018. – Vol. 19, No 11. – P. 11-13. – DOI:10.3390/ijms19010011
4. El-Hattab, A.W. & Scaglia, F. Disorders of carnitine biosynthesis and transport // *Molecular Genetics and Metabolism*. – 2015. – V. 116, No 3. – P. 107-112. – DOI: 10.1016/j.ymgme.2015.09.004
5. Gnoni, A., Longo, S., Gnoni, G.V. & Giudetti, A.M. Carnitine in human muscle bioenergetics: can carnitine supplementation improve physical exercise? // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25, No 1. – P. 182. – DOI: 10.3390/molecules25010182
6. Naderi Noreini, S., Malmir, M., Ghafarizadeh, A., Faraji, T. & Bayat, R. Protective effect of L-carnitine on apoptosis, DNA fragmentation, membrane integrity and Lipid peroxidation of spermatozoa in the asthenoteratospermic men // *Andrologia*. – 2021. – Vol. 53, No 2. – P. e13932. – DOI: 10.1111/and.13932
7. Jiao, H., Zhou, K., Zhao, J., Wang, X., Lin, H. A high-caloric diet rich in soy oil alleviates oxidative damage of skeletal muscles induced by dexamethasone in chickens // *Redox. Rep.* – 2018. – Vol. 23, No 1. – P. 68-82. – DOI: 10.1080/13510002.2017.1405494
8. Шафоростова, Е.А. Влияние истощения L-карнитина при длительной терапии мельдонием на митохондриальный баланс в мозге мышей / Е.А. Шафоростова, А.П. Гуреев, И.Ю. Виткалова, В.Н. Попов // *Биомедицинская химия*. – 2021. – Т. 67, вып. 1. – С. 74-80. – DOI: 10.18097/PBMC20216701074
9. Sangouni, A.A., Pakravanfar, F., Ghadiri-Anar, A., Nadjarzade, A., Fallahzade, H. & Hosseinzadeh, M. The effect of L-carnitine supplementation on insulin resistance, sex hormone-binding globulin and lipid profile in overweight/ obese women with polycystic ovary syndrome: A randomized clinical trial // *Eur. J. Nutr.* – 2022. – Vol. 61, No 3. – P. 1199-1207. – DOI: 10.1007/s00394-021-02659-0
10. Котов, С.В. Положительный эффект энерготропной терапии (L-карнитина и коэнзима Q10) у больного миопатией Беккера по данным МРТ мышц конечностей / С.В. Котов, М.С. Бунак, Е.В. Бородатая, О.П. Сидорова // *Практическая медицина*. – 2018. – Т.16, № 10. – С. 117-120. – DOI: 10.32000/2072-1757-2018-10-117-120.
11. Хуторская, И.А. Морфология скелетных мышц при динамической физической нагрузке и коррекции L-карнитином / И.А. Хуторская, Г.Ф. Шаймарданова, В.П. Балашов, В.Н. Абрамов, А.В. Балашов, Е.В. Быстрова, И.А. Евстифеева // *Клин. экп. морфология*. – 2024. – Т. 13, № 4. – С. 67-75. – DOI: 10.31088/CEM2024.13.4.67-75
12. Lu, Z., Wang, L., Huo, Zh., Li, Na, Tong, N., Chong, F., Liu, J., Zhang, Y. & Xu, H. L-Carnitine relieves cachexia-related skeletal muscle fibrosis by inducing deltex E3 ubiquitin ligase 3L to negatively regulate the Runx2/COL1A1 axis // *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*. – 2024. – Vol. 15, No 5. – P. 1953-1964. – DOI: 10.1002/jcsm.13544
13. Yarizadh, H., Shab-Bidar, S., Zamani, B., Nazary Vanani, A., Baharlooi, H. & Djafarian, K. The Effect of L-Carnitine Supplementation on Exercise-Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials // *Journal of the American College of Nutrition*. – 2020. – Vol. 39, No 5. – P. 457-468. – DOI:10.1080/07315724.2019.1661804
14. Alesci, S., De Martino, M.U., Kino, T., Ilias I. L-Carnitine is a modulator of the glucocorticoid receptor alpha // *Ann. NY Acad. Sci.* – 2004. – Vol. 1024. – P. 147-152. – DOI: 10.1196/annals.1321.012
15. Watson, M.L., Baehr, L.M., Reichardt, H.M., Tuckermann, J.P., Bodine, S.C. & Furlow, J.D. A cell-autonomous role for the glucocorticoid receptor in skeletal muscle atrophy induced by systemic glucocorticoid exposure // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* – 2012. – Vol. 302, No 10. – P. E1210-E1220. – DOI: 10.1152/ajpendo.00512.2011
16. Evans, A.M., Fornasini, G. Pharmacokinetics of L-carnitine // *Clin. Pharmacokinet.* – 2003. – Vol. 42. – P. 941-967. – DOI: 10.2165/00003088-200342110-00002

17. Коденцова, В.М. L-карнитин: пищевые источники, адекватные и клинически эффективные дозы / В.М. Коденцова, Д.В. Рисник, Е.В. Крюкова, С.Г. Дарий // Медицинский совет. – 2024. – Т. 18, № 5. – С. 320-328. – DOI: 10.21518/ms2024-028
18. Wall, B.T., Stephens, F.B., Constantin-Teodosiu, D., Marimuthu, K., Macdonald, I.A. & Greenhaff, P.L. Chronic oral ingestion of l-carnitine and carbohydrate increases muscle carnitine content and alters muscle fuel metabolism during exercise in humans // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* – 2011. – Vol. 21, № 5. – P. 385-397. – DOI: 10.1113/jphysiol.2010.201343
19. Становская, В.И. Влияние пантенола и карнитина на ферменты обмена альдегидов в печени крыс, пораженных тетрахлорметаном / В.И. Становская, П.С. Пронько, А.В. Гайшманова, Д.А. Мискевич // Экспериментальная и клиническая фармакология. – 2009. – Т. 72, № 2. – С. 39-40. – DOI: 10.30906/0869-2092-2009-72-2-39-40
20. Миронова, А.Н. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств / А.Н. Миронова, Н.Д. Бунатян. – М.: Минздрав РФ, ЗАО «Гриф и К», 2012. – 944 с.
21. Труш В.В. Модуляция биотином некоторых электрофизиологических проявлений стероидной миопатии в модельных экспериментах на животных / В.В. Труш, В.И. Соболев, М.Н. Попов // Экспериментальная и клиническая фармакология. – 2024. – Т. 87, № 7. – С. 15-24. – DOI: 10.30906/0869-2092-2024-87-7-15-24

REFERENCES

1. Fielding R., Riede L., Lugo J.P. & Bellamine A. (2018) L-carnitine supplementation in recovery after exercise. *Nutrients*. 10(3), 349, doi: 10.3390/nu10030349
2. Nachvak, S.M., Shabanpur, M., Mostafai, R. & Heidari, M.R. (2023) L-Carnitine supplementation reduces biomarkers of inflammatory and oxidative stress in patients with coronary artery disease: a randomised controlled trial. *J. Arch. Physiol. Biochem.* 129(1), 61-68, doi: 10.1080/13813455.2020.1797102
3. Chiechio, S., Canonico, P. & Grilli, M. (2018) L-Acetylcarnitine: A Mechanistically Distinctive and Potentially Rapid-Acting Antidepressant Drug. *Int. J. Mol. Sci.* 19(11), 11-13, doi:10.3390/ijms19010011
4. El-Hattab, A.W. & Scaglia, F. (2015) Disorders of carnitine biosynthesis and transport. *Molecular Genetics and Metabolism*. 116(3), 107-112, doi: 10.1016/j.ymgme.2015.09.004
5. Gnoni, A., Longo, S., Gnoni, G.V. & Giudetti, A.M. (2020) Carnitine in human muscle bioenergetics: can carnitine supplementation improve physical exercise? *Molecules*. 25(1), 182, doi: 10.3390/molecules25010182
6. Naderi Noreini, S., Malmir, M., Ghafarizadeh, A., Faraji, T. & Bayat, R. (2021) Protective effect of L-carnitine on apoptosis, DNA fragmentation, membrane integrity and Lipid peroxidation of spermatozoa in the asthenoteratospermic men. *Andrologia*. 53(2), e13932, doi: 10.1111/and.13932
7. Jiao, H., Zhou, K., Zhao, J., Wang, X. & Lin, H. (2018) A high-caloric diet rich in soy oil alleviates oxidative damage of skeletal muscles induced by dexamethasone in chickens. *Redox. Rep.* 23(1), 68-82, doi: 10.1080/13510002.2017.1405494
8. Shaforostova, E.A., Gureev, A.P., Vitkalova, I.Yu. & Popov, V.N. (2021) The effect of l-carnitine depletion induced by long-term therapy of mice with meldonium on brain mitochondrial balance. *Biomedical Chemistry*. 67 (1), 74-80. (In Russian), doi: 10.18097/PBMC20216701074
9. Sangouni, A.A., Pakravanfar, F., Ghadiri-Anar, A., Nadjarzade, A., Fallahzade, H. & Hosseinzadeh, M. (2022) The effect of L-carnitine supplementation on insulin resistance, sex hormone-binding globulin and lipid profile in overweight/ obese women with polycystic ovary syndrome: A randomized clinical trial // *Eur. J. Nutr.* 61(3), 1199-1207, doi: 10.1007/s00394-021-02659-0
10. Kotov, S.V., Bunak, M.S., Borodataya, E.V. & Sidorova, O.P. (2018) Positive effect of energotropic therapy (L-carnitin, coenzim Q10) in patient with Becker muscular dystrophy based on the magnetic resonance imaging of limb muscles. *Practical Medicine*. 16(10), 117-120. (In Russian), doi: 10.32000/2072-1757-2018-10-117-120
11. Khutorskaya, I.A., Shaimardanova, G.F., Balashov, V.P., Abramov, V.N., Balashov, A.V., Bystrova, E.V. & Evstifeeva, I.A. (2024) Morphology of skeletal muscles during dynamic physical activity and correction with L-carnitine. [*Klin. eksp. morfologiya = Klin. Exp. Morphology*]. 13(4), 67-75. (In Russian), doi: 10.31088/CEM2024.13.4.67-75
12. Lu, Z., Wang, L., Huo, Zh., Li, Na, Tong, N., Chong, F., Liu, J., Zhang, Y. & Xu, H. (2024) L-Carnitine relieves cachexia-related skeletal muscle fibrosis by inducing deltex E3 ubiquitin ligase 3L to negatively regulate the Runx2/COL1A1 axis. *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*. 15(5), 1953-1964, doi: 10.1002/jcsm.13544

13. Yarizadh, H., Shab-Bidar, S., Zamani, B., Nazary Vanani, A., Baharlooi, H. & Djafarian, K. (2020) The Effect of L-Carnitine Supplementation on Exercise-Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Journal of the American College of Nutrition*. 39(5), 457-468, doi:10.1080/07315724.2019.1661804
14. Alesci, S., De Martino, M.U., Kino, T. & Ilias, I. (2004) L-Carnitine is a modulator of the glucocorticoid receptor alpha. *Ann. NY Acad. Sci.* 1024, 147-152, doi: 10.1196/annals.1321.012
15. Watson, M.L., Baehr, L.M., Reichardt, H.M., Tuckermann, J.P., Bodine, S.C. & Furlow, J.D. (2012) A cell-autonomous role for the glucocorticoid receptor in skeletal muscle atrophy induced by systemic glucocorticoid exposure. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 302(10), E1210-E1220, doi: 10.1152/ajpendo.00512.2011
16. Evans, A.M. & Fornasini, G. (2003) Pharmacokinetics of L-carnitine. *Clin. Pharmacokinet.* 42, 941-967, doi: 10.2165/00003088-200342110-00002
17. Kodentsova, V.M., Risnik, D.V., Kryukova, E.V. & Darius S.G. (2024) L-carnitine: food sources, adequate and clinically effective doses. *Medical Council.* 18(5), 320-328. (In Russian), doi: 10.21518/ms2024-028
18. Wall, B.T., Stephens, F.B., Constantin-Teodosiu, D., Marimuthu, K., Macdonald, I.A. & Greenhaff, P.L. (2011) Chronic oral ingestion of l-carnitine and carbohydrate increases muscle carnitine content and alters muscle fuel metabolism during exercise in humans. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 21(5), 385-397, doi: 10.1113/jphysiol.2010.201343
19. Satanovskaya, V.I., Pron'ko, P.S., Gaishmanova, A.V. & Miskevich, D.A. (2009) Effects of panthenol and carnitine on aldehyde metabolic enzymes in rats with tetrachloromethane-induced liver injury. [*Eksperimental'naya i klinicheskaya farmakologiya = Experimental and Clinical Pharmacology*]. 72(2), 39-40. (In Russian), doi: 10.30906/0869-2092-2009-72-2-39-40
20. Mironova, A.N. & Bunatyan, N.D. (2012) [*Rukovodstvo po provedeniyu doklinicheskikh issledovaniy lekarstvennykh sredstv = Guidelines for conducting preclinical studies of drugs*]. M.: Minzdrav RF, ZAO «Grif i K». 944 p. (In Russian)
21. Trush, V.V., Sobolev, V.I. & Popov, M.N. (2024) Modulation by biotin of some electrophysiological manifestations of steroid myopathy in animal model experiments. [*Eksperimental'naya i klinicheskaya farmakologiya = Experimental and clinical pharmacology*]. 87(7), 15-24. (In Russian), doi: 10.30906/0869-2092-2024-87-7-15-24

EFFECTIVENESS OF L-CARNITINE IN COMPENSATION OF ELECTROPHYSIOLOGICAL MANIFESTATIONS OF DEXAMETHASONE-INDUCED MYOPATHY IN EXPERIMENTS ON ANIMALS

V. V. Trush, V. I. Sobolev

The effectiveness of moderate therapeutic doses of L-carnitine (L-CAR, 100 mg/kg/day, intraperitoneally) to compensate for the negative effects of long-term administration of dexamethasone (DM, 0.25 mg/kg/2 days, intraperitoneally, for 10 to 60 days) on skeletal muscle of mixed type with predominantly glycolytic fibers (*m. tibial anterior*) was studied in mature female rats.

The preparations were administered to the animals of the experimental groups for 10 (10DM-, 10L-CAR-, and 10DM+L-CAR-groups), 30 (30DM-, 30L-CAR-, and 30DM+L-CAR-groups) and 60 (60DM, 60L-CAR, and 60DM+L-CAR groups) days at doses equivalent to moderate therapeutic doses for humans, intraperitoneally: L-carnitine at a dose of 100 mg/kg/day, DM at a dose of 0.25 mg/kg, once every 2 days.

The administration of L-carnitine in combination with dexamethasone prevented the development of signs of myopathic changes typical for the DM-groups: a decrease in muscle mass and the number of its activated motor units, a decrease in the amplitude of M-responses against the background of their polyphasia. In 30–60 % of individuals receiving dexamethasone with L-carnitine, a marked facilitation of synaptic transmission was observed at the optimal frequency (30 imp/s) of stimulation of the neuromuscular apparatus against the background of not reduced, as in the animals of the DM-group, but normal and even increased amplitude of M-responses (by 94–59 % after 10 and 60 days of administration of the pair of medicines, $p < 0.05$ relative to the control). In addition, for animals of the DM+L-CAR-groups, a much more significant post-tetanic facilitation was not characteristic than in the control against the background of a reduced amplitude of the 1st M-response in the series, typical for the DM-groups. All these facts indicate in favor of the absence of the initial blockade of synapses typical for the DM-groups with the complex use of dexamethasone with L-carnitine.

The use of L-carnitine in combination with dexamethasone somewhat reduced the incidence of pathologically significant depression of synaptic transmission at the optimal stimulation frequency (30 imp/s) of

the neuromuscular apparatus: this depression occurred in 20 % of individuals only in the 30DM+L-CAR-group, whereas with isolated use of dexamethasone it was recorded in all DM-groups with a frequency of 20–30 %. At the same time, after 30 and 60 days of combined use of dexamethasone with L-carnitine, a more pronounced decrease in the amplitude of M-responses during high-frequency stimulation (70 imp/s) of the peroneal nerve relative to the initial level was observed compared to the control ($p < 0.05$), indicating a decrease in synaptic lability. In the case of subchronic combined use of dexamethasone with L-carnitine (after 30–60 days), 50–30 % of individuals showed reduced reliability of synaptic transmission during low-frequency stimulation (4 imp/s) of the neuromuscular apparatus. This fact, against the background of signs of reduced synaptic lability, but the absence of signs of their initial blocking, indicates postsynaptic disorders in animals subchronically receiving dexamethasone with L-carnitine.

L-carnitine at a dose of 100 mg/kg/day, equivalent to a moderate therapeutic dose for humans (1.5 g/day), in model experiments on animals showed a fairly high efficiency in compensating for the electrophysiological manifestations of dexamethasone-induced myopathy.

Key words: skeletal muscle; dexamethasone; iatrogenic hypercortisolism; steroid myopathy; L-carnitine, rats.

Поступила в редакцию 24.02.2026 г.

Труш Вера Владимировна

доктор биологических наук, доцент,
заведующая кафедрой физиологии и биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: ver.trush@yandex.ru,
ORCID 0000-0001-8514-8431
SPIN-код: 1348-5996

Trush Vera Vladimirovna

Doctor of Biological Sciences,
Head of the Department of Physiology and Biophysics,
Donetsk state university, Donetsk, DPR, RF.

Соболев Валерий Иванович

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры здоровья и реабилитации
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского», г. Ялта, Крым, РФ.
E-mail: v.sobolev@mail.ru,
ORCID 0000-0001-9318-5224
SPIN-код: 3093-6730

Sobolev Valery Ivanovich

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



Антонина Сергеевна Алемасова
(10.07.1953 – 20.03.2026)

20 марта 2026 года перестало биться сердце нашей дорогой коллеги, учителя, заведующего кафедрой аналитической химии, доктора химических наук, профессора, члена Научного совета РАН по аналитической химии **Алемасовой Антонины Сергеевны**.

Антонина Сергеевна родилась 10 июля 1953 года в г. Жданов Донецкой области УССР. В 1975 году закончила с отличием химический факультет Донецкого государственного университета, поступила в аспирантуру кафедры аналитической химии. В 1981 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата химических наук, в 2000-м году – докторскую диссертацию, посвященную исследованиям высокотемпературных процессов превращения комплексообразователей и комплексов металлов в атомно-абсорбционном анализе. В 2003-м году получила звание профессора и возглавила кафедру аналитической химии, бессменным заведующим которой оставалась до 2025 года. С 2008 года – заведующий независимой аттестованной аналитической лабораторией.

Антонина Сергеевна – Почетный профессор Донецкого государственного университета. Награждена Знаком Министерства образования и науки Украины «Отличник образования Украины», почетными грамотами. В 2024 году избрана членом Научного совета РАН по аналитической химии.

Алемасова А.С. внесла значительный вклад в развитие отечественной науки в области аналитической химии. Заслуженный профессор Донецкого государственного университета – более 50 лет она проработала в университете и проявила себя как высокопрофессиональный специалист в области химии и химического образования.

Ее плодотворная многолетняя научная и педагогическая деятельность отражена в более 360 работах, в том числе 5 монографиях, 10 авторских свидетельствах и патентах на изобретения, статьях, 2 учебниках, 18 учебных пособиях, разработанном уникальном авторском курсе «Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия». Под ее руководством были защищены 4 кандидатские диссертации. В 2007–2020 годах организовывала и проводила Республиканский научно-методический семинар по проблемам преподавания химических дисциплин в высшей и средней школе. Являлась руководителем магистерской программы направления подготовки 04.04.01 Химия и автором основной профессиональной образовательной программы.

Под руководством **Алемасовой А.С.** создан научно-методический центр по атомно-абсорбционной спектроскопии, создана научная школа «Модификация высокотемпературных процессов образования свободных атомов в электротермической атомной абсорбции», выполнялись госбюджетные и многочисленные хоздоговорные темы, проведение арбитражных анализов, химическая и экологическая экспертизы по запросам предприятий и организаций Донецкого региона.

Инновационные разработки, выполненные под руководством **Алемасовой А.С.**, направлены на улучшение экологического состояния окружающей среды техногенного региона, сохранение здоровья населения, повышение эффективности промышленных предприятий.

Алемасова А.С. – член редколлегии научных журналов «Аналитика и контроль» (РФ, Екатеринбург); «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки» (РФ, ДНР, Донецк); «Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона» (РФ, ДНР, Донецк).

Антонина Сергеевна всегда будет для нас примером человека с безграничной преданностью своей профессии, неиссякаемым научным потенциалом, мудростью и целеустремленностью. Мы навсегда запоем ее неумную жизненную энергию, жизнерадостность, высокие душевные и этические качества. Светлая память о ней навсегда сохранится в наших сердцах.

Коллектив химического факультета Донецкого государственного университета выражает глубокие соболезнования родным и близким **Антонины Сергеевны Алемасовой.**

*Коллектив химического факультета
Донецкого государственного университета*



Валерий Иванович Сторожев
(03.07.1952 – 03.04.2026)

3 апреля 2026 года после тяжелой и продолжительной болезни ушел из жизни выдающийся ученый и талантливый педагог, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник образования, член Национального комитета РФ по теоретической и прикладной механике, **Сторожев Валерий Иванович**.

В.И. Сторожев родился 03 июля 1952 года в г. Тула. В 1956 году с семьей переехал на постоянное место жительства в г. Сталино (Донецк). Окончил математический факультет Донецкого государственного университета в 1975 году и с момента окончания работал на кафедре теории упругости и вычислительной математики (с 2019 года – имени академика А.С. Космодамианского) в должностях ассистента (1975–1979 гг.), старшего преподавателя (1979–1983 гг.), доцента (1983–1990 гг.), профессора (с 1990 г.). В 1979 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а в 1988 году – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В 1984 году ему было присвоено ученое звание доцента, а в 1991 году – ученое звание профессора.

С 2000 по 2013 годы работал в должности декана математического факультета (с ноября 2011 года – факультет математики и информационных технологий), а с 2004 года возглавлял кафедру теории упругости и вычислительной математики имени академика А.С. Космодамианского. С 2018 по 2023 годы был проректором по научной и инновационной деятельности ДонНУ (ДонГУ).

Сторожев Валерий Иванович – известный ученый в области математических проблем механики деформируемого твердого тела. В последнее время руководил госбюджетной научно-исследовательской темой «Численно-аналитические методы исследования волнового деформирования, ползучести, концентрации напряжений и

сопряжённых полей в новых классах анизотропных композитных и функционально-градиентных сред». Он являлся членом трех диссертационных советов, главным редактором научного журнала «Журнал теоретической и прикладной механики» и членом редакционных коллегий научных изданий «Труды ИПММ», «Механика твердого тела», «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки», членом ученых советов ДонГУ и ИПММ, председателем наградной комиссии Ученого совета университета, на протяжении более пятнадцати лет являлся ученым секретарем совета, более 25 лет входил в состав ученого совета факультета математики и информационных технологий.

Более 30 лет **В.И. Сторожев** руководил конкурсными научными проектами по механике. Являлся автором более 400 научных работ, в том числе 12 монографий, десяти патентов на изобретения и полезные модели, нескольких десятков учебно-методических изданий. Подготовил трех докторов и 20 кандидатов наук. Принимал участие во многих десятках Международных научных конференциях, в том числе в Европейских и Всемирных конгрессах по математике и механике.

В.И. Сторожев награжден медалью «За лучшую студенческую научную работу СССР» в области математических наук (1976), серебряной медалью ВДНХ СССР за монографию «Динамические задачи теории упругости для анизотропных тел» (1986), медалью «За трудовую доблесть» (1986), двумя грамотами министерства образования и науки, почетным знаком «Отличник образования». В марте 2010 года **Сторожеву Валерию Ивановичу** ему было присвоено почетное звание «Заслуженный профессор Донецкого национального университета».

Коллеги и студенты знали **Валерия Ивановича** как человека высочайшей эрудиции, безупречной честности, преданности своей профессии, мудростью и целеустремленностью. Светлая память о нем навсегда сохранится в наших сердцах, в его трудах и в достижениях его учеников.

Коллектив Донецкого государственного университета выражает искренние соболезнования родным и близким **Валерия Ивановича Сторожева**.

*Коллектив факультета математики и информационных технологий
Донецкого государственного университета*

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия А: Естественные науки**

2026. – № 1

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>, <http://dongu-vestnik01.ru/>
