

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

**Вестник  
Донецкого  
национального  
университета**



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ  
*Основан  
в 1997 году*

---

---

*Серия А:*  
**Естественные  
науки**

---

---

**2/2026**

---

---

**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. Zastavnyj*; Dr. of phys. and math., docent *A.V. Zyza*; Dr. of geogr. prof. *K.Sh. Kazeev*; Dr. of biol., prof. *V.N. Kalaev*; Cand. of biol., docent *E.A. Kalaeva*; Dr. of phys. and math., prof. *S.A. Kaloerov*; Dr. of biol., s.r. *O.E. 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. Moiseenko*; 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](mailto: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 17.11.2025 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 № 12 от 05.06.2026 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2026

# Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А: Естественные науки

№ 2

Донецк 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Механика*

*Калоеров С. А., Сероштанов А. В.* Концентрация изгибающих моментов в узкой пьезополосе с произвольно расположенными отверстиями, трещинами и выемами ..... 5

*Нескородев Р. Н., Зыза А. В., Мазнев А. В.* Моделирование определения упругих постоянных для слоистых анизотропных горных пород ..... 21

### *Химические науки*

*Кострюков С. Г., Файзрахманов Ш. А.* Количественное определение метокси- и гидроксизетокси-групп в гидроксизетилметилцеллюлозе методом ИК-Фурье-спектроскопии с калибровкой по данным ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии ..... 29

*Кочетова Л. Б., Кустова Т. П., Смирнова А. Е., Миннибаева И. М.* Квантово-химическое моделирование механизмов реакций валина и аспарагина с сульфонилхлоридами в газовой фазе ..... 38

*Gorbachev V. V., Belyaeva M. A., Smirnov A. A.* High temperatures when using aslt underestimate the shelf life of food ..... 47

### *Биологические науки*

*Аньшаков Н. И., Тамбовцева Р. В.* Пульсометрическая оценка перенесенного физиологического напряжения и объема выполненной механической работы при выполнении предельных силовых упражнений в разных режимах работы ..... 57

*Болдырева М. А.* Разработка подходов и инструментов мониторинга состояния здоровья обучающихся в новых условиях цифрового обучения ..... 66

*Ефремова Р. И., Спицин А. П.* Особенности центральной гемодинамики у лыжников с ваготоническим типом автономной нервной системы в годичном тренировочном цикле ..... 77

*Зарипова К. М., Тихонова Е. А.* Особенности распределения взвешенных веществ в прибрежных водах юга Камчатки в градиенте урбанизации побережья ..... 83

*Кишкань Р. В., Шебалков А. В.* Путеводитель по особо охраняемым природным территориям Донецкой Народной Республики ..... 92

*Мионов О. А., Тихонова Е. А.* Концентрация нефтяных углеводородов в прибрежных водах Крымского полуострова (Черное море) в доаварийный период ..... 100

*Мороз Д. Д., Станишевская Т. И.* Динамика показателей микроциркуляции крови после физических нагрузок ..... 106

|   |     |
|---|-----|
| <i>Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А.</i> Эффективность рекультивационных мероприятий по восстановлению техногенно-засолённых почв среднетаежной подзоны Западной Сибири: обзор методов и собственный опыт .....  | 115 |
| <i>Улесикова И. В., Щукина Н. А., Воронов В. В., Гринчук С. С., Мулик А. Б.</i> Результаты оценки стандартных показателей функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона у лиц с различным уровнем общей неспецифической реактивности организма (поисковое исследование) ..... | 124 |
| <i>Фрунзе О. В., Гриб А. С.</i> Влияние ионов меди на ростовые процессы некоторых видов декоративных травянистых растений .....   | 134 |

### ***Рецензии***

|  |     |
|--|-----|
| <i>Горецкий О. С., Корниенко В. О.</i> Рецензия на монографию «Культивируемая дендрофлора Юго-Восточного берега Крыма» ..... | 141 |
|--|-----|

---

## CONTENTS

### *Mechanics*

- Kaloerov S. A., Seroshtanov A. V.* Concentration of bending moments in a narrow piezo strip with arbitrary located holes, cracks and recesses ..... 5
- Neskorodev R. N., Zyza A. V., Maznev A. V.* Modeling the determination of elastic constants for layered anisotropic rocks ..... 21

### *Chemical sciences*

- Faizrakhmanov Sh. A., Kostryukov S. G.* Quantitative determination of methoxy and hydroxyethoxy groups in hydroxyethyl methyl cellulose by FTIR spectroscopy with calibration using  $^{13}\text{C}$  NMR data ..... 29
- Kochetova L. B., Kustova T. P., Smirnova A. E., Minnibaeva I. M.* Quantum-chemical modeling the mechanisms of reactions of valine and asparagine with sulfonyl chlorides in the gas phase ..... 38
- Горбачев В. В., Беляева М. А., Смирнов А. А.* Высокие температуры при использовании метода ASLT занижают срок годности продуктов ..... 47

### *Biological sciences*

- Anshakov N. I., Tambovtseva R. V.* Pulse measurement accuracy of the transferred connecting stress and the volume of chemical work performed during maximum strength exercises in different operating modes ..... 57
- Boldyreva M. A.* Development of approaches and tools for monitoring the health of students in the new conditions of digital learning ..... 66
- Efremova R. I., Spitsin A. P.* Features of central hemodynamics in skiers with vagotonic types of autonomous nervous system in the annual training cycle ..... 77
- Zaripova K. M., Tikhonova E. A.* Peculiarities of suspended matter distribution in the coastal waters of southern Kamchatka along the coastal urbanization gradient ..... 83
- Kishkan R. V., Shebalkov A. V.* Guide to the Specially Protected Natural Areas of the Donetsk People's Republic ..... 92
- Mironov O. A., Tikhonova E. A.* Oil hydrocarbons concentration in the coastal waters of the Crimean Peninsula (Black Sea) pre-accident period ..... 100
- Moroz D. D., Stanishevskaya T. I.* Dynamics of blood microcirculation indices following physical exercise ..... 106

|   |     |
|---|-----|
| <i>Nosova M. V., Seredina V. P., Stovbunik S. A.</i> Effectiveness of recultivation measures for restoration of technogenic-salinated soils in the middle taiga subzone of Western Siberia: review of methods and own experience .....  | 115 |
| <i>Ulesikova I. V., Shchukina N. A., Voronov V. V., Gringuk S. S., Mulik A. B.</i> Results of assessment of standard indicators of functional spectroscopy of the near-infrared diapason in persons with different levels of general nonspecific reactivity of the body (search research) ..... | 124 |
| <i>Frunze O. V., Grib A. S.</i> Effect of copper ions on growth processes of some ornamental herbaceous plants .....  | 134 |

### ***Reviews***

|  |     |
|--|-----|
| <i>Goretsky O. S., Kornienko V. O.</i> Review of the monograph «Cultivated Dendroflora of the South-Eastern Coast of Crimea" ..... | 141 |
|--|-----|

## М Е Х А Н И К А

УДК 539.3

DOI: 10.5281/zenodo.20799590

EDN: ZFPWGG

**КОНЦЕНТРАЦИЯ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ В УЗКОЙ ПЬЕЗОПОЛОСЕ  
С ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ,  
ТРЕЩИНАМИ И ВЫЕМАМИ**

© 2026. С. А. Калоеров, А. В. Сероштанов

С использованием комплексных потенциалов теории изгиба тонких пьезоплит решена задача об изгибе узкой полосы с произвольными отверстиями и трещинами, в том числе выходящими на прямолинейные границы. При этом функции, голоморфные вне отверстий и трещин, разложены в ряды Лорана, а функции, голоморфные в сплошной полосе, выбраны в виде сумм функций, голоморфных вне воображаемых симметричных контуров относительно верхней и нижней прямолинейных границ полосы. Определение неизвестных коэффициентов рядов обобщенным методом наименьших квадратов сведено к переопределенной системе линейных алгебраических уравнений, решаемой методом сингулярного разложения. Описаны результаты численных исследований для полосы с круговым отверстием, в том числе выходящим на одну из прямолинейных границ, для полосы с круговым отверстием и краевой трещиной из него в перемычке, в том числе выходящей на прямолинейную границу. Исследованы закономерности изменения электромагнитоупругого состояния плиты в зависимости от геометрических характеристик отверстий и трещин, их взаиморасположения. Установлено, что с приближением отверстия или трещины к прямолинейным границам значения изгибающих моментов в точках перемычки резко возрастают, незначительно изменяясь в других зонах полосы. Большая концентрация моментов наблюдается и в точках прямолинейных границ полосы вблизи перемычек. Значения этих моментов особенно велики в случае полосы с круговым отверстием и краевой трещиной из него. На значения изгибающих моментов значительно влияет учет пьезосвойств материала, особенно в зонах высокой концентрации изгибающих моментов, поэтому в этих случаях нельзя ограничиваться решением задачи теории упругости об изгибе плиты, а нужно решать задачу электромагнитоупругости.

**Ключевые слова:** тонкая пьезоплита, полоса, отверстия, трещины, комплексные потенциалы, обобщенный метод наименьших квадратов, концентрация изгибающих моментов, коэффициенты интенсивности моментов.

**Введение.** Тонкие пластинки с отверстиями и трещинами из пьезоматериалов получили широкое применение в качестве элементов различных конструкций современной науки и техники [1–5]. Под действием различных механических сил и электромагнитных полей около таких отверстий и трещин могут возникать высокие концентрации напряжений и индукций электрического и магнитного полей, что нужно учитывать при проектировании и эксплуатации конструкций. Следовательно, нужно иметь надежные методы определения электромагнитоупругого состояния (ЭМУС) пластин с различными отверстиями и трещинами.

Эти вопросы особенно актуальны для случая тонких пластин, эксплуатируемых в условиях их поперечного изгиба и называемых в этом случае тонкими плитами. К сожалению, до недавнего времени широкомасштабные исследования ЭМУС тонких пьезоплит с отверстиями и трещинами не проводились. Были решены лишь отдельные задачи для пьезоплит из материалов простейшей микроструктуры (с ограничениями на электромагнитные свойства) и геометрии (в основном сплошных или имеющих круговую границу) [6–16]. Так, для сплошной прямоугольной плиты были решены задачи о действии поперечной сосредоточенной силы во внутренней точке [9],

о действии по верхнему основанию различных непрерывных нагружений силовых [11] или электромагнитных [12], дано решение задачи для многослойной плиты с пористой сердцевиной [14]; были получены решения задач для круглой наноплиты с поверхностными эффектами [13], такими как поверхностная упругость, поверхностное остаточное напряжение, поверхностные пьезоэлектричество и пьезомагнетизм, а также задача для заземленной трансверсально-изотропной круговой кольцевой плиты под действием равномерного давления по верхнему основанию [16]; получено аналитическое решение задачи об изгибе бесконечной трансверсально-изотропной пьезоэлектрической плиты с круговым отверстием [8].

Что касается многосвязных тонких пластин, то исследования по определению их ЭМУС начали проводиться лишь в последние десятилетия. И здесь наиболее достоверные результаты получаются при использовании комплексных потенциалов электромагнитоупругости. Эти функции сначала были введены для общей двумерной и плоской задачи с их использованием при решении различных задач [17]. Несколько позже, в статье [18] были введены комплексные потенциалы теории изгиба тонких пьезоплит, с помощью которых были решены различные задачи для многосвязной плиты [19]. Они были использованы и при решении задач для многосвязной полуплоскости с точным удовлетворением граничным условиям методом интегралов типа Коши [20] для случая внутренних отверстий и трещин, и приближенным удовлетворением этим условиям [21] для случая, когда отверстия и трещины могут пересекать прямолинейную границу. В последнем случае граничные условия удовлетворялись на множестве «коллокационных» точек отрезка прямолинейной границы в зоне влияния отверстий и трещин на значения искомым величин вблизи этой границы. При этом как в первом, так и во втором случае граничные условия на контурах отверстий и трещин удовлетворялись обобщенным методом наименьших квадратов (ОМНК) [22], который заключается в том, что условия удовлетворяются в некотором наборе «коллокационных» точек с получением переопределенной системы линейных алгебраических уравнений с гораздо большим количеством уравнений, чем количество неизвестных.

В данной работе последний подход решения задачи распространен на пьезополосу с произвольными отверстиями и трещинами, которые в частных случаях не только сами могут пересекаться, но и пересекать прямолинейные границы полосы. Описаны результаты численных исследований для полосы с круговым отверстием, с круговым отверстием и краевой трещиной из него в перемычке, рассмотрены случаи полосы с круговым выемом, с круговым отверстием и разрезом между ним и прямолинейной границей.

**1. Постановка и решение задачи.** Рассмотрим пьезополосу, занимающую многосвязную область, ограниченную прямолинейными границами  $L^+$  (верхней),  $L^-$  (нижней) и контурами эллиптических отверстий  $L_l$  ( $l = \overline{1, \mathcal{L}}$ ) с полуосями  $a_l$ ,  $b_l$  (рис. 1). Эллипсы могут переходить в прямолинейные разрезы-трещины, пересекать прямолинейные границы, пересекаться между собой, аппроксимировать контуры отверстий произвольной конфигурации. Отнесем плиту к прямоугольной системе координат  $Oxy$  с началом в произвольной точке полосы и осью  $Ox$ , параллельной прямолинейным границам. Обозначим расстояния от начала координат до прямолинейных границ  $L^+$ ,  $L^-$  соответственно через  $h^+$  и  $h^-$ . Выберем локальные

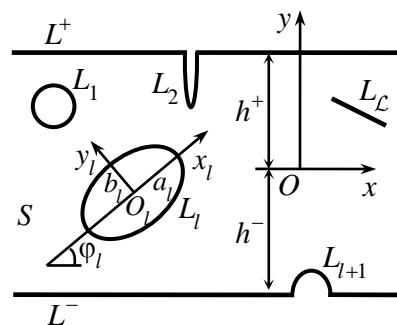


Рис. 1. Схема расчетной области

системы координат  $O_l x_l y_l$  с началами в центрах эллипсов  $L_l$  и осями  $O_l x_l$  вдоль полуосей  $a_l$ , отсчитываемых от положительного направления  $Ox$  против часовой стрелки. Тогда в системе  $Oxy$  уравнения  $L_l$  записываются в виде

$$x = x_{0l} + x_l \cos \varphi_l - y_l \sin \varphi_l, \quad y = y_{0l} + x_l \sin \varphi_l + y_l \cos \varphi_l, \quad (1)$$

где

$$x_l = a_l \cos \theta, \quad y_l = b_l \sin \theta;$$

$\varphi_l$  – угол между положительными направлениями осей  $Ox$  и  $O_l x_l$ , отсчитываемый от положительного направления  $Ox$  против часовой стрелки;  $x_{0l}$ ,  $y_{0l}$  – координаты начала локальной системы  $O_l x_l y_l$  в основной системе  $Oxy$ ;  $\theta$  – параметр параметрического задания эллипса, изменяющийся от 0 до  $2\pi$ .

Будем считать, что прямолинейные границы  $L^+$ ,  $L^-$  не нагружены, на контурах  $L_l$  действуют механические изгибающие моменты  $m_l(t)$ , поперечные силы  $p_l(t)$ , моменты электрической индукции  $m_{dl}(t)$  и магнитной индукции  $m_{bl}(t)$  так, что их главные векторы и главные моменты на каждом из контуров равны нулю. На бесконечности полоса не нагружена или изгибается механическими моментами  $M_x^\infty$  и моментами индукций  $M_{dx}^\infty$ ,  $M_{bx}^\infty$ ; моменты  $M_y^\infty$ ,  $H_{xy}^\infty$ ,  $M_{dy}^\infty$ ,  $M_{by}^\infty$  в силу незагруженности прямолинейной границы равны нулю.

Задачу по определению ЭМУС рассматриваемой полосы будем решать с использованием комплексных потенциалов электромагнитоупругости [18, 19]. В таком случае она сводится к нахождению функций  $W'_k(z_k)$  ( $k = \overline{1, 4}$ ) обобщенных комплексных переменных

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (2)$$

где  $\mu_k$  – корни известного характеристического уравнения 8-го порядка, из граничных условий

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ik} W'_k(t_k) = f_i(t) \quad (i = \overline{1, 4}), \quad (3)$$

в которых

$$(g_{1k}, g_{2k}, g_{3k}, g_{4k}) = (p_k / \mu_k, q_k, d_{yk}, b_{yk}),$$

$p_k, q_k, d_{yk}, b_{yk}$  – известные постоянные [18];

$$\begin{aligned} (f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)) = & \left( \int_0^s (m(s) dy + f(s) dx) - cx + c_1, \right. \\ & \left. \int_0^s (m(s) dx - f(s) dy) + cy + c_2, - \int_0^s m_d(s) ds + c_3, - \int_0^s m_b(s) ds + c_4 \right); \\ & f(s) = \int_0^s p(s) ds, \end{aligned}$$

на контурах отверстий;  $f_i(t) = c_i$  на прямолинейных границах;  $c$  – вещественная,  $c_i$  – комплексные постоянные.

Обозначим исходную многосвязную область, ограниченную прямолинейными границами и контурами отверстий через  $S$ , верхнюю полуплоскость с границей  $L^+$  – через  $S^+$ , нижнюю полуплоскость с границей  $L^-$  – через  $S^-$ . В областях комплексных переменных  $z_k$  ( $k = \overline{1, 4}$ ) исходной области  $S$  соответствуют многосвязные полосы  $S_k$  с прямолинейными границами  $L_k^+$ ,  $L_k^-$  и контурам отверстий контуры  $L_{kl}$ .

Функции  $W'_k(z_k)$  определены в многосвязных областях  $S_k$  и на основе общих представлений комплексных потенциалов [18, 20] их можно представить в виде

$$W'_k(z_k) = \Gamma_k z_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} W'_{kl}(z_k) + W_k'^+(z_k) + W_k'^-(z_k), \quad (4)$$

где  $\Gamma_k$  – постоянные, определяемые из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \left( p_k, q_k, r_k, d_{xk}, d_{yk}, b_{xk}, b_{yk}, \frac{1}{\mu_k} \right) \Gamma_k = \left( -M_x^\infty, 0, 0, -M_{dx}^\infty, 0, -M_{bx}^\infty, 0, 0 \right); \quad (5)$$

$r_k, d_{xk}, b_{xk}$  – известные постоянные [18], зависящие от коэффициентов деформации материала, пьезоэлектрических и пьезомагнитных модулей деформации и напряженностей, коэффициентов диэлектрической, магнитной и электромагнитной восприимчивостей;  $W'_{kl}(z_k)$  – функции, голоморфные вне  $L_{kl}$ ;  $W_k'^+(z_k)$  – функции, голоморфные в нижних полуплоскостях с границами  $L_k^+$ ;  $W_k'^-(z_k)$  – функции, голоморфные в верхних полуплоскостях с границами  $L_k^-$ .

Используя конформные отображения внешности единичных кругов  $|\zeta_{kl}| \geq 1$  на внешности эллипсов  $L_{kl}$

$$z_k = z_{kl} + R_{kl} (\zeta_{kl} + m_{kl} / \zeta_{kl}), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} z_{kl} &= x_{0l} + \mu_k y_{0l}, \\ R_{kl} &= (a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) + i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)) / 2, \\ m_{kl} &= (a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) - i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)) / 2R_{kl}, \end{aligned} \quad (7)$$

функции  $W'_{kl}(z_k)$ , голоморфные вне контуров  $L_{kl}$ , представим рядами Лорана вида

$$W'_{kl}(z_k) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{kln}}{\zeta_{kl}^n} \quad (8)$$

с неизвестными коэффициентами  $a_{kln}$ .

Для точек прямолинейных границ  $L^+$  и  $L_k^+$

$$\begin{aligned} x &= t, \quad y = i h^+, \quad t_k = x + \mu_k y = t + \mu_k h^+, \\ \overline{t_{k+q-1}} &= x + \overline{\mu_{k+q-1}} y = x + \mu_k h^+ + (\overline{\mu_{k+q-1}} - \mu_k) h^+ = t_k + (\overline{\mu_{k+q-1}} - \mu_k) h^+ \quad (q = \overline{1, 4}). \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая эти равенства, подставляя функции (4) в граничные условия (3) на прямолинейной границе  $L^+$  и применяя к получаемым равенствам метод интегралов типа Коши, для функций, голоморфных в нижних полуплоскостях, получаем выражения [20]

$$W_k'^+(z_k) = - \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{q=1}^4 \frac{\overline{r_{kk+q-1}} \overline{a_{k+q-1ln}}}{\left(\zeta_{k+q-1l}^+\right)^n}, \quad (10)$$

в которых  $\zeta_{k+q-1l}^+$  – переменные, определяемые из получаемых на основе (6) и (9) конформных отображений

$$z_k = -(\overline{\mu_{k+q-1}} - \mu_k) h^+ + \overline{z_{k+q-1l}} + \overline{R_{k+q-1l}} \left( \zeta_{k+q-1l}^+ + \overline{m_{k+q-1l}} / \zeta_{k+q-1l}^+ \right) \quad (q=1, 4) \quad (11)$$

внешностей соответствующих контуров  $L_{k+q-1l}^+$  верхних полуплоскостей с границами  $L_k^+$  на внешности единичных кругов  $|\zeta_{k+q-1l}^+| \geq 1$ .

При приближенном решении задачи в функциях (4) комплексные потенциалы  $W_k'^+(z_k)$ , голоморфные в нижних полуплоскостях с границей  $L_k^+$  выберем не в виде совокупности 4 функций как по формуле (10), а ограничимся лишь первыми функциями (при  $q=1$ ) [21], т. е. в виде

$$W_k'^+(z_k) = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{kln}}{\left(\zeta_{kl}^+\right)^n}, \quad (12)$$

где  $b_{kln} = \overline{r_{kk}} \overline{a_{kln}}$  – неизвестные постоянные, а  $\zeta_{kl}^+$  – переменные, определяемые из неявных зависимостей

$$z_k = -(\overline{\mu_k} - \mu_k) h^+ + \overline{z_{kl}} + \overline{R_{kl}} \left( \zeta_{kl}^+ + \overline{m_{kl}} / \zeta_{kl}^+ \right). \quad (13).$$

Аналогичным образом получаем представления голоморфных в верхних полуплоскостях с границами  $L_k^-$  функций

$$W_k'^-(z_k) = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_{kln}}{\left(\zeta_{kl}^-\right)^n}, \quad (14)$$

в которых  $c_{kln}$  – неизвестные постоянные;  $\zeta_{kl}^-$  – переменные, определяемые из неявных зависимостей

$$z_k = (\mu_k - \overline{\mu_k}) h^- + \overline{z_{kl}} + \overline{R_{kl}} \left( \zeta_{kl}^- + \overline{m_{kl}} / \zeta_{kl}^- \right). \quad (15)$$

Окончательно для комплексных потенциалов (4) будем иметь выражения

$$W_k'(z_k) = \Gamma_k z_k + \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_{kln} \varphi_{kln}(z_k) + b_{kln} \varphi_{kln}^+(z_k) + c_{kln} \varphi_{kln}^-(z_k) \right], \quad (16)$$

в которых  $\Gamma_k$  – постоянные, определяемые решением системы уравнений (5);

$$\varphi_{kln}(z_k) = \zeta_{kl}^{-n}, \quad \varphi_{kln}^+(z_k) = \left(\zeta_{kl}^+\right)^{-n}, \quad \varphi_{kln}^-(z_k) = \left(\zeta_{kl}^-\right)^{-n}; \quad (17)$$

$\zeta_{kl}$ ,  $\zeta_{kl}^+$ ,  $\zeta_{kl}^-$  – функции, вычисляемые из неявных зависимостей (6), (13), (15);  $a_{kln}$ ,  $b_{kln}$ ,  $c_{kln}$  – неизвестные коэффициенты разложений функций в ряды Лорана (8), (12), (14).

Неизвестные постоянные  $a_{kln}$ ,  $b_{kln}$ ,  $c_{kln}$  ( $k = \overline{1,4}$ ;  $l = \overline{1,\mathcal{L}}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ) определим из граничных условий на прямолинейных границах  $L^+$ ,  $L^-$  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  $c_l$ . На основе равенств (3) эти условия при дифференцировании по дуге контуров области имеют вид

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ikp} \delta_{k,s} W_k''(t_{kp}) = \frac{df_{ip}(t)}{ds}, \quad (i = \overline{1,4}; p = \overline{1,\mathcal{L}+2}). \quad (18)$$

При этом для точек контуров отверстий  $\delta_{k,s} = \frac{dt_{kp}}{ds} = \frac{x' + \mu_k y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}$ ;  $x'$ ,  $y'$  – производные переменных (1) по параметру  $\theta$  параметрического задания эллипсов;  $s$  – длина дуги контура, обходимого против часовой стрелки; для прямолинейных границ  $L^+$ ,  $L^-$ , где  $f_{ip}(t) = 0$ ,  $\delta_{k,s} = 1$ , правые части уравнений (18) равны нулю.

Граничным условиям (18) будем удовлетворять обобщенным методом наименьших квадратов [22, 23, 24]. Для этого выберем «коллокационные отрезки» на прямолинейных границах  $L^+$  и  $L^-$ , затем на них и на контурах отверстий и трещин  $L_l$  ( $l = \overline{1,\mathcal{L}}$ ) систему точек  $M_{pm}(x_{pm}, y_{pm})$  ( $m = \overline{1, M_p}$ ;  $p = \overline{1,\mathcal{L}+2}$ ), в которых удовлетворим соответствующим граничным условиям, подставив в них функции (16). Тогда для определения неизвестных постоянных  $a_{kln}$ ,  $b_{kln}$  и  $c_{kln}$  получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} \sum_{n=1}^{\infty} g_{ikp} \delta_{k,s} \left[ \phi'_{kln}(t_{kpm}) a_{kln} + \phi'_{kln}^+(t_{kpm}) b_{kln} + \phi'_{kln}^-(t_{kpm}) c_{kln} \right] = \\ = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g_{ikp} \delta_{k,s} \Gamma_k \quad (i = \overline{1,4}; m = \overline{1, M_p}; p = \overline{1,\mathcal{L}+2}). \end{aligned} \quad (19)$$

Кроме уравнений (19), для каждого контура отверстия должны выполняться уравнения

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 i a_{kp1} = 0 \quad (p = \overline{1,\mathcal{L}}), \quad (20)$$

следующие из условия однозначности прогиба при полном обходе контуров отверстий  $L_p$ .

Систему (19), дополненную уравнениями (20), будем решать использованием сингулярных разложений [25, 26]. После нахождения псевдорешений этой системы постоянные  $a_{kln}$ ,  $b_{kln}$  и  $c_{kln}$ , а, следовательно, и функции  $W_k'(z_k)$ , будут известными и по ним можно вычислять основные характеристики ЭМУС (моменты механические изгибающие, крутящий, индукций и перерезывающие силы на основных площадках) [18, 19].

По основным характеристикам можно найти также моменты на произвольных площадках. При этом, если некоторый эллипс  $L_l$  переходит в прямолинейный разрез-трещину, то для его концов можно вычислить также коэффициенты интенсивности моментов (КИМ).

Как частные случаи из приведенного решения задачи электромагнитоупругости (ЭМУ) следуют решения задач электроупругости (ЭУ), магнитоупругости (МУ) и теории упругости (ТУ). Эти решения получаются из приведенного решения, если в нем принять равными нулю соответственно пьезомагнитные модули деформации и напряженностей  $p_{ij}$ , коэффициенты магнитной и электромагнитной восприимчивостей  $v_{ij}$  (в задаче ЭУ), пьезоэлектрические модули деформации и напряженностей  $g_{ij}$  коэффициенты электромагнитной восприимчивостей  $v_{ij}$  (в задаче МУ) или и те и другие (в задаче ТУ). Но для проведения численных исследований во всех этих случаях можно пользоваться программой решения общей задачи электромагнитоупругости, проводя вычисления для модельного материала с постоянными

$$g'_{ij} = \lambda_g g_{ij}, \quad p'_{ij} = \lambda_p p_{ij}, \quad v'_{ij} = \lambda_{gp} v_{ij},$$

где  $\lambda_g$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_{gp}$  – пьезопараметры модельного материала. При этом для задач ЭМУ нужно принять  $\lambda_g = \lambda_p = \lambda_{gp} = 1$ , а для других задач, как следует из вычислительных экспериментов, эти параметры нужно принять такими:  $\lambda_g = 1$ ,  $\lambda_p = \lambda_{gp} \leq 10^{-3}$  для задач ЭУ;  $\lambda_p = 1$ ,  $\lambda_g = \lambda_{gp} \leq 10^{-3}$  для задач МУ;  $\lambda_p = \lambda_g = \lambda_{gp} \leq 10^{-3}$  для задач ТУ.

**2. Описание результатов численных исследований.** Были проведены исследования для плит из материалов: 1) композит на основе титаната бария-феррита (II) кобальта  $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  (материал М1) [27, 28]; композит, упругие, пьезоэлектрические и электрические постоянные которого соответствуют селениду кадмия  $\text{CdSe}$ , а пьезомагнитные и магнитные –  $\text{BaTiO}_3$  (М2) [29]; композит, упругие, пьезоэлектрические и электрические постоянные которого соответствуют PZT-4, а пьезомагнитные и магнитные –  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (М3) [29].

При проведении численных исследований количество членов в бесконечных рядах (19) для каждого отверстия  $L_p$  и «коллокационных точек»  $M_p$  на этих контурах и на «коллокационных отрезках» прямолинейных границ, для которых составлялись уравнения (19), увеличивалось до тех пор, пока граничные условия на контурах отверстий и на прямолинейных границах не удовлетворялись с достаточно высокой степенью точности (модуль абсолютной погрешности не превышал  $10^{-3}$ ). В качестве «коллокационных отрезков» на прямолинейных границах выбирались отрезки, за пределами которых влияние отверстий и трещин на значения исследуемых величин незначительно. В описываемых ниже случаях для такого удовлетворения граничным условиям необходимо было в указанных рядах оставлять от 10 до 120 членов, на каждом из контуров отверстий и на «коллокационных отрезках» прямолинейной границы брать от 50 до 500 «коллокационных точек». При этом в качестве «коллокационных отрезков» на прямолинейных границах были отрезки длины 1–3 диаметра основного концентратора моментов с центром в точке, где наиболее существенно влияние отверстий и трещин.

В табл. 1 для задач ЭМУ и ТУ изгиба моментами  $M_x^\infty = m_x$  полосы с центральным круговым отверстием радиуса  $a_1$  (рис. 2) с точностью до множителя  $m_x$  приведены значения изгибающих моментов в некоторых характерных точках полуплоскости в зависимости от отношения  $c_1/a_1$ , где  $c_1$  – длина перемычки между контуром отверстия и границей полуплоскости. При этом характерными были точки  $B(a_1, 0)$ ,  $C(0, a_1)$ ,  $D(0, a_1 + c_1/2)$ ,  $E^+(0, a_1 + c_1)$ ,  $L^+(a_1, a_1 + c_1)$ ,  $M^+(2a_1, a_1 + c_1)$ . Для наиболее пьезоактивного материала М2 во всех точках приведены значения моментов как для задачи ЭМУ, так для задачи ТУ. Для М1 и М3 эти значения даны лишь в точке В, где они претерпевают наибольшие изменения, и в точке С, где наблюдается наибольшая концентрация моментов.

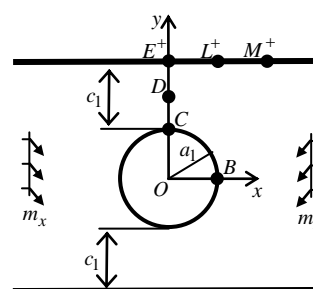


Рис. 2. Схема полосы с центральным круговым отверстием

Таблица 1  
Значения изгибающих моментов в некоторых точках полосы с центральным круговым отверстием в зависимости от  $c_1/a_1$

| Материал       | Точка          | Момент | Задача | $c_1/a_1$ |        |        |        |        |
|----------------|----------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|                |                |        |        | $\infty$  | 2      | 1      | 0,5    | 0,1    |
| М1             | B              | $M_y$  | ЭМУ    | 0,231     | 0,232  | 0,233  | 0,232  | 0,214  |
|                |                |        | ТУ     | 0,227     | 0,227  | 0,226  | 0,224  | 0,195  |
|                | C              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,813     | 1,998  | 2,341  | 3,151  | 9,608  |
|                |                |        | ТУ     | 1,810     | 1,994  | 2,335  | 3,143  | 9,589  |
|                | D              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,403  | 1,889  | 2,813  | 9,387  |
|                | E <sup>+</sup> | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,290  | 1,743  | 2,674  | 9,281  |
| L <sup>+</sup> | $M_x$          | ЭМУ    | 1,000  | 1,209     | 1,371  | 1,513  | 1,596  |        |
| M <sup>+</sup> | $M_x$          | ЭМУ    | 1,000  | 1,084     | 1,057  | 1,008  | 0,885  |        |
| М2             | B              | $M_y$  | ЭМУ    | 0,611     | 0,613  | 0,618  | 0,618  | 0,558  |
|                |                |        | ТУ     | 0,220     | 0,220  | 0,221  | 0,220  | 0,197  |
|                | C              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,810     | 1,974  | 2,306  | 3,122  | 9,467  |
|                |                |        | ТУ     | 1,713     | 1,908  | 2,267  | 3,098  | 9,377  |
|                | D              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,397  | 1,890  | 2,825  | 9,278  |
|                |                |        | ТУ     | 1,000     | 1,420  | 1,909  | 2,835  | 9,208  |
|                | E <sup>+</sup> | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,389  | 1,850  | 2,764  | 9,236  |
|                |                |        | ТУ     | 1,000     | 1,317  | 1,791  | 2,730  | 9,136  |
|                | L <sup>+</sup> | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,190  | 1,313  | 1,424  | 1,439  |
|                |                |        | ТУ     | 1,000     | 1,209  | 1,353  | 1,472  | 1,477  |
|                | M <sup>+</sup> | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,050  | 1,044  | 1,004  | 0,874  |
|                |                |        | ТУ     | 1,000     | 1,068  | 1,036  | 0,991  | 0,852  |
| М3             | B              | $M_y$  | ЭМУ    | 0,126     | 0,117  | 0,114  | 0,113  | 0,100  |
|                |                |        | ТУ     | -0,070    | -0,097 | -0,078 | -0,068 | -0,066 |
|                | C              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,463     | 1,696  | 2,101  | 2,977  | 9,268  |
|                |                |        | ТУ     | 1,421     | 1,646  | 2,048  | 2,912  | 8,963  |
|                | D              | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,429  | 1,903  | 2,832  | 9,178  |
|                | E <sup>+</sup> | $M_x$  | ЭМУ    | 1,000     | 1,447  | 1,936  | 2,855  | 9,187  |
| L <sup>+</sup> | $M_x$          | ЭМУ    | 1,000  | 1,167     | 1,237  | 1,295  | 1,238  |        |
| M <sup>+</sup> | $M_x$          | ЭМУ    | 1,000  | 0,993     | 0,975  | 0,957  | 0,839  |        |

На рис. 3 для полосы из наиболее пьезоактивного материала М2, для некоторых значений  $c_1/a_1$  изображены графики распределения  $M_s/m_x$  по контуру отверстия в зависимости от центрального угла  $\theta$ , отсчитываемого от оси  $Ox$  против часовой стрелки, а на рис. 4 изображены графики распределения моментов  $M_x/m_x$  по отрезку прямолинейной границы  $L^+$ .

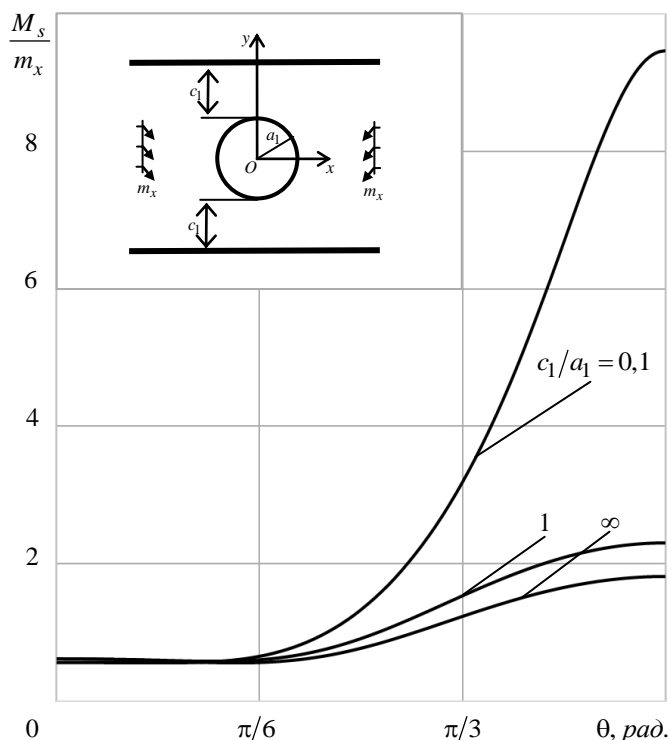


Рис. 3. Графики распределения  $M_s/m_x$  около контура кругового отверстия в полосе из материала М2 для некоторых значений  $c_1/a_1$

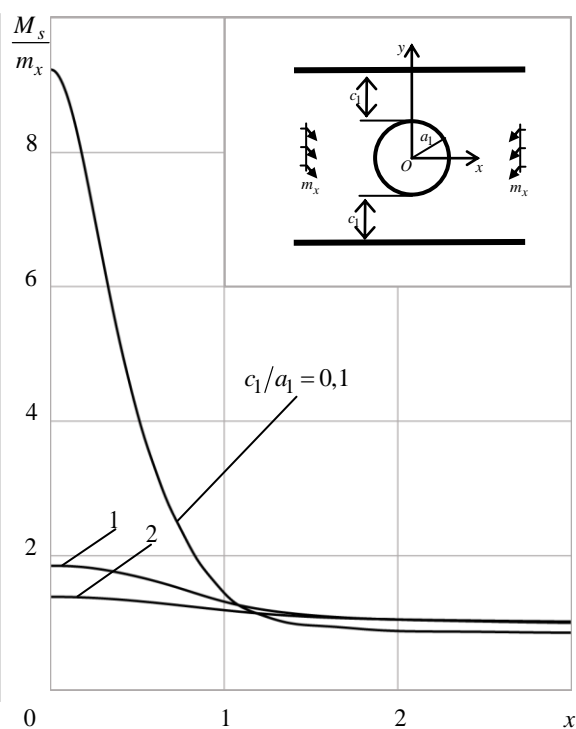


Рис. 4. Графики распределения  $M_x/m_x$  по отрезку прямолинейной границы  $L^+$  в полосе с круговым отверстием из материала М2 для некоторых значений  $c_1/a_1$

В табл. 2 для задачи ЭМУ об изгибе моментами  $M_x^\infty = m_x$  полосы из М2 с круговым отверстием радиуса  $a_1$  (рис. 5, а) с точностью до множителя  $m_x$  приведены значения изгибающих моментов в некоторых характерных точках в зависимости от отношения  $c_1/a_1$ , где  $c_1$  – длина перемычки между контуром отверстия и верхней границей полосы. При этом ширина полосы равна  $6a_1$ ,  $c_2 = 4a_1 - c_1$ , а характерными были точки  $A(0, -a_1)$ ,  $B(a_1, 0)$ ,  $C(0, a_1)$ ,  $E^+(0, a_1 + c_1)$ ,  $L^+(a_1, a_1 + c_1)$ ,  $M^+(2a_1, a_1 + c_1)$ ,  $E^-(0, -a_1 - c_2)$ ,  $L^-(a_1, -a_1 - c_2)$ ,  $M^-(2a_1, -a_1 - c_2)$ . Отрицательные значения  $c_1/a_1$  относятся к случаям полосы с выемом, например,  $c_1/a_1 = -1$  соответствует случаю, когда отверстие выходит на край до его горизонтального диаметра (рис. 5, б).

Таблица 2

Значения изгибающих моментов в некоторых точках полосы из материала М2 с круговым отверстием в зависимости от  $c_1/a_1$

| Точка | Момент | $c_1/a_1$ |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |        | 2         | 1     | 0,5   | 0,1   | 0,01  | -0,5  | -1    |
| A     | $M_x$  | 1,974     | 1,973 | 2,013 | 2,132 | 2,233 | 2,056 | 1,882 |
| B     | $M_y$  | 0,613     | 0,602 | 0,580 | 0,518 | 0,472 | 0,398 | 0,003 |
| C     | $M_x$  | 1,974     | 2,103 | 2,458 | 4,501 | 13,11 | –     | –     |
| $E^+$ | $M_x$  | 1,389     | 1,690 | 2,176 | 4,387 | 13,07 | –     | –     |
| $L^+$ | $M_x$  | 1,190     | 1,203 | 1,129 | 0,706 | 0,255 | 0,011 | 0,003 |
| $M^+$ | $M_x$  | 1,050     | 0,981 | 0,891 | 0,730 | 0,637 | 0,687 | 0,750 |
| $E^-$ | $M_x$  | 1,389     | 1,275 | 1,254 | 1,278 | 1,310 | 1,200 | 1,042 |
| $L^-$ | $M_x$  | 1,326     | 1,244 | 1,231 | 1,257 | 1,289 | 1,147 | 1,029 |
| $M^-$ | $M_x$  | 1,050     | 1,067 | 1,074 | 1,091 | 1,105 | 1,060 | 1,013 |

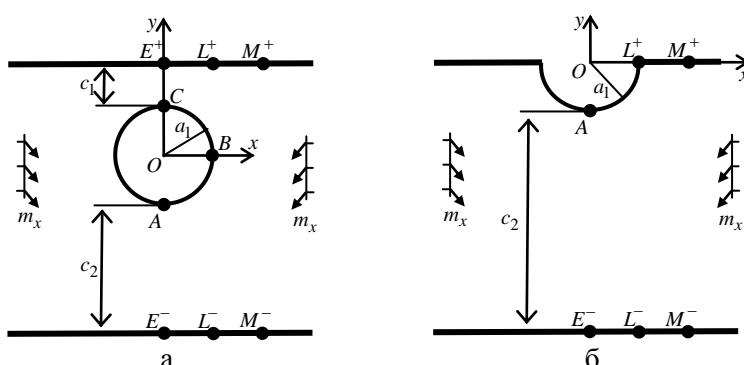


Рис. 5. Схема полосы, (а) – с круговым отверстием, (б) – с круговым выемом

Из данных табл. 1, 2 и рис. 3, 4 следует, что 1) влияние прямолинейных границ полосы на напряженное состояние около отверстия значительно, если отверстие находится на расстоянии менее диаметра отверстия от них ( $c_i/a_1 < 2$ ,  $i=1,2$ ); 2) сближение отверстия с некоторой прямолинейной границей приводит к значительному росту концентрации моментов (следовательно, и напряжений) в зоне между отверстием и этой прямолинейной границей с незначительными изменениями в других зонах; 3) при сближении отверстия с некоторой прямолинейной границей концентрация напряжений наблюдается и вблизи этой прямолинейной границы на расстояниях до радиуса отверстия; 4) при выходе отверстия на прямолинейную границу (рис. 5, б) концентрация моментов резко уменьшается вблизи выема как около контура отверстия, так и в точках прямолинейной границы; 5) на значения получаемых при решении задачи моментов значительно влияет учет пьезосвойств материала полосы; так для полосы из М1 с центральным круговым отверстием при  $c_i/a_1 = 0,1$  ( $i=1,2$ ) значения моментов в точке В для задачи ЭМУ отличаются от значений тех же моментов в задаче ТУ не более чем на 10 %, для полосы из М2 это отличие составляет уже 65 %, а для полосы из М3 эти моменты оказываются разных знаков – небольшое сжатие вблизи этой точки в задаче ТУ меняется на значительное растяжение в задаче ЭМУ; 6) в полосе с отверстием (при учете влияния обеих прямолинейных границ)

значения моментов получаются несколько выше, чем в полуплоскости (при учете влияния только одной прямолинейной границы).

В табл. 3 для задачи ЭМУ об изгибе моментами  $M_x^\infty = m_x$  полосы из материала М2 с круговым отверстием радиуса  $a_1$  и краевой трещиной длины  $l_2 = a_1$  (рис. 6, а) с точностью до множителя  $m_x$  приведены значения изгибающих моментов и КИМ  $k_1^+$  в некоторых характерных точках полосы в зависимости от отношения  $c_1/a_1$ , где  $c_1$  – длина перемычки между вершиной трещины и верхней границей полосы. При этом ширина полосы равна  $7a_1$ , а  $c_2 = 4a_1 - c_1$ . Характерными были точки  $A(0, -a_1)$ ,  $B(a_1, 0)$ ,  $F(0, 2a_1)$ ,  $E^+(0, 2a_1 + c_1)$ ,  $L^+(a_1, 2a_1 + c_1)$ ,  $M^+(2a_1, 2a_1 + c_1)$ ,  $E^-(0, -a_1 - c_2)$ ,  $L^-(a_1, -a_1 - c_2)$ ,  $M^-(2a_1, -a_1 - c_2)$ . Отрицательные значения  $c_1/a_1$  относятся к случаям разреза между отверстием и верхней границей полосы (рис. 6, б), например,  $c_1/a_1 = -0,5$  относится к случаю, когда длина разреза равна половине радиуса отверстия.

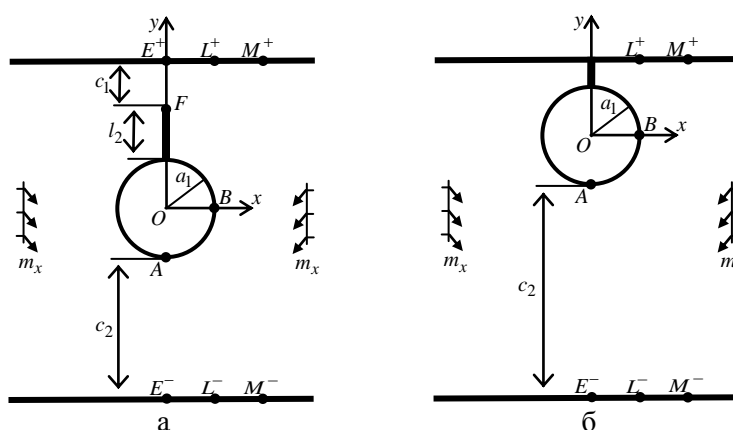


Рис. 6. Схема полосы с круговым отверстием и краевой трещиной из него

Таблица 3  
Значения изгибающих моментов в некоторых точках полосы из материала М2 с круговым отверстием и краевой трещиной из него в зависимости от  $c_1/a_1$

| Точка | Момент  | $c_1/a_1$ |       |       |       |       |       |
|-------|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |         | 2         | 1     | 0,5   | 0,1   | -0,1  | -0,5  |
| $A$   | $M_x$   | 2,044     | 2,064 | 2,103 | 2,112 | 2,621 | 2,461 |
| $B$   | $M_y$   | 0,625     | 0,629 | 0,615 | 0,549 | 0,535 | 0,526 |
| $F$   | $k_1^+$ | 1,392     | 1,853 | 2,215 | 2,533 | –     | –     |
| $D$   | $M_x$   | 1,482     | 2,008 | 2,937 | 9,008 | –     | –     |
| $E^+$ | $M_x$   | 1,569     | 2,045 | 3,022 | 9,053 | –     | –     |
| $L^+$ | $M_x$   | 1,146     | 1,221 | 1,148 | 0,865 | 0,121 | 0,012 |
| $M^+$ | $M_x$   | 1,084     | 1,006 | 0,946 | 0,790 | 0,502 | 0,406 |
| $E^-$ | $M_x$   | 1,487     | 1,344 | 1,282 | 1,258 | 1,468 | 1,351 |
| $L^-$ | $M_x$   | 1,251     | 1,192 | 1,231 | 1,184 | 1,370 | 1,275 |
| $M^-$ | $M_x$   | 1,085     | 1,097 | 1,123 | 1,074 | 1,200 | 1,142 |

Из данных табл. 3 и других полученных результатов следует, что сближение отверстия с краевой трещиной с границей полосы приводит к весьма высокой концентрации моментов в точках перемычки и в точках прямолинейной границы вблизи перемычки; при этом значительно увеличиваются значения КИМ для конца трещины; при выходе трещины на прямолинейную границу (полоса с отверстием и разрезом между ним и прямолинейной границей) концентрация моментов резко уменьшается.

**Заключение.** Таким образом, дано решение задачи об изгибе тонкой многосвязной пьезополосы с произвольно расположенными относительно друг друга и относительно прямолинейных границ отверстиями и трещинами, в том числе пересекающимися друг друга и прямолинейные границы. Для решения задачи использованы комплексные потенциалы теории изгиба тонких электромагнитоупругих плит [18, 21], их разложение в ряды Лорана, удовлетворение граничным условиям на контурах отверстий, трещин и на прямолинейных границах обобщенным методом наименьших квадратов. Описаны результаты численных исследований для полосы с круговым отверстием, в том числе выходящим на одну из прямолинейных границ, полосы с круговым отверстием и краевой трещиной из него в перемычке, в том числе выходящей на прямолинейную границу (случай полосы с круговым отверстием и разрезом между ним и одной из прямолинейных границ). Изучены закономерности изменения ЭМУС плиты в зависимости от ее материала и геометрических характеристик отверстий и трещин. Установлено, что, если отверстия и трещины располагаются на значительном расстоянии (более их диаметров) от одной из прямолинейных границ, то полученные результаты совпадают с аналогичными для многосвязной полуплоскости [20, 21], если же они располагаются на таком же удалении от обеих прямолинейных границ, то результаты оказываются такими, как для бесконечной многосвязной плиты. Также установлено, что на расчетные значения механических и индукционных изгибающих моментов значительно влияет учет пьезосвойств материала полосы и им пренебрегать нельзя.

Приведенное решение задачи для полосы может быть распространено на случаи конечных (в частном числе прямоугольных) пластин с произвольными отверстиями и трещинами. Установленные механические закономерности могут быть использованы специалистами в области проектирования и эксплуатации конструкций с элементами из пьезоматериалов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинкур, Д. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях / Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе // Физическая акустика. – М.: Мир, 1966. – Т. 1, ч. А. – С. 204–326.
2. Пятаков, А.П. Магнитоэлектрические материалы и их практическое применение / А. П. Пятаков // Бюл. Рос. магнит. о-ва. – 2006. – Т. 5, № 2. – С. 1–3.
3. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / C.-W. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan // J. Appl. Phys. – 2008. – V. 103, N 3. – P. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
4. Tian, R. Magnetoelectric properties of piezoelectric-piezomagnetic composites with elliptical nanofibers / R. Tian, J. Liu, X. Liu // Acta Mechanica Solida Sinica. – 2020. – V. 33. – P. 368–380. DOI: 10.1007/s10338-019-00129-z.
5. Srinivas, S. The effective magnetoelectric coefficients of polycrystalline multiferroic composites / S. Srinivas, Y.L. Jiang // Acta Mater. – 2005. – V. 53. – P. 4135–4142. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.014.

6. Eringen, A.C. *Electrodynamics of Continua I* / A.C. Eringen, G.A. Maugin. – New York: Springer, 1990. – 436 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-3226-1.
7. Ieşan, D. On the bending of piezoelectric plates with microstructure / D. Ieşan // *Acta Mech.* – 2008. – V. 198, N. 3. – P. 191–208. DOI: 10.1007/s00707-007-0527-8
8. Xu, S.-P. Bending of piezoelectric plates with a circular hole / S.-P. Xu, W. Wang // *Acta Mech.* – 2009. – V. 203. – P. 127–135. DOI: 10.1007/s00707-008-0025-7.
9. Liu, M.F. An exact deformation analysis for the magneto-electro-elastic fiber-reinforced thin plate / M.F. Liu // *Applied Mathematical Modelling.* – 2011. – V. 35, N. 5. – P. 2443–2461. DOI: 10.1016/j.apm.2010.11.044.
10. Gales, C. On the bending of plates in the electromagnetic theory of microstretch elasticity / C. Gales, N. Baroju // *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* – 2014. – V. 94, N. 1-2. – P. 55–71. DOI: 10.1002/zamm.201200219
11. Liu, M.-F. Exact solution for the bending deformations of layered magneto-electro-elastic laminates based on thin-plate formulation / M.-F. Liu // *International Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2016. – V. 3, N. 4. – P. 7-15.
12. Zhou, Y. Vibration and bending analysis of multiferroic rectangular plates using third-order shear deformation theory / Y. Zhou, J. Zhu // *Composite Structures.* – 2016. – V. 153. – P. 712–723. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.064.
13. Yang, Y. Bending and free vibration of a circular magneto-electro-elastic plate with surface effects / Y. Yang, X.-F. Li // *Int. J. Mech. Sci.* – 2019. – V. 157-158. – P. 858–871. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.029.
14. Moradi-Dastjerdi, R. Thermo-electro-mechanical behavior of an advanced smart lightweight sandwich plate / R. Morandi-Dastjerdi, K. Behdinin // *Aerospace Science and Technology.* – 2020. – V. 106. – P. 106–142. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106142.
15. Zheng, Y-F. Nonlinear bending analysis of magneto-electro-elastic rectangular plates using higher order shear deformation theory / Y-F. Zheng, L.-L. Xu, C.-P. Chen // *J. Mech. Sci. Technol.* – 2021. – V. 35, No. 3. – P. 1099–1108. – DOI: 10.1007/s12206-021-0223-y.
16. A transversely isotropic magneto-electro-elastic circular Kirchhoff plate model incorporating microstructure effect / W. Shen, G. Zhang, S. Gu, Y. Cong // *Acta Mechanica Solida Sinica.* – 2022. – V. 35, N. 2. – P. 185–197. DOI: 10.1007/s10338-021-00271-7.
17. Калоеров, С.А. Двумерные задачи электромагнитоупругости для многосвязных тел / С.А. Калоеров, А.В. Петренко. – Донецк: Юго-Восток, 2011. – 232 с.
18. Калоеров, С.А. Основные соотношения прикладной теории изгиба тонких электромагнитоупругих плит / С.А. Калоеров // *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки.* – 2022. – № 1. – С. 20–38.
19. Калоеров, С.А. Исследование электромагнитоупругого состояния конечной многосвязной тонкой плиты / С.А. Калоеров, А.В. Сероштанов // *Вестник ПНИПУ. Механика.* – 2023. – № 4. – С. 34–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.04
20. Калоеров С. А. Решение задачи о поперечном изгибе электромагнитоупругой полуплоскости с отверстиями и трещинами / С. А. Калоеров, А. В. Сероштанов // *Вестник ПНИПУ. Механика* – 2025. – № 1. – С. 20–33. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.1.02.
21. Калоеров, С.А. Решение задачи об изгибе многосвязной пьезополуплоскости с приближенным удовлетворением граничным условиям на прямолинейной границе / С.А. Калоеров, А.В. Сероштанов // *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки.* – 2024. – № 1. – С. 28-41. DOI:10.5281/zenodo.12527097.
22. Калоеров, С.А. Термовязкоупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки / С.А. Калоеров, О.А. Паршикова // *Прикладная механика.* – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 103–116.
23. Воеводин, В.В. Вычислительные основы линейной алгебры. / В.В. Воеводин. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
24. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулдер. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
25. Drmaç, Z. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 1 / Z. Drmaç, K. Veseliç // *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* – 2008. – V. 29, N. 4. – P. 1322–1342. DOI: 10.1137/050639193.
26. Drmaç, Z. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 2 / Z. Drmaç, K. Veseliç // *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* – 2008. – V. 29, N. 4. – P. 1343–1362. DOI: 10.1137/05063920X.
27. Tian, W.-Y. Multiple crack interaction problem in magneto-electro-elastic solids / W.-Y. Tian, U. Gabbert // *Europ. J. Mech. Pt A.* – 2004. – V. 23. – P. 599–614. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2004.02.002.

28. Yamamoto, Y. Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures / Y. Yamamoto, K. Miya. – Amsterdam: Elsevier Sci. North Holland, 1987. – 450 p.
29. Hou, P.F. Three-dimensional Greens function for a point heat source in two-phase transversely isotropic magneto-electro-thermo-elastic material / P.F. Hou, G.-H. Teng, H.-R. Chen // Mech. Materials. – 2009. – V. 41. – P. 329–338. DOI: 10.1016/j.mechmat.2008.12.001.

## REFERENCES

1. Berlincourt D., Curran D.R., and Jaffe H., Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers. Ed. by W. P. Mason, New York, Academic Press, *Physical Acoustics*, 1964, pp. 169-270.
2. Pyatakov A.P. Magnetolectric Materials and Their Application in Practice. *Bul. Ros. Magnit. Obshchestva*, 2006, Vol. 5, No. 2, pp.1-3.
3. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong Sh., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.*, 2008, Vol. 103, No. 3, pp. 031101. doi: 10.1063/1.2836410.
4. Tian R., Liu J., Liu X. Magnetolectric properties of piezoelectric-piezomagnetic composites with elliptical nanofibers. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2020, Vol. 33, pp. 368-380. doi: 10.1007/s10338-019-00126-2.
5. Srinivas S., Jiang Y.L. The effective magnetolectric coefficients of polycrystalline multiferroic composites. *Acta Mater*, 2005, Vol. 53, pp. 4135-4142. doi: 10.1016/j.actamat.2005.05.014.
6. Eringen A.C., Maugin G.A. Electrodynamics of Continua I. New York, *Springer*, 1990, 436 p. doi: 10.1007/978-1-4612-3226-1.
7. Ieşan D. On the bending of piezoelectric plates with microstructure. *Acta Mech.*, 2008, Vol. 198, No. 3, pp. 191-208. doi: 10.1007/s00707-007-0527-8.
8. Xu S.-P., Wang W. Bending of piezoelectric plates with a circular hole. *Acta Mech.*, 2009, Vol. 203., pp. 127-135. doi: 10.1007/s00707-008-0025-7.
9. Liu M.F. An exact deformation analysis for the magneto-electro-elastic fiber-reinforced thin plate. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, Vol. 35, No. 5, pp. 2443–2461. doi: 10.1016/j.apm.2010.11.044.
10. Gałęć C., Baroiu N. On the bending of plates in the electromagnetic theory of microstretch elasticity. *ZAMM, Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, Vol. 94, No. 1-2, pp. 55-71. doi: 10.1002/zamm.201200219.
11. Liu M.-F. Exact solution for the bending deformations of layered magneto-electro-elastic laminates based on thin-plate formulation. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, Vol. 3, No. 4, pp. 7-15.
12. Zhou Y., Zhu J. Vibration and bending analysis of multiferroic rectangular plates using third-order shear deformation theory. *Composite Structures*, 2016, V. 153, pp. 712–723. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.06.064.
13. Yang Y., Li X.-F. Bending and free vibration of a circular magneto-electro-elastic plate with surface effects. *Int. J. Mech. Sci.*, 2019, Vol. 157-158, pp. 858–871, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.029.
14. Moradi-Dastjerdi R., Behdinan K. Thermo-electro-mechanical behavior of an advanced smart lightweight sandwich plate. *Aerospace Science and Technology*, 2020, V. 106, pp. 106–142. doi: 10.1016/j.ast.2020.106142.
15. Zheng Y.-F., Xu L.-L., Chen C.-P. Nonlinear bending analysis of magneto-electro-elastic rectangular plates using higher order shear deformation theory. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2021, Vol. 35, No. 3, pp. 1099-1108. doi: 10.1007/s12206-021-0223-y.
16. Shen W., Zhang G., Gu Sh., Cong Y. A transversely isotropic magneto-electro-elastic circular Kirchhoff plate model incorporating microstructure effect. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2022, Vol. 35, No. 2, pp. 185-197. doi: 10.1007/s10338-021-00271-7.
17. Kaloerov S.A., Petrenko A.V., Two-dimensional problems of electromagnetoelasticity for multiply connected bodies [Dvumernye zadachi elektromagnitouprugosti dlya mnogosvyaznyh tel]. Donetsk, *Yugo-Vostok*, 2011, 232 p.
18. Kaloerov S.A. Osnovnye sootnosheniia prikladnoi teorii izgiba tonkikh elektromagnitouprugikh plit [The main relations of the applied theory of bending of thin electro-magneto-elastic plates]. *Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*, 2022, No. 1, pp. 20-38.
19. Kaloerov S.A., Seroshtanov A.V. Investigation of the electro-magneto-elastic state of a finite multiply connected thin plate. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, No. 4, pp. 34-44. doi: 10.15593/perm.mech/2023.4.04.
20. Kaloerov S.A., Seroshtanov A.V. Solving the problem of transverse bending of an electro-magneto-elastic half-plane with holes and cracks. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2025, No. 1, pp. 20–33. doi: 10.15593/perm.mech/2025.1.02.

21. Kaloerov S.A. Reshenie zadachi ob izgibe mnogosvjaznoj p'ezopoluploskosti s priblizhennym udovletvorenijem granichnym uslovijam na prjamolinejnoj granice [Solving the problem of bending a multi-connected piezo half-plane with approximate satisfaction of boundary conditions on a rectilinear boundary]. *Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*, 2024, No. 1, pp. 28-41. doi: 10.5281/zenodo.12527097.
22. Kaloerov S.A., Parshikova O.A., Thermoviscoelastic state of multiply connected anisotropic plates. *International Applied Mechanics*, 2012, Vol. 48, No. 3, pp. 319-331. doi: 10.1007/s10778-012-0523-0.
23. Voevodin V.V. Vychislitel'nye osnovy lineinoi algebry [Computational Basis of Linear Algebra]. Moscow, Nauka, 304 p.
24. Forsythe J. E., Malcolm M. A., and Moler C. B., Computer Methods for Mathematical Computations. *Prentice-Hall*, 1977.
25. Drmač Z., Veselič K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 1. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* 2008, vol. 29, no. 4, pp. 1322-1342. doi: 10.1137/050639193.
26. Drmač Z., Veselič K. New fast and accurate Jacobi SVD algorithm. 2. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* 2008, vol. 29, no. 4, pp. 1343-1362. doi: 10.1137/05063920X.
27. Tian W.-Y., Gabbert U. Multiple crack interaction problem in magneto-electroelastic solids. *Europ. J. Mech. Part A*, 2004, Vol. 23, pp. 599-614. doi: 10.1016/j.euromechsol.2004.02.002.
28. Yamamoto Y., Miya K. Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures, Amsterdam. *Elsevier Science-North Holland*, 1987, 450 p.
29. 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., pp. 329-338. doi: 10.1016/j.mechmat.2008.12.001.

#### CONCENTRATION OF BENDING MOMENTS IN A NARROW PIEZO STRIP WITH ARBITRARY LOCATED HOLES, CRACKS AND RECESSES

*S. A. Kaloerov, A. V. Seroshtanov*

Using complex potentials of the theory of bending of thin piezo plates, the problem of bending a narrow strip with arbitrary holes and cracks, including the output to rectilinear boundaries, is solved. In this case, functions that are holomorphic outside of holes and cracks are expanded in Laurent series, and functions that are holomorphic in a solid strip are chosen in the form of sums of functions that are holomorphic outside of imaginary symmetric contours relative to the upper and lower rectilinear boundaries of the strip. The determination of unknown coefficients of series by the generalized least squares method is reduced to an overdetermined system of linear algebraic equations solved by the singular value decomposition method. The results of numerical studies are described for a strip with a circular hole, including the output to one of the rectilinear boundaries, a strip with a circular hole and an edge crack from it in a jumper, including the output to a rectilinear boundary. The regularities of changes in the electromagnetoelastic state of the plate depending on the geometric characteristics of holes and cracks, their mutual location, are investigated. It has been established that as a hole or crack approaches a rectilinear boundary, the values of moments at the points of the jumper increase sharply, changing insignificantly in other zones of the strip. A high concentration of moments is also observed at the points of the rectilinear boundaries of the strip near the jumpers. The values of these moments are especially large in the case of a strip with a circular hole and an edge crack from it. The values of bending moments are significantly affected by taking into account the piezo properties of the material, especially in areas of high concentration of bending moments, therefore in these cases one cannot limit oneself to solving the problem of elasticity theory about the bending of the plate, but it is necessary to solve the problem of electro-magneto-elasticity.

**Keywords:** thin piezo plate, half-plane, holes, cracks, jumper, complex potentials, generalized least squares method, bending moment concentration, moment intensity factors.

*Поступила в редакцию 01.12.2025 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](mailto:kaloerov@mail.ru),

ORCID: 0000-0003-1339-6035

SPIN-код: 8113-1310

***Kaloerov Stefan A.***

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Theory of Elasticity and Computational Mathematics named acad. A. S. Kosmodamianskogo, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russia

***Сероштанов Александр Владимирович***

младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

E-mail: [aleks.serosht@gmail.com](mailto:aleks.serosht@gmail.com),

ORCID: 0000-0003-3545-3635

SPIN-код: 5323-5904

***Seroshtanov Aleksandr V.***

junior research assistant, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russia

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ ДЛЯ СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2026. Р. Н. Нескородев, А. В. Зыза, А. В. Мазнев

В работе рассмотрена модель массива горных пород, который является трансверсально-изотропной средой. Показано, что при прохождении выработок в различных направлениях относительно плоскости изотропии в породных массивах с наклонными слоями возникает задача как и для массива, обладающего самой общей анизотропией в отношении механических свойств материала.

**Ключевые слова:** горные породы, упругие постоянные, коэффициенты деформаций, трансверсально-изотропная среда, анизотропия, закон Гука.

**Введение.** Большинство горных пород имеет линейную связь между напряжениями и деформациями до нагрузок определенной величины. В этом случае для исследования напряженно-деформированного состояния в окружающих выработку породах можно использовать методы линейной теории упругости. Использование методов теории упругости анизотропного тела для решения задач о распределении напряжений около выработок дано в работах [1-4].

В данной работе рассмотрена модель массива горных пород, который является трансверсально-изотропной средой. Показано, что при прохождении выработок в различных направлениях относительно плоскости изотропии в породных массивах с наклонными слоями возникает задача как и для массива, обладающего самой общей анизотропией в отношении механических свойств материала.

**Выбор модели в механике горных пород с выработкой.** Горный массив в виде полупространства относится к прямоугольной декартовой системе координат  $Ox_1x_2x_3$ . Начало системы находится на глубине  $H$ , ось  $Ox_2$  направлена вертикально вверх, а плоскость  $Ox_1x_3$  совмещена с горизонтальной плоскостью, параллельной плоскости, ограничивающей полупространство.

Считается, что свойства горных пород различны в разных направлениях и для описания их поведения используется модель упругого анизотропного тела. Предполагается линейная связь между напряжениями и деформациями, выраженная обобщенным законом Гука [1]:

$$\varepsilon_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} \sigma_k \quad \text{или} \quad \sigma_i = \sum_{k=1}^6 A_{ik} \varepsilon_k \quad (i = \overline{1, 6}), \quad (1)$$

где  $a_{ik}$  – коэффициенты деформации, а  $A_{ik}$  – модули упругости.

Для компактной записи уравнений закона Гука в форме (1) использованы обозначения

$$\sigma = [\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_3}, \sigma_{x_2x_3}, \sigma_{x_1x_3}, \sigma_{x_1x_2}]^T = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]^T,$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \varepsilon_{x_3}, \gamma_{x_2x_3}, \gamma_{x_1x_3}, \gamma_{x_1x_2}]^T = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6]^T.$$

Формулы (1), выражающие закон Гука для анизотропного тела, можно записать приемом сокращенной (тензорной) записи. Для этого вводятся двойные цифровые индексы у напряжений и деформаций

$$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{13} = \sigma_{31}, \sigma_{12} = \sigma_{21} \text{ для } \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6;$$

$$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{23} = 2\varepsilon_{32}, 2\varepsilon_{13} = 2\varepsilon_{31}, 2\varepsilon_{12} = 2\varepsilon_{21} \text{ для } \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6.$$

Тогда первое уравнение закона Гука (1) примет вид [5]

$$\varepsilon_{ij} = c_{ijkp} \sigma_{kp} \quad (i, j, k, p = 1, 2, 3). \quad (2)$$

Предполагается, что в формуле (2) суммирование проводится по индексам, встречающимся дважды в правой части формулы, т.е. по  $k$  и  $p$ .

Для вычисления всех деформаций анизотропного материала в общем случае потребуется 81 значение упругих постоянных  $c_{ijkp}$ , образующих тензор четвертого ранга. Между этими постоянными существуют зависимости [5]

$$c_{ijkp} = c_{jikp} = c_{jipk} = c_{ijpk} = c_{kpij}, \quad (3)$$

что уменьшает число различных констант до 21.

С учетом равенств (3) уравнения (2) запишутся в форме [5]

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{1111} & c_{1122} & c_{1133} & 2c_{1123} & 2c_{1113} & 2c_{1112} \\ c_{2211} & c_{2222} & c_{2233} & 2c_{2223} & 2c_{2213} & 2c_{2212} \\ c_{3311} & c_{3322} & c_{3333} & 2c_{3323} & 2c_{3313} & 2c_{3312} \\ 2c_{2311} & 2c_{2322} & 2c_{2333} & 4c_{2323} & 4c_{2313} & 4c_{2312} \\ 2c_{1311} & 2c_{1322} & 2c_{1333} & 4c_{1323} & 4c_{1313} & 4c_{1312} \\ 2c_{1211} & 2c_{1222} & 2c_{1233} & 4c_{1223} & 4c_{1213} & 4c_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Сравнение соотношений (4) и первого уравнения закона Гука (1) указывает на правило перехода от одной формы записи к другой. Это осуществляется заменой пары индексов  $ij$  или  $kp$  одним индексом  $m$  или  $n$  в соответствии со схемой

$$\begin{matrix} ij, & kp = & 11 & 22 & 33 & 23,32 & 13,31 & 12,21 \\ m, & n = & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix}$$

Кроме того, это сравнение позволяет найти связь между величинами  $c_{ijkp}$  и  $a_{mn}$

$$\begin{aligned} c_{iikk} &= a_{ik}, & 2c_{ijkk} &= a_{mk} \quad (i \neq j), \\ 2c_{iikp} &= a_{in} \quad (k \neq p), \\ 4c_{ijkp} &= a_{mn} \quad (i \neq j, k \neq p). \end{aligned} \quad (5)$$

В дальнейшем, соотношения тензорной формы записи, как более удобные, будут использованы для преобразования упругих постоянных при повороте координатных осей.

Следует отметить, что чаще всего в литературе [6] исследуются два частных случая:

1) все направления, проходящие через каждую точку массива, эквивалентны в отношении деформационных свойств; тогда можно рассматривать модель изотропного массива;

2) через каждую точку породного массива проходит плоскость изотропии, в которой все направления являются эквивалентными в отношении деформационных свойств и массив будет трансверсально изотропным.

Далее рассматривается модель массива горных пород, который является трансверсально-изотропной средой. Такая среда может служить моделью слоистого массива осадочного происхождения с плоскостями изотропии, параллельными слоям. В предположении, что толщина слоя по крайней мере на порядок меньше характерного поперечного размера горной выработки, модель допускает ее эффективное использование при исследовании напряженно-деформированного состояния горных выработок.

Вводится прямоугольная декартова система координат  $Oxyz$  так, чтобы плоскость  $Oxz$  совпала с плоскостью  $ABCD$  (рис. 1). Если ось  $Oz$  направить нормально к плоскости изотропии, то уравнения закона Гука примут вид:

$$\varepsilon_i^1 = \sum_{k=1}^6 C_{ik} \sigma_k^1. \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{22} = 1/E_1, \quad C_{12} = C_{21} = -\nu_1/E_1, \quad C_{33} = 1/E_2, \\ C_{44} = C_{55} = 1/G_2, \quad C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32} = -\nu_2/E_2, \\ C_{i4} = C_{4i} = C_{5i} = C_{i5} = C_{i6} = C_{6i} = 0 \quad (i = \overline{1,3}), \\ C_{45} = C_{54} = C_{46} = C_{64} = C_{56} = C_{65} = 0, \quad C_{66} = 1/G_1 = 2(1 + \nu_1)/E_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$E_1, E_2$  – модули Юнга для растяжения - сжатия в направлении плоскости изотропии и нормальном к ней;

$\nu_1$  – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в этой плоскости, а  $\nu_2$  – при растяжении в направлении нормальном к плоскости изотропии;

$G_1, G_2$  – модули сдвига для плоскости изотропии и нормальной к ней.

Величины  $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_2$  определяются экспериментально путем одноосного сжатия породных образцов параллельно и перпендикулярно слоистости.

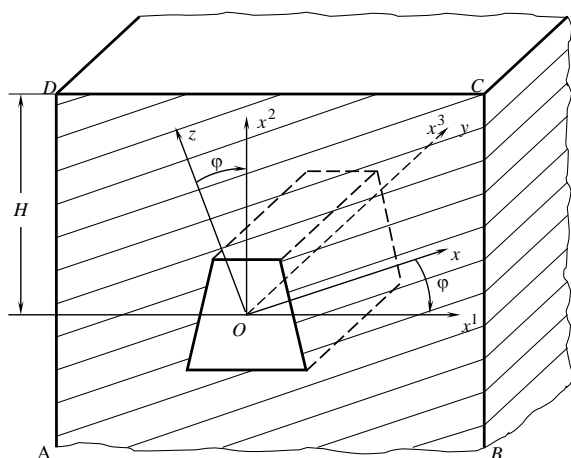


Рис. 1

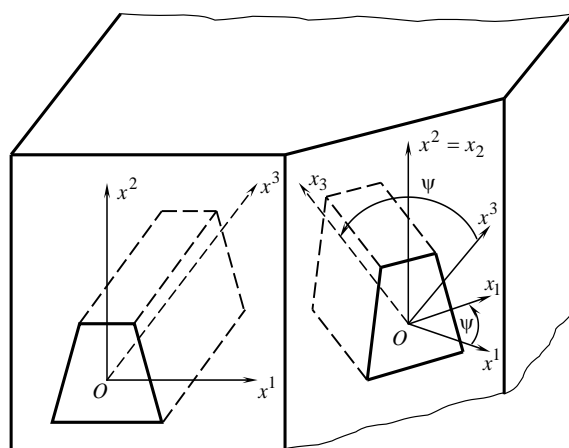


Рис. 2

Далее вводится величина  $E = 10^9 \times 9.81 \text{ Па} = 10^3 \times 9.81 \text{ МПа}$ . Тогда значения величин  $E_1, E_2, G_2$  можно представить через безразмерные величины  $e_1, e_2, g_2$  по формулам

$$E_1 = e_1 E, \quad E_2 = e_2 E, \quad G_2 = g_2 E. \quad (8)$$

Уравнения закона Гука (6) при учете соотношений (8) можно записать так:

$$E \varepsilon_i^1 = \sum_{k=1}^6 C_{ik}^1 \sigma_k^1 \quad \text{или} \quad E \varepsilon_{ij}^1 = c_{ijkp}^1 \sigma_{kp}^1. \quad (9)$$

Здесь величины  $C_{ik}^1$  безразмерны и получаются из соотношений (7) путем замены в них модулей  $E_1, E_2, G_2$  значениями  $e_1, e_2, g_2$ , а постоянные  $c_{ijkp}^1$  связаны с  $C_{ik}^1$  формулами вида (5).

Предполагается, что на глубине  $H$  пройдена протяженная горизонтальная выработка произвольного поперечного сечения (см. рис. 1) в направлении плоскости изотропии (оси  $Oy$ ). Систему координат удобнее связать с одной из выработок, что приводит к необходимости перейти к некоторой промежуточной системе  $Ox^1x^2x^3$  поворотом вокруг оси  $Oy$  на угол  $\varphi$ . Если выработка пройдена под углом  $\psi$  к плоскости изотропии, то необходимо ввести систему координат  $Ox_1x_2x_3$  (рис. 2). Она получается из системы координат  $Ox^1x^2x^3$  поворотом на угол  $\psi$  вокруг оси  $Ox^2$ . Возникает необходимость уравнения закона Гука, заданные в системе  $Oxuz$  записать в системе  $Ox_1x_2x_3$ .

**Преобразование упругих постоянных при повороте координатных осей.** Для решения задачи о напряженном состоянии горного массива с горизонтальной выработкой произвольного поперечного сечения, пройденной на глубине  $H$  в направлении плоскости изотропии вводится новая прямоугольная система координат  $Ox^1x^2x^3$ , у которой ось  $Ox^3$  совпадает с осью  $Oy$ . Эта система координат получается из введенной ранее путем поворота на угол  $\varphi$  вокруг оси  $Ox^3$ . Этот угол характеризует наклон плоскости изотропии к горизонту (см. рис. 1). Косинусы углов  $p_{ki}$  между осями ранее введенной и новой системами координат представлены в таблице 1.

Таблица 1

|       | $x$                                    | $y$                         | $z$                                     |
|-------|--|-----------------------------|---|
| $x^1$ | $p_{11} = \cos(x, x^1) = \cos \varphi$ | $p_{12} = \cos(y, x^1) = 0$ | $p_{13} = \cos(z, x^1) = -\sin \varphi$ |
| $x^2$ | $p_{21} = \cos(x, x^2) = \sin \varphi$ | $p_{22} = \cos(y, x^2) = 0$ | $p_{23} = \cos(z, x^2) = \cos \varphi$  |
| $x^3$ | $p_{31} = \cos(x, x^3) = 0$            | $p_{32} = \cos(y, x^3) = 1$ | $p_{33} = \cos(z, x^3) = 0$             |

Напряжения  $\sigma_{ij}^1$  в ранее введенной системе координат связаны с напряжениями  $\sigma_{kp}^*$  в новой системе координат соотношениями вида [1]

$$\sigma_{ij}^1 = P_{ki} P_{pj} \sigma_{kp}^* \quad (10)$$

В новой системе координат уравнения закона Гука запишутся так:

$$E \varepsilon_{ij}^* = c_{ijkp}^* \sigma_{kp}^* \quad (11)$$

Для определения коэффициентов  $c_{ijkp}^*$  используется выражение для упругого потенциала в ранее введенной и новой системах координат [5]:

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \sigma_{ij}^1 \varepsilon_{ij}^1 = \frac{1}{2} \sigma_{ij}^* \varepsilon_{ij}^* \quad (12)$$

Из равенства (12) при учете уравнений (9), (10) и (11) получается соотношение

$$\frac{1}{2} c_{ijkp}^* \sigma_{ij}^* \sigma_{kp}^* = \frac{1}{2E} c_{mnsr}^1 P_{im} P_{jn} P_{ks} P_{pr} \sigma_{ij}^* \sigma_{kp}^*,$$

из которого находятся искомые коэффициенты

$$c_{ijkp}^* = c_{mnsr}^1 P_{im} P_{jn} P_{ks} P_{pr} \quad (13)$$

Уравнения закона Гука в форме (11) в системе координат  $Ox^1x^2x^3$  могут быть использованы при определении напряженного состояния массива в окрестности выработки, продольная ось которой лежит в плоскости изотропии.

Если ось выработки направлена под произвольным углом к плоскости изотропии, т.е. к оси  $Ox^3$  (см. рис. 2), то нужно определить упругие постоянные массива в новой системе координат  $Ox_1x_2x_3$ , повернутой вокруг вертикальной оси  $Ox^2$  относительно системы  $Ox^1x^2x^3$  на угол  $\psi$ . Косинусы углов между осями этих координатных систем приведены в таблице 2.

Таблица 2

|       | $x^1$                                  | $x^2$                         | $x^3$                                 |
|-------|--|-------------------------------|---------------------------------------|
| $x_1$ | $k_{11} = \cos(x^1, x_1) = \cos \psi$  | $k_{12} = \cos(x^2, x_1) = 0$ | $k_{13} = \cos(x^3, x_1) = \sin \psi$ |
| $x_2$ | $k_{21} = \cos(x^1, x_2) = 0$          | $k_{22} = \cos(x^2, x_2) = 1$ | $k_{23} = \cos(x^3, x_2) = 0$         |
| $x_3$ | $k_{31} = \cos(x^1, x_3) = -\sin \psi$ | $k_{32} = \cos(x^2, x_3) = 0$ | $k_{33} = \cos(x^3, x_3) = \cos \psi$ |

В системе координат  $Ox_1x_2x_3$  уравнения закона Гука примут вид:

$$E \varepsilon_{ij} = c_{ijkp} \sigma_{kp} \quad (14)$$

Коэффициенты  $c_{ijkp}$ , входящие в уравнения (14), определяются способом, аналогичным приведенному выше. Окончательный результат запишется так:

$$c_{ijkp} = c_{mnsr}^* k_{im} k_{jn} k_{ks} k_{pr}.$$

Величины  $c_{mnsr}^*$  здесь определяются соотношениями (13), а значения коэффициентов  $k_{im}$  определены в таблице 2.

Найденные коэффициенты  $c_{ijkp}$  позволяют записать уравнения закона Гука в системе координат  $Ox_1x_2x_3$  в форме

$$E\varepsilon_i = \sum_{k=1}^6 b_{ik}\sigma_k \quad (i = \overline{1,6}). \quad (15)$$

Коэффициенты  $b_{ik}$  здесь связаны с  $c_{ijkp}$  соотношениями вида (5). Если обернуть матрицу коэффициентов  $b_{ik}$ , то получаются уравнения закона Гука в форме

$$\sigma_i = E \sum_{k=1}^6 B_{ik} \varepsilon_k. \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) совпадают с уравнениями (1) при  $b_{ik} / E = a_{ik}$ ,  $B_{ik}E = A_{ik}$ .

**Примеры анизотропных сред.** В таблицах 3–6 приведены варианты степени анизотропии для горных пород, сложенных из материала алевролит2 с техническими характеристиками:  $E_1 = 1.074$ ,  $E_2 = 0.523$ ,  $G_2 = 0.120$ ,  $\nu_1 = 0.413$ ,  $\nu_2 = 0.198$ . Коэффициенты уравнений закона Гука (15) –  $AM = b_{ik}$  и (16) –  $AB = B_{ik}$  даны в зависимости от величин углов  $\varphi$  и  $\psi$ .

Таблица 3

| $\varphi = 0, \quad \psi = 0$ |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AM                            |        |        |       |       |       | AB    |       |       |       |       |       |
| 0.931                         | -0.378 | -0.384 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.640 | 0.499 | 0.880 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| -0.378                        | 1.912  | -0.378 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.499 | 0.720 | 0.499 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| -0.384                        | -0.378 | 0.931  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.880 | 0.499 | 1.640 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.000                         | 0.000  | 0.000  | 8.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.120 | 0.000 | 0.000 |
| 0.000                         | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 2.631 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.380 | 0.000 |
| 0.000                         | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 8.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.120 |

Таблица 4

| $\varphi = 0, \quad \psi = 60^0$ |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AM                               |        |        |       |       |       | AB    |       |       |       |       |       |
| 0.931                            | -0.378 | -0.384 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.640 | 0.499 | 0.880 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| -0.378                           | 1.912  | -0.378 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.499 | 0.720 | 0.499 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| -0.384                           | -0.378 | 0.931  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.880 | 0.499 | 1.640 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.000                            | 0.000  | 0.000  | 8.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.120 | 0.000 | 0.000 |
| 0.000                            | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 2.631 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.380 | 0.000 |
| 0.000                            | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 8.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.120 |

Таблица 5

| $\varphi = 30^0, \psi = 0$ |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AM                         |        |        |        |        |        | AB    |       |       |       |       |       |
| 2.063                      | -1.266 | -0.383 | 0.000  | 0.000  | -1.449 | 1.245 | 0.664 | 0.785 | 0.000 | 0.000 | 0.294 |
| -1.266                     | 2.554  | -0.380 | 0.000  | 0.000  | 0.600  | 0.664 | 0.785 | 0.594 | 0.000 | 0.000 | 0.103 |
| -0.383                     | -0.380 | 0.931  | 0.000  | 0.000  | -0.005 | 0.785 | 0.594 | 1.640 | 0.000 | 0.000 | 0.165 |
| 0.000                      | 0.000  | 0.000  | 6.907  | -2.469 | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.112 | 0.000 |
| 0.000                      | 0.000  | 0.000  | -2.469 | 4.056  | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.112 | 0.315 | 0.000 |
| -1.449                     | 0.600  | -0.005 | 0.000  | 0.000  | 4.783  | 0.294 | 0.103 | 0.165 | 0.000 | 0.000 | 0.285 |

Таблица 6

| $\varphi = 30^0, \psi = 60^0$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AM                            |        |        |        |        |        | AB     |        |        |        |        |        |
| 1.269                         | -0.601 | -0.438 | -0.217 | -0.554 | -1.109 | 1.531  | 0.612  | 0.795  | -0.122 | 0.091  | 0.183  |
| -0.601                        | 2.554  | -1.044 | -0.519 | 0.767  | 0.300  | 0.612  | 0.785  | 0.647  | -0.089 | -0.030 | 0.051  |
| -0.438                        | -1.044 | 1.836  | 1.477  | -0.426 | 0.381  | 0.795  | 0.647  | 1.333  | -0.276 | 0.079  | 0.046  |
| -0.217                        | -0.519 | 1.477  | 5.314  | -0.466 | 0.919  | -0.122 | -0.089 | -0.276 | 0.260  | 0.020  | -0.043 |
| -0.554                        | 0.767  | -0.426 | -0.466 | 3.834  | 1.694  | 0.091  | -0.030 | 0.079  | 0.020  | 0.325  | -0.076 |
| -1.109                        | 0.300  | 0.381  | 0.919  | 1.694  | 6.376  | 0.183  | 0.051  | 0.046  | -0.043 | -0.076 | 0.210  |

Из таблиц 3 и 4 видно, что при  $\varphi = 0$  (плоскость изотропии горизонтальна) упругие постоянные не меняются при любом направлении выработок (угол  $\psi$  произволен). Если угол наклона плоскости изотропии отличен от нуля ( $\varphi \neq 0$ ), то в зависимости от направления оси выработки к плоскости изотропии, уравнения закона Гука в системе координат  $Ox_1x_2x_3$  будут иметь вид самой общей анизотропии. Это видно из таблиц 5 и, особенно, 6.

*Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» при финансовой поддержке Азово-Черноморского математического центра (Соглашение № 075-02-2026-1321 от 20 февраля 2026 года).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – Наука, 1977. – 416 с.
2. Ержанов Ж.С. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоевом массиве / Ж.С. Ержанов, Ш.М. Айталиев, Ж.К. Масанов. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 212 с.
3. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок / В.А. Полухин, С.А. Калоеров, Ю.Б. Грядущий, Е.С. Горянская. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 304 с.
4. Нескороев Р.Н. Численно-аналитическая методика расчета напряженно-деформированного состояния анизотропного горного массива с вертикальной выработкой / Р.Н. Нескороев // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2023. – №4 (85). – С. 31–38. – DOI: (10.24412/0136-4545-2023-4-31-38, EDN: YLXDQM).
5. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1988. – 270 с.

## REFERENCES

1. Lehnitsky S.G. Theory of elasticity of an anisotropic body / S.G. Lehnitsky. – Nauka Publ., 1977. – 416 p.
2. Yerzhanov Zh.S. Seismic stress state of underground structures in an anisotropic layered massif / Zh.S. Yerzhanov, Sh.M. Aytaliev, Zh.K. Masanov. – Alma Ata: Nauka Publ., 1980. – 212 p.
3. Polukhin V.A. Management of the stressed state of the rock mass and the stability of mining operations / V.A. Polukhin, S.A. Kaloerov, Yu.B. Future, E.S. Goryanskaya. – Donetsk: Yugo-Vostok Publ., 2002. – 304 p.
4. Neskoroedev R.N. Numerical and analytical methodology for calculating the stress-strain state of an anisotropic rock mass with vertical mining / R.N. Neskoroedev // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2023. – №4 (85). – Pp. 31-38. DOI (10.24412/0136-4545-2023-4-31-38) EDN (YLXDQM).
5. Ashkenazi E.K. Anisotropy of structural materials: A handbook / E.K. Ashkenazi, E.V. Ganov. – L.: Mechanical Engineering, 1980. – 247 p.
6. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures in examples and tasks / N.S. Bulychev. – M.: Nedra, 1988. – 270 p.

## MODELING THE DETERMINATION OF ELASTIC CONSTANTS FOR LAYERED ANISOTROPIC ROCKS

*R. N. Neskoroedev, A. V. Zyza, A. V. Maznev*

The paper considers a model of an array of rocks, which is a transversely isotropic medium. It is shown that when workings are carried out in different directions relative to the isotropy plane in rock massifs with inclined layers, a problem arises just as for an array with the most general anisotropy with respect to the mechanical properties of the material.

**Keywords:** rocks, elastic constants, deformation coefficients, transversally isotropic medium, anisotropy, Hooke's law.

*Поступила в редакцию 14.05.2026 г.*

### ***Нескороев Роман Николаевич***

доктор физико-математических наук, доцент,  
директор научно-образовательного  
математического центра «Математический центр  
ДонГУ», ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: nromn72@mail.ru  
ORCID 0009-0009-4575-677X  
SPIN-код: 1635-5128

### ***Neskoroedev Roman Nikolaevich***

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,  
Associate Professor,  
Director of the Scientific and Educational  
Mathematical Center «Mathematical Center of  
DonGU»,  
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

### ***Зыза Александр Васильевич***

доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры высшей математики и  
методики преподавания математики,  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: z9125494@mail.ru  
ORCID: 0009-0001-3452-4916,  
SPIN-код: 2573-9158

### ***Zyza Alexander Vasilyevich***

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,  
Associate Professor,  
Professor of the Department of Higher Mathematics  
and Methods of Teaching Mathematics,  
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

### ***Мазнев Александр Владимирович***

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры высшей математики и  
методики преподавания математики,  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: o.mazniev.dongu@mail.ru  
ORCID: 0009-0002-5602-3925,  
SPIN-код: 3620-3304

### ***Maznev Alexander Vladimirovich***

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,  
Full Professor,  
Professor of the Department of Higher Mathematics  
and Methods of Teaching Mathematics,  
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОКСИ- И ГИДРОКСИЭТОКСИ-ГРУПП В ГИДРОКСИЭТИЛМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЕ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ С КАЛИБРОВКОЙ ПО ДАННЫМ ЯМР <sup>13</sup>C СПЕКТРОСКОПИИ**

© 2026. С. Г. Кострюков, Ш. А. Файзрахманов

Разработана методика количественного определения метокси- и гидроксиэтокси-групп в гидроксиэтилметилцеллюлозе (ГЭМЦ) методом ИК-Фурье-спектроскопии с калибровкой по данным ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии. Исследовано 9 коммерческих образцов ГЭМЦ. Построены линейные регрессионные зависимости относительных интенсивностей полос 1373 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания CH<sub>3</sub>) и 1312 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) от содержания заместителей. Лучшие результаты получены при нормировке на полосу 949 см<sup>-1</sup> (скелетные колебания пиранозного цикла): для метокси-групп R<sup>2</sup> = 0,9515, RMSE = 0,284 %; для гидроксиэтокси-групп R<sup>2</sup> = 0,825, RMSE = 0,98 %. Валидация на трёх независимых образцах показала расхождение с референсными значениями, определенными из данных ЯМР <sup>13</sup>C спектров не более 1,8 % для метокси- и 0,7 % для гидроксиэтокси-групп, что приемлемо для скрининговых задач. Предложенный экспресс-метод может быть использован для входного контроля сырья.

**Ключевые слова:** гидроксиэтилметилцеллюлоза, степень замещения, молярное замещение, ИК-Фурье спектроскопия, ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопия, метокси-группы, гидроксиэтокси-группы, количественный анализ, калибровка.

**Введение.** Эфиры целлюлозы представляют собой обширную группу водорастворимых полимеров, получаемых химической модификацией природной целлюлозы. За счёт замещения гидроксильных групп на различные функциональные фрагменты (метильные, гидроксиэтильные, карбоксиметильные и другие) удаётся придавать материалу уникальные свойства, такие как водорастворимость, способность к гелеобразованию, а также регулировать вязкость и стабильность водных систем [1–3]. Неионогенные простые эфиры целлюлозы широко используются в строительстве [4], фармацевтике [5, 6] и пищевой промышленности [7, 8].

Физико-химические свойства ГЭМЦ определяются двумя ключевыми параметрами: степенью замещения (DS) – средним количеством замещённых гидроксильных групп на одно ангидроглюкозное звено, и молярным замещением (MS) – общим числом молей замещающего реагента на звено (с учётом образования олигомерных боковых цепей). Наиболее точным методом определения содержания заместителей в смешанных эфирах целлюлозы является ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопия, однако она требует стадии гидролиза образца сильной кислотой [9, 10] и дорогостоящего оборудования, что ограничивает её применение для рутинного входного контроля. Альтернативный подход – газожидкостная хроматография, основанная на расщеплении гидроксиэтоксильных и метоксильных фрагментов иодистоводородной кислотой с последующим определением образующихся иодэтана и иодметана [11], – также отличается трудоёмкостью. Кроме того, производители эфиров целлюлозы указывают не параметры замещения (DS и MS), а содержание метокси-,

гидроксиэтокси- и гидроксипропокси-групп в весовых процентах. В связи с этим актуальной задачей является создание экспресс-методик количественного определения именно этих групп, например, с помощью ИК-спектроскопии.

**Постановка задачи.** В связи с этим актуальной задачей является создание экспресс-методик количественного определения метокси- и гидроксиэтокси-групп в ГЭМЦ с помощью ИК-спектроскопии. Такая задача вполне реальна, поскольку ИК-спектроскопия чувствительна к изменению функционального состава и надмолекулярной структуры полимера [12]. Цель настоящей работы – разработать корреляционные зависимости между параметрами ИК-спектров ГЭМЦ и содержанием заместителей, определённым методом ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектроскопии, и на их основе создать алгоритмы расчёта для экспресс-анализа.

**Материалы и методы.** Исследовано несколько коммерческих образцов ГЭМЦ, различных производителей (Shandong Head Group, Dow (DOW Wolff), Shin-Etsu (SE Tylose), Shandong Eton New Material) (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика исследуемых образцов ГЭМЦ

| № | Марка ГЭМЦ             | Вязкость 2% р-ра, мПа·с | Производитель              |
|---|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | Headcel ME 15M         | 42000–60000             | Shandong Head Group        |
| 2 | Walocel MT 400 PFV     | 56000–65000             | Dow (DOW Wolff)            |
| 3 | Walocel xtra 40-50     | 40000–50000             | Dow (DOW Wolff)            |
| 4 | Tylose MHS 15000 P6    | 12000–18000             | Shin-Etsu (SE Tylose)      |
| 5 | Walocel MKX 60000 PF15 | 56000–71000             | Dow (DOW Wolff)            |
| 6 | Tylose MHS 150000 P4   | 120000–160000           | Shin-Etsu (SE Tylose)      |
| 7 | MH 2000 YP2            | 2000–2500               | Shandong Eton New Material |
| 8 | MH 30000 YP4           | 24000–36000             | Shandong Eton New Material |
| 9 | Tylose MB 15009 P2     | 14000–16000             | Shin-Etsu (SE Tylose)      |

Степень замещения (DS) метоксильными группами и молярное замещение (MS) гидроксиэтоксильными группами определяли с помощью ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектроскопии продуктов частичного гидролиза образцов ГЭМЦ (1-9) [9, 10].

**Методика гидролиза.** Для гидролиза 1,00 г образца ГЭМЦ растворяли в 100 мл дистиллированной воды. Затем к полученному раствору при перемешивании магнитной мешалкой добавили 6 мл 50 %-ной хлорной кислоты ( $\text{HClO}_4$ ). Полученный раствор кипятили с обратным холодильником при перемешивании 5 ч, затем охладили и кислоту нейтрализовали 10 %-ным раствором гидроксида калия до pH ~8–9. Затем раствор упаривали на роторном испарителе под вакуумом. Выпадающий в процессе испарения воды перхлорат калия периодически отфильтровывали. Последний раз  $\text{KClO}_4$  отделяли при достижении объема 5 мл. Полученный маточник упаривали досуха, остаток анализировали с помощью ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектроскопии (60 мг образца на 0,9 мл  $\text{D}_2\text{O}$ ).

Спектры ЯМР  $^{13}\text{C}$  гидролизатов образцов ГЭМЦ регистрировали на спектрометре JEOL JNM-ECX400 (9,39 Т, 100,5 МГц) для растворов в  $\text{D}_2\text{O}$  на частоте 100,5 МГц с использованием стандартной импульсной последовательности с увеличением времени релаксации ( $T_1$ ) до 5 с без использования эффекта NOE. В качестве реперных сигналов в спектрах использовали сигналы натриевой соли 4,4-диметил-4-силапентан-1-сульфоновой кислоты.

На основании полученных из ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектров значений DS и MS вычисляли содержание  $\text{OCH}_3$  и  $\text{OC}_2\text{H}_4\text{OH}$  по формулам 1 и 2:

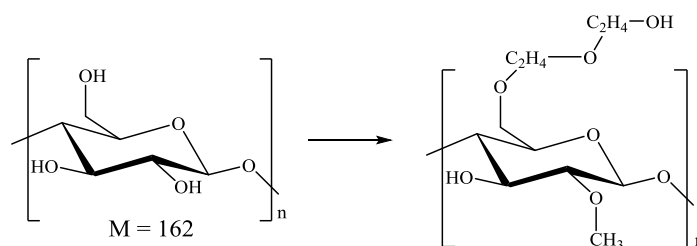
$$X_{\text{OCH}_3} = \frac{31\text{DS} \times 100\%}{M_0}, \quad (1)$$

$$X_{\text{OC}_2\text{H}_4\text{OH}} = \frac{61\text{MS} \times 100\%}{M_0}, \quad (2)$$

где DS – степень замещения метоксильными группами, MS – молярная степень замещения гидроксиэтоксильными группами,  $M_0$  – молекулярная масса элементарного звена гидроксиэтилметилцеллюлозы.

Молекулярную массу элементарного звена ГЭМЦ вычисляли по формуле  $M_0 = 162 + 14\text{DS} + 44\text{MS}$ . Здесь 162 – молекулярная масса незамещённого ангидроглюкозного звена ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ); 14 – прирост массы при замене гидроксильной группы на метоксигруппу ( $-\text{OCH}_3$  вместо  $-\text{OH}$ ), так как разница молярных масс  $\text{OCH}_3$  (31) и  $\text{OH}$  (17) составляет 14; 44 – прирост массы при замене на гидроксиэтоксигруппу ( $-\text{OC}_2\text{H}_4\text{OH}$  вместо  $-\text{OH}$ ), поскольку разница между массами  $\text{OC}_2\text{H}_4\text{OH}$  (61) и  $\text{OH}$  (17) равна 44. Коэффициенты 31 и 61 в формулах (1) и (2) – это молярные массы соответственно метоксильного и гидроксиэтоксильного заместителей.

На рис. 1 приведен один из вариантов структурной формулы ГЭМЦ и общая формула для расчета молекулярной массы элементарного звена.



$$M_{\text{ГЭМЦ}} = 162 + \text{DS} \times M(\text{CH}_3\text{OH}) - \text{DS} \times M(\text{H}_2\text{O}) + \text{MS} \times M(\text{HOC}_2\text{H}_4\text{OH}) - \text{MS} \times M(\text{H}_2\text{O})$$

Рис. 1. Структурная формула элементарного звена гидроксиэтилметилцеллюлозы (DS = 1, MS = 2) и расчёт его молекулярной массы

ИК-спектры пропускания регистрировали на Фурье-спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-08» (Люмэкс, Россия) в диапазоне  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2\text{ см}^{-1}$  (64 сканирования). Образцы готовили в виде тонких плёнок путём испарения 1 % раствора в воде, налитого в чашку Петри, высота слоя жидкости 4–5 мм. Для каждого образца выполнено 3 параллельных измерения.

Обработку ИК-спектров проводили в программе «СпектрАЛЮМ» версии 2.0.1.295. Относительные интенсивности полос рассчитывали, как отношение оптической плотности в максимуме характеристической полосы к оптической плотности полосы  $949\text{ см}^{-1}$  (скелетные колебания пиранозного цикла) [13] или к оптической плотности  $1649\text{ см}^{-1}$  (деформационные колебания адсорбированной воды).

**Результаты и обсуждение.** ИК-спектры всех образцов ГЭМЦ имеют характерные полосы: широкую полосу  $3600\text{--}3100\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{OH}$ -групп, вовлечённых в водородные связи), полосы  $2970\text{--}2880\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{CH}_3$  и  $\text{CH}_2$  групп),  $1460\text{ см}^{-1}$  (деформационные колебания  $\text{CH}_3$ ),  $1060\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{C}\text{--}\text{O}\text{--}\text{C}$  простых эфирных связей) и  $949\text{ см}^{-1}$  (скелетные колебания пиранозного цикла). Самая интенсивная область  $1150\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  отвечает валентным колебаниям  $\text{C}\text{--}\text{O}\text{--}\text{C}$ -связей, которые присутствуют как в пиранозном кольце, так и в

гликозидных связях между мономерными звеньями, а также в простых эфирных связях. Кроме того, сюда же попадают валентные колебания связей С–ОН. Из-за сильного перекрывания пиков и водородных связей эта область выглядит как одна мощная «раздутая» полоса, характерная для всех полисахаридов и их производных. Хотя эта полоса самая интенсивная, её сложный состав делает крайне неудобной для прямого количественного анализа содержания заместителей по сравнению с более изолированными, но менее интенсивными полосами.

Для решения поставленных задач нами были выбраны полоса  $1373\text{ см}^{-1}$ , которая соответствует симметричным деформационным колебаниям связи С–Н в метильных группах ( $-\text{CH}_3$ ) и полоса  $1312\text{ см}^{-1}$ , которая относится к деформационным колебаниям связей С–Н в метиленовых группах ( $-\text{CH}_2-$ ), входящих в состав гидроксиэтоксильных цепей ( $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ). На рис. 2 приведены ИК-спектры в диапазоне  $420-1800\text{ см}^{-1}$ .

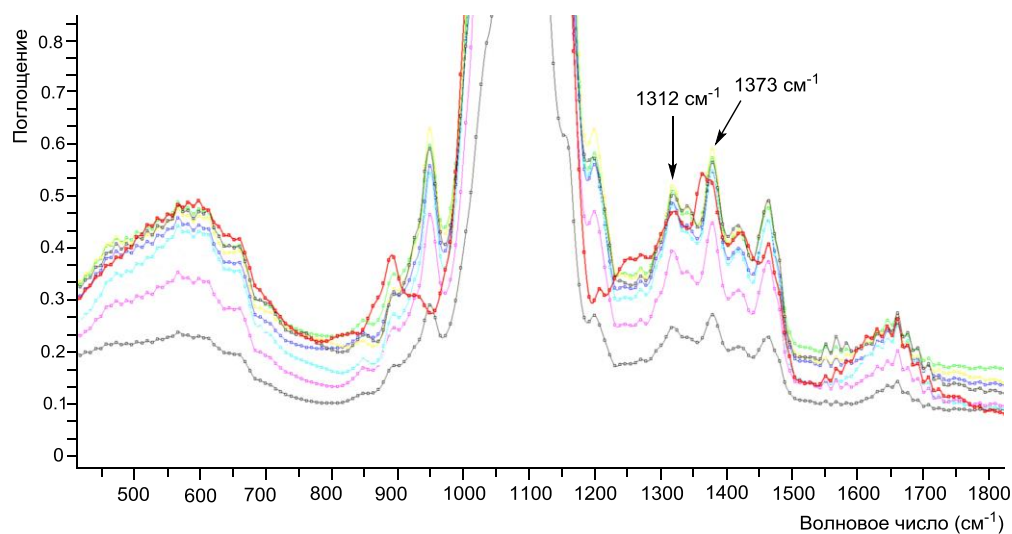


Рис. 2. ИК-спектры образцов ГЭМЦ (1-9) в диапазоне  $410-1800\text{ см}^{-1}$ .

В табл. 2 приведены рассчитанные спектральные параметры.

Таблица 2

Относительные интенсивности характеристических полос в ИК-спектрах ГЭМЦ и содержание функциональных групп по данным ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектроскопии

| № образца ГЭМЦ | Относительная интенсивность полосы $1373\text{ см}^{-1}$ |                     |  | Относительная интенсивность полосы $1312\text{ см}^{-1}$ |                     |  |
|----------------|--|---------------------|--|--|---------------------|--|
|                | $D_{1373}/D_{949}$                                       | $D_{1373}/D_{1650}$ | Содержание метокси-групп (ЯМР $^{13}\text{C}$ ), % | $D_{1312}/D_{949}$                                       | $D_{1312}/D_{1650}$ | Содержание гидроксиэтоксигрупп (ЯМР $^{13}\text{C}$ ), % |
| 1              | 0,976  | 2,266               | 26,0   | 0,826  | 2,021               | 8,2  |
| 2              | 0,925  | 2,202               | 24,6   | 0,720  | 1,932               | 5,4  |
| 3              | 0,987  | 2,301               | 27,1   | 0,892  | 2,276               | 12,1   |
| 4              | 0,918  | 2,155               | 23,5   | 0,863  | 2,050               | 11,3   |
| 5              | 0,930  | 2,055               | 24,6   | 0,816  | 2,015               | 7,8  |
| 6              | 0,930  | 2,105               | 24,6   | 0,833  | 2,107               | 9,5  |
| 7              | 0,991  | 2,434               | 27,1   | 0,792  | 1,951               | 5,4  |
| 8              | 0,912  | 2,063               | 23,5   | 0,856  | 2,192               | 11,3   |
| 9              | 0,942  | 2,215               | 24,6   | 0,835  | 2,149               | 10,1   |

Для установления количественных зависимостей между параметрами ИК-спектров и содержанием заместителей использован классический регрессионный анализ. В качестве предикторов использованы относительные интенсивности характеристических полос поглощения. Получены следующие линейные модели (уравнения 3–6).

Для метокси-групп (нормировка на полосу  $949\text{ см}^{-1}$ ,  $X = D_{1373}/D_{949}$ ):

$$Y = 43,47 \cdot X - 16,04. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9515$ , среднеквадратичная ошибка предсказания  $RMSE = 0,284\%$ .

Для метокси-групп (нормировка на полосу  $1650\text{ см}^{-1}$ ,  $X = D_{1373}/D_{1650}$ ):

$$Y = 4,38 + 9,40 \cdot X, \quad (4)$$

$$R^2 = 0,714, RMSE = 0,689\%.$$

Для гидроксиэтокси-групп (нормировка на полосу  $949\text{ см}^{-1}$ ,  $X = D_{1312}/D_{949}$ ):

$$Y = 46,15 \cdot X - 29,11, \quad (5)$$

$$R^2 = 0,825, RMSE = 0,98\%.$$

Для гидроксиэтокси-групп (нормировка на полосу  $1650\text{ см}^{-1}$ ,  $X = D_{1312}/D_{1650}$ ):

$$Y = -31,28 + 19,40 \cdot X, \quad (6)$$

$$R^2 = 0,785, RMSE = 1,09\%.$$

Таким образом, наилучшие результаты (уравнения 3 и 5) достигнуты при нормировке на полосу  $949\text{ см}^{-1}$ . Для метокси-групп модель демонстрирует отличное качество, для гидроксиэтокси-групп – хорошее, что может быть связано с наложением дополнительных полос.

Для проверки предсказательной способности разработанных калибровочных моделей проанализированы три дополнительных образца ГЭМЦ, не входивших в обучающую выборку (Tylose MH 300 P2, Tylose MHS 150000, Walocel MKX 60000). Реальное содержание заместителей определяли по спектрам ЯМР  $^{13}\text{C}$  образцов, подвергнутых гидролизу хлорной кислотой. ИК-спектры новых образцов регистрировали в тех же условиях, рассчитывали относительные интенсивности полос и предсказывали содержание по уравнениям 3 и 5. На рис. 3 представлены ИК-спектры этих образцов.

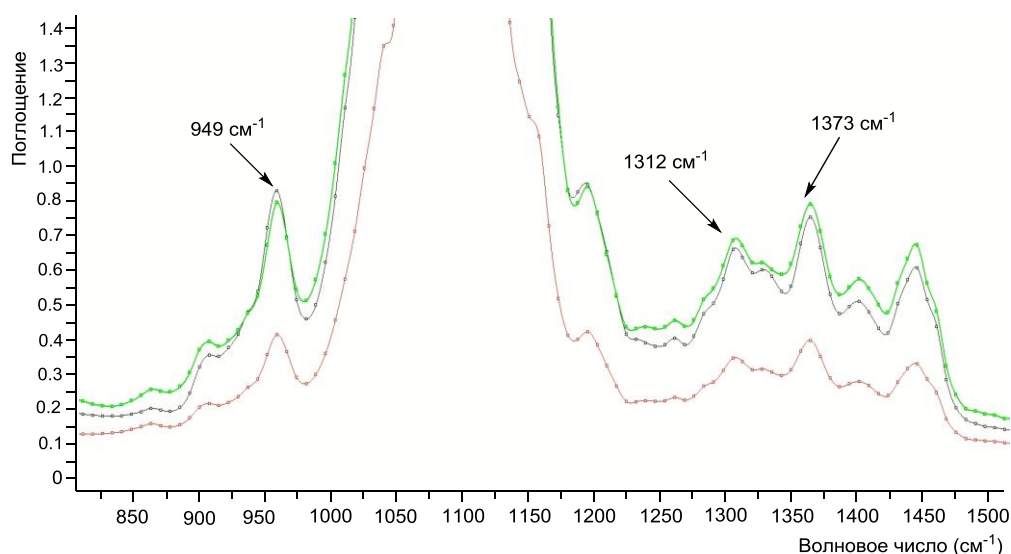


Рис. 3. ИК спектры пленок, полученных из Tylose MH 300 P2, Tylose MHS 150000, Walocel MKX 60000, с указанием аналитических полос.

Результаты валидации приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты валидации на независимых образцах

| Образец                | Содержание OCH <sub>3</sub> , % |                     |      | Содержание OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH, % |                     |      |
|------------------------|---------------------------------|---------------------|------|---|---------------------|------|
|                        | паспорт                         | ЯМР <sup>13</sup> C | ИК   | паспорт   | ЯМР <sup>13</sup> C | ИК   |
| Tylose MH 300 P2 (10)  | 24,0 – 30,0                     | 25,9                | 25,3 | 3,0 – 12,0  | 6,8                 | 7,3  |
| Tylose MHS 150000 (11) | 22,0 – 27,0                     | 24,8                | 25,6 | 6,0 – 12,0  | 8,2                 | 8,9  |
| Walocel MKX 60000 (12) | 20,0 – 25,0                     | 25,4                | 27,2 | 4,0 – 12,0  | 10,2                | 10,5 |

В качестве примера на рис. 4 приведён спектр ЯМР <sup>13</sup>C образца ГЭМЦ (11) после гидролиза.

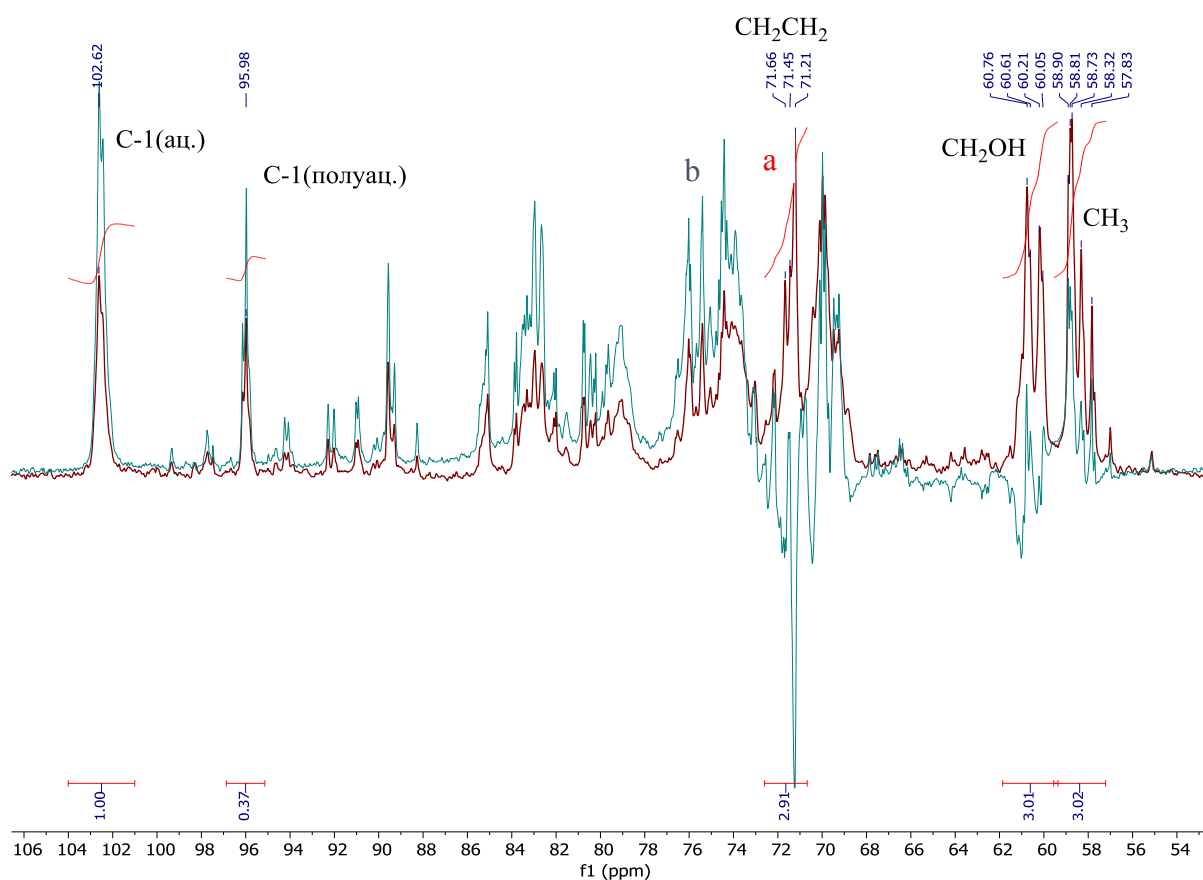


Рис. 4. ЯМР <sup>13</sup>C спектры продуктов кислотно-катализируемого гидролиза Tylose MHS 150000 в D<sub>2</sub>O (2 % HClO<sub>4</sub>, 90 мин, 100 °C): а – обычный спектр, б – спектр с DEPT135.

Используя спектр ЯМР <sup>13</sup>C, были рассчитаны степень замещения по метоксильным и гидроксиэтоксильным группам. На рисунке отмечены сигналы атомов углерода C-1, относительно которых определяли параметры замещения. С помощью методики DEPT135 однозначно идентифицированы сигналы метиленовых групп. Подробная процедура расчёта параметров замещения в ГЭМЦ описана в работах [9, 10].

Степень замещения (DS) метильными группами была рассчитана, как отношение суммарной интенсивности всех сигналов, принадлежащих метоксильным группам 57,7–59,0 м.д., к суммарной интенсивности ацетальных и полуацетальных атомов углерода (формула 5):

$$DS = \frac{I_{57,4-59,3}}{I_{101,6-103,5} + I_{95,4-96,6} + I_{91,8-92,5}}. \quad (5)$$

Молярное замещение гидроксиэтильными группами (MS) вычисляли как отношение интенсивности всех атомов углерода в гидроксиэтоксильных фрагментах: 70,3–72 м.д. (CH<sub>2</sub>-группы, не содержащие гидроксила), и 60,6–61,3 м.д. (CH<sub>2</sub>ОН-группы) к двойной интенсивности ацетальных и полуацетальных атомов углерода (формула 6):

$$MS = \frac{I_{70,3-72,0} + I_{60,6-61,3}}{2(I_{101,6-103,5} + I_{95,4-96,6} + I_{91,8-92,5})}. \quad (6)$$

В формулах 5 и 6 символом *I* обозначена интегральная интенсивность соответствующих областей.

Таким образом, в результате проведённого исследования установлены корреляционные зависимости между относительными интенсивностями характеристических полос в ИК-спектрах ГЭМЦ и содержанием метокси- и гидроксиэтокси-групп, определённым методом ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии. Показано, что полоса поглощения 1373 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания CH<sub>3</sub>) пригодна для количественного анализа метокси-групп, а полоса 1312 см<sup>-1</sup> – для гидроксиэтокси-групп. Нормировка на внутренний стандарт (полоса 949 см<sup>-1</sup>) обеспечивает более высокую точность по сравнению с нормировкой на полосу 1650 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания остаточной воды). Разработанные линейные регрессионные модели успешно апробированы на трёх независимых образцах ГЭМЦ.

**Выводы.** Разработаны калибровочные модели для количественного определения метокси- и гидроксиэтокси-групп в ГЭМЦ на основе корреляции относительных интенсивностей характеристических полос ИК-спектров (1373 см<sup>-1</sup> для метокси- и 1312 см<sup>-1</sup> для гидроксиэтокси-групп) с содержанием заместителей, установленным методом ЯМР <sup>13</sup>C спектроскопии. Наилучшие результаты достигнуты при нормировке на полосу 949 см<sup>-1</sup> (скелетные колебания пиранозного цикла): для метокси-групп коэффициент детерминации составил 0,9515, а среднеквадратичная ошибка предсказания – 0,284 %; для гидроксиэтокси-групп – 0,825 и 0,98 % соответственно. Нормировка на полосу 1650 см<sup>-1</sup> дала менее точные результаты. Валидация на трёх независимых образцах показала, что расхождение с референсными значениями ЯМР <sup>13</sup>C не превышает 1,8 % для метокси- и 0,7 % для гидроксиэтокси-групп, что приемлемо для скрининговых и технологических задач. Предложенные ИК-спектроскопические методики позволяют существенно сократить время и стоимость анализа по сравнению с ЯМР или ГЖХ, сохраняя достаточную точность для рутинного входного контроля сырья.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of Substitution Pattern on Solution Behavior of Hydroxypropyl Methylcellulose / A. Viridén, B. Wittgren, T. Andersson et al. // *Biomacromolecules*. – 2009. – Vol. 10, No 3. – P. 522-529. – DOI: 10.1021/bm801140q.
2. Sarkar, N. Thermal gelation properties of methyl and hydroxypropyl methylcellulose / N. Sarkar // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1979. – Vol. 24, No 4. – P. 1073-1087. – DOI: 10.1002/app.1979.070240420.
3. Aggregation and network formation of aqueous methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose solutions / R. Bodvik, A. Dedinaite, L. Karlson et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2010. – Vol. 354, No 1-3. – P. 162-171. – DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.09.040.
4. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars / L. Paturlal, P. Marchal, A. Govin et al. // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol. 41, No 1. – P. 46-55. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.004.

5. Pharmaceutical applications of cellulose ethers and cellulose ether esters / H.C. Arca, L.I. Mosquera-Giraldo, V. Bi et al. // *Biomacromolecules*. – 2018. – Vol. 19, No 7. – P. 2351-2376. – DOI: 10.1021/acs.biomac.8b00517
6. Mamani, P.L. Matrix tablets: the effect of hydroxypropyl methylcellulose/anhydrous dibasic calcium phosphate ratio on the release rate of a water-soluble drug through the gastrointestinal tract I. In vitro tests / P.L. Mamani, R. Ruiz-Caro, M.D. Veiga // *AAPS PharmSciTech*. – 2012. – Vol. 13, No 4. – P. 1073-1083. – DOI: 10.1208/s12249-012-9829-9.
7. Recent Advances in Cellulose-Based Hydrogels: Food Applications / P.C. Nath, S. Debnath, M. Sharma et al. // *Foods*. – 2023. – Vol. 12, No 2. – ID 350. – DOI: 10.3390/foods12020350.
8. Wüstenberg, T. Cellulose and cellulose derivatives in the food industry: fundamentals and applications / T. Wüstenberg // *Wiley-VCH*. – 2022. – 560 p. – DOI: 10.1002/9783527682935.
9. Hydrolysis of hydroxyethyl methylcellulose with perchloric acid and determination of chemical structure via <sup>13</sup>C NMR spectroscopy / S.G. Kostryukov, P.S. Petrov, V.A. Kalyazin et al. // *Cellulose Chemistry and Technology*. – 2020. – Vol. 54, No 5-6. – P. 439-450. DOI: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.45.
10. Определение химической структуры метилгидроксиэтилцеллюлозы методом <sup>13</sup>C ЯМР спектроскопии / С.Г. Кострюков, С.В. Арасланкин, П.С. Петров и др. // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2019. – Т. 62, № 8. – С. 102-112. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5910.
11. Quantitative analysis of degree of substitution/molar substitution of etherified polysaccharide derivatives / X.-L. Liu, C.-F. Zhu, H.-C. Liu, J.-M. Zhu // *Designed Monomers and Polymers*. – 2022. – Vol. 25, No 1. – P. 75-88. – DOI: 10.1080/15685551.2022.2054118.
12. Fan, M. Fourier transform infrared spectroscopy for natural fibres / M. Fan, D. Dai, B. Huang // *Fourier Transform – Materials Analysis*. – 2021. – P. 45-68. – DOI: 10.5772/35482.
13. Определение лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в растительных материалах с помощью ИК-Фурье спектроскопии / С.Г. Кострюков, Х.Б. Матякубов, Ю.Ю. Мастерова и др. // *Журнал аналитической химии*. – 2023. – Т. 78, № 6. – С. 496-506. – DOI: 10.31857/S0044450223040102.
14. Norcross, F. Criminal Law Reform / F. Norcross // *Journal of the American Institute of Criminal Law and Criminology*. – 1910. – Vol. 1, No 3. – P. 386–393.

## REFERENCES

1. Viridén, A., Wittgren, B., Andersson, T., Abrahmsén-Alami, S., & Larsson, A. (2009). Influence of Substitution Pattern on Solution Behavior of Hydroxypropyl Methylcellulose. *Biomacromolecules*. 10 (3), 522–529, doi: 10.1021/bm801140q.
2. Sarkar, N. (1979). Thermal gelation properties of methyl and hydroxypropyl methylcellulose. *Journal of Applied Polymer Science*. 24 (4), 1073–1087, doi: 10.1002/app.1979.070240420.
3. Bodvik, R., Dedinaite, A., Karlson, L., Bergström, M., Bäverbäck, P., Pedersen, J. S., Edwards, K., Karlsson, G., Varga, I., & Claesson, P. M. (2010). Aggregation and network formation of aqueous methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 354 (1–3), 162–171, doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.09.040.
4. Patural, L., Marchal, P., Govin, A., Grosseau, P., Ruot, B., & Devès, O. (2011). Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 41 (1), 46–55, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.09.004.
5. Arca, H. C., Mosquera-Giraldo, L. I., Bi, V., Xu, D., Taylor, L. S., & Edgar, K. J. (2018). Pharmaceutical applications of cellulose ethers and cellulose ether esters. *Biomacromolecules*. 19 (7), 2351–2376, doi: 10.1021/acs.biomac.8b00517.
6. Mamani, P. L., Ruiz-Caro, R., & Veiga, M. D. (2012). Matrix tablets: the effect of hydroxypropyl methylcellulose/anhydrous dibasic calcium phosphate ratio on the release rate of a water-soluble drug through the gastrointestinal tract I. In vitro tests. *AAPS PharmSciTech*. 13 (4), 1073–1083, doi: 10.1208/s12249-012-9829-9.
7. Nath, P. C., Debnath, S., Sharma, M., Sridhar, K., Nayak, P. K., & Inbaraj, B. S. (2023). Recent Advances in Cellulose-Based Hydrogels: Food Applications. *Foods*. 12 (2), 350, doi: 10.3390/foods12020350.
8. Wüstenberg, T. (2022). *Cellulose and cellulose derivatives in the food industry: fundamentals and applications*. Wiley-VCH, doi: 10.1002/9783527682935.
9. Kostryukov, S. G., Petrov, P. S., Kalyazin, V. A., Ullah, W., Tezikova, V. S., Odnopolov, A. A., Masterova, Y. Y., & Alalwan, D. H. K. (2020). Hydrolysis of hydroxyethyl methylcellulose with perchloric acid and determination of chemical structure via <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. *Cellulose Chemistry and Technology*. 54 (5–6), 439–450, doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.45.

10. Kostryukov, S. G., Araslankin, S. V., Petrov, P. S., Kalyazin, V. A., & Al-Rubaye, A. A. I. (2019). [Determination of the chemical structure of methylhydroxyethylcellulose by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*. 62 (8), 102–112, doi: 10.6060/ivkkt.20196208.5910 (In Russian).
11. Liu, X.-L., Zhu, C.-F., Liu, H.-C., & Zhu, J.-M. (2022). Quantitative analysis of degree of substitution/molar substitution of etherified polysaccharide derivatives. *Designed Monomers and Polymers*. 25 (1), 75–88, doi: 10.1080/15685551.2022.2054118.
12. Fan, M., Dai, D., & Huang, B. (2021). Fourier transform infrared spectroscopy for natural fibres. In *Fourier Transform – Materials Analysis* (pp. 45–68), doi: 10.5772/35482.
13. Kostryukov, S. G., Matyakubov, Kh. B., Masterova, Yu. Yu., Kozlov, A. Sh., Pryanichnikova, M. K., Pynenkov, A. A., & Khluchina, N. A. (2023). [Determination of lignin, cellulose and hemicellulose in plant materials by FTIR spectroscopy]. *Zhurnal Analiticheskoi Khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 78 (6), 496–506, doi: 10.31857/S0044450223040102 (In Russian).
14. Norcross, F. (1910) Criminal Law Reform. *Journal of the American Institute of Criminal Law and Criminology*. 1 (3), 386–393.

**QUANTITATIVE DETERMINATION OF METHOXY AND HYDROXYETHOXY GROUPS IN  
HYDROXYETHYL METHYL CELLULOSE BY FTIR SPECTROSCOPY WITH CALIBRATION  
USING  $^{13}\text{C}$  NMR DATA**

**Sh. A. Faizrahmanov, S. G. Kostryukov**

A method for the quantitative determination of methoxy and hydroxyethoxy groups in hydroxyethyl methyl cellulose (HEMC) by FTIR spectroscopy with calibration using  $^{13}\text{C}$  NMR data was developed. Nine commercial HEMC samples were studied. Linear regression relationships between the relative intensities of the  $1373\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$  deformation) and  $1312\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  deformation) bands and the substituent content were established. The best results were obtained with normalization to the  $949\text{ cm}^{-1}$  band (pyranose ring skeletal vibrations): for methoxy groups  $R^2 = 0.9515$ , RMSE = 0.284 %; for hydroxyethoxy groups  $R^2 = 0.825$ , RMSE = 0.98 %. Validation on three independent samples showed deviations from the reference  $^{13}\text{C}$  NMR values not exceeding 1.8 % for methoxy and 0.7% for hydroxyethoxy groups, which is acceptable for screening tasks. The proposed rapid method can be used for incoming raw material control.

**Keywords.** hydroxyethyl methyl cellulose, FTIR spectroscopy,  $^{13}\text{C}$  NMR, methoxy groups, hydroxyethoxy groups, quantitative analysis, calibration.

*Поступила в редакцию 04.05.2026 г.*

**Кострюков Сергей Геннадьевич**

кандидат химических наук; доцент;  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарёва»; г. Саранск, Россия.  
E-mail: kostryukov\_sg@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-1774-0836  
SPIN-код: 4915-4366  
AuthorID: 55668

**Kostryukov Sergey G.**

Candidate of Chemical Sciences; Associate Professor;  
National Research Ogarev Mordovia State University;  
Saransk, Russia.

**Файзрахманов Шамиль Анварович**

аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский Мордовский государственный  
университет», г. Саранск, Россия.  
E-mail: Sh.Faizrahmanov@yandex.ru  
SPIN-код: 4364-9283  
AuthorID: 1326529

**Faizrahmanov Shamil A.**

postgraduate;  
National Research Ogarev Mordovia State University;  
Saransk, Russia.

**КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РЕАКЦИЙ ВАЛИНА И АСПАРАГИНА С СУЛЬФОНИЛХЛОРИДАМИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ**© 2026. *Л. Б. Кочетова, Т. П. Кустова, А. Е. Смирнова, И. М. Миннибаева*

Методом RHF//6-31G(d) в рамках программного пакета Firefly 7.1g проведены квантово-химические расчеты трехмерных поверхностей потенциальной энергии реакций валина с 3-нитробензолсульфонилхлоридом и аспарагина с бензолсульфонилхлоридом в газовой фазе. Установлено, что реакция валина с 3-нитробензолсульфонилхлоридом протекает по механизму бимолекулярного согласованного нуклеофильного замещения, а реакция аспарагина с бензолсульфонилхлоридом – по механизму присоединения-отщепления. Разница в механизмах реакций объясняется присутствием в молекуле аспарагина карбонильного атома углерода в боковой цепи, который снижает нуклеофильные свойства атома азота  $\alpha$ -аминогруппы и затрудняет протекание реакции. Рассчитаны структуры переходных состояний реакции, определены их энергии активации в газовой фазе.

**Ключевые слова:** квантово-химическое моделирование, механизм реакций, сульфонилирование,  $\alpha$ -аминокислоты, поверхность потенциальной энергии.

**Введение.** Реакции ацилирования  $\alpha$ -аминокислот представляют серьезный научный интерес благодаря широким возможностям практического применения их продуктов. Будучи биологически активными, ациламинокислоты используются в качестве фармацевтических препаратов, в производстве гигиенических и косметических средств, гербицидов и фунгицидов, в научных исследованиях в области биологии и биохимии [1, 2].

Частный случай ацилирования  $\alpha$ -аминокислот – их сульфонилирование, продукты которого важны для медицинской химии. На сегодняшний день известны десятки тысяч сульфониламидов, производных разных классов аминосоединений. В живых организмах производные сульфоновых кислот участвуют в ингибировании ряда ферментов [3–5], с чем связан повышенный интерес к исследованиям закономерностей образования связи N—S в биологических объектах.

Знание кинетики и механизмов сульфонилирования  $\alpha$ -аминокислот позволяет выбирать оптимальные условия для синтеза сульфониламидов, что способствует снижению финансовых и временных затрат на их производство. Однако, к настоящему времени сведения о кинетических закономерностях и механизмах протекания реакций получения сульфонильных производных  $\alpha$ -аминокислот достаточно ограничены.

Нашей группой на протяжении ряда лет в рамках комплексного подхода изучаются кинетика и механизмы ацилирования аминосоединений разных классов различными ацилирующими агентами [6–12]. В продолжение проводимых исследований целью настоящей работы стало квантово-химическое моделирование механизма реакций двух  $\alpha$ -аминокислот с сульфонилхлоридами: валина с 3-нитробензолсульфонилхлоридом (3-НБСХ) и аспарагина с бензолсульфонилхлоридом (БСХ) в газовой фазе.

Согласно данным работ [13–16], сульфонилирование аминов может идти по трем путям:

- 1) по ионно-парному механизму  $S_N1$ , который предполагает, что разрыв связи серы с уходящей группой (S–Cl) в сульфонилхлориде происходит раньше, чем образуется связь с нуклеофилом (S–N);
- 2) по одностадийному механизму бимолекулярного согласованного нуклеофильного замещения ( $S_N2$ ), в котором образуется единственное переходное

состояние (ПС), где одновременно происходит разрыв связи с уходящей группой и образование связи S–N;

3) по стадийному механизму присоединения-отщепления ( $S_{AN}$ ), когда образование связи между атомом серы и атомом азота нуклеофила происходит раньше, чем разрыв связи между атомом серы и уходящей группой, и реакция идет через стадию образования интермедиата.

Для реакций аминсоединений разных классов с хлорангидридами аренсульфоновых кислот в органических растворителях равновероятными и кинетически неразличимыми считаются два пути –  $S_{N2}$  и  $S_{AN}$  [6].

В реакции, протекающей по механизму  $S_{N2}$ , возможны две конфигурации ПС [14, 16]: с сульфонильным реакционным центром в виде тригональной бипирамиды (рис. 1, а) или тетрагональной пирамиды (рис. 1, б):

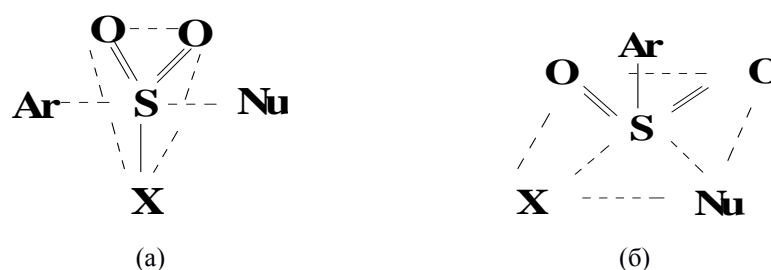
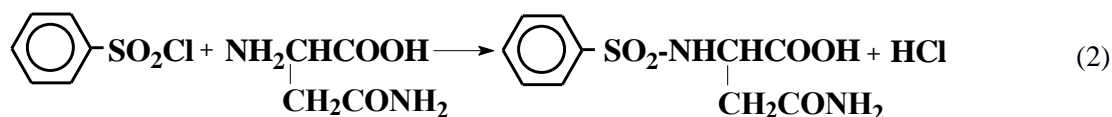
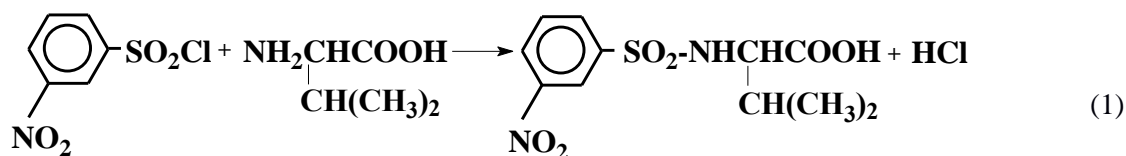


Рис. 1. Возможные конфигурации сульфонильного реакционного центра в ПС реакции сульфонилирования, протекающей по механизму  $S_{N2}$ .

**Методика эксперимента.** Методом RHF//6-31G(d) с использованием программного пакета Firefly 7.1g [17] проведено квантово-химическое моделирование механизма газофазных реакций 3-нитробензолсульфонилхлорида (3-НБСХ) с валином и бензолсульфонилхлорида с аспарагином. Изучаемые процессы протекают по уравнениям (1), (2):



Базис для расчетов выбирали, исходя из представлений о большом объеме вычислений, необходимых для расчета ППЭ реакции и вычислительных возможностей имеющейся компьютерной техники. Используемый нами метод Хартри-Фока для замкнутых оболочек (RHF) применяется для моделирования молекул, у которых на  $p$  попарно заполненных молекулярных орбиталях содержится  $2p$  электронов. Данный метод применим для широкого круга молекулярных систем и решения многих задач, таких как расчет структурных параметров, частот колебаний стабильных молекул и некоторых типов ПС.

Изучаемые молекулярные системы включают большое число атомов, поэтому расчет полных ППЭ реакций с варьированием всех  $3N-6$  независимых переменных не возможен. Нами рассчитывались фрагменты трехмерных ППЭ, построение которых

предполагает варьирование двух внутренних координат системы, наиболее изменяющихся в ходе реакции.

Рассчитываемые фрагменты ППЭ учитывали диапазон направлений атаки нуклеофила ( $\alpha$ -аминокислоты) от фронтального, когда нуклеофил атакует атом сульфонильной серы со стороны атома хлора, до аксиального, когда атакующий атом азота нуклеофила лежит на оси связи сера – углерод ароматического кольца (S-C<sub>Ar</sub>). Тыловая атака нуклеофила, со стороны противоположной связи S-Cl, не рассматривалась, как маловероятная в процессах сульфонирования  $\alpha$ -аминокислот [7].

В качестве варьируемых внутренних координат реакции использовали расстояние  $r(S-N)$ , которое изменяли от 4,5 до 1,5 Å, с шагом 0,1 Å, и угол атаки ( $\angle C_{Ar}SN$ ), который изменяли от 90°, что соответствовало фронтальной атаке нуклеофила, до 180°, что соответствовало аксиальной атаке, с шагом 10°. В каждой точке ППЭ расстояние  $r(S-N)$  и угол атаки фиксировали, после чего проводилась полная оптимизация геометрии системы.

Путем анализа полученной ППЭ, определяли положение седловой точки, соответствующей ПС реакции. Энергию активации реакции валина с 3-НБСХ рассчитывали как разницу в энергиях реагентов и ПС. Энергию активации стадий реакции аспарагина с БСХ вычисляли как разницу в полных энергиях реагентов и ПС1 – для первой стадии (уравнение 3), и как разницу в энергиях интермедиата и ПС2 – для второй стадии (уравнение 4):

$$E_{a1} = E_{\text{tot(реагентов)}} - E_{\text{tot(ПС1)}} \quad (3)$$

$$E_{a2} = E_{\text{tot(интермедиата)}} - E_{\text{tot(ПС2)}} \quad (4)$$

**Анализ результатов.** На рис. 2 показаны контурные карты фрагментов ППЭ изучаемых реакций.

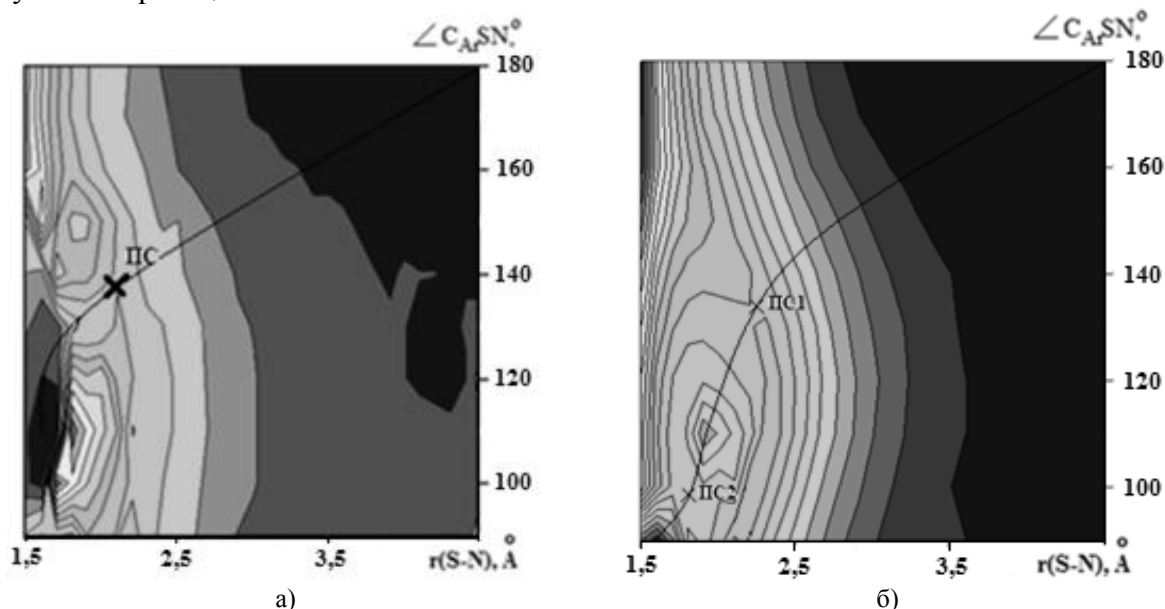


Рис. 2. ППЭ газофазных реакций: а) валина с 3-НБСХ, б) аспарагина с БСХ.

×- переходные состояния

Анализ ППЭ реакции валина с 3-НБСХ в газовой фазе показывает, что она может протекать по единственному маршруту. Он начинается как аксиальная атака молекулы валина на реакционный центр 3-НБСХ; в ходе сближения молекул реагентов угол атаки нуклеофила уменьшается, достигая  $\approx 140^\circ$  в ПС и  $110^\circ$  – в конечном продукте.

Необходимо отметить, что большинство ранее изученных реакций  $\alpha$ -аминокислот с сульфонилхлоридами протекают по маршруту, начинающемуся аксиальной атакой нуклеофила [7].

Из рис. 2а следует, что маршрут реакции проходит только через одно ПС. Оно образуется в седловой точке ППЭ при расстоянии между реагирующими молекулами  $r(S-N) \approx 2,2 \text{ \AA}$ . Образование продуктов реакции происходит при достижении минимума на ППЭ, при  $r(S-N) \approx 1,6 \text{ \AA}$ .

Реакция аспарагина с БСХ (рис. 2, б) также может протекать по единственному маршруту, который начинается как аксиальная атака молекулы аспарагина на реакционный центр БСХ. В ходе реакции угол атаки нуклеофила уменьшается, достигая  $\approx 135^\circ$  в первом ПС1,  $110^\circ$  – в интермедиате,  $\approx 100^\circ$  – в ПС2 и  $90^\circ$  – в конечном продукте.

Из рис. 2, б видно, что образование ПС происходит в седловых точках ППЭ при расстоянии между реагирующими молекулами  $r(S-N) \approx 2,3 \text{ \AA}$  – в ПС1,  $r(S-N) \approx 1,8 \text{ \AA}$  – в ПС2. Образование промежуточных продуктов реакции происходит при  $r(S-N) \approx 2,0 \text{ \AA}$ , а конечных – при  $r(S-N) \approx 1,6 \text{ \AA}$ .

Реакционный центр в ПС реакции валина с 3-НБСХ имеет структуру, промежуточную между тригональной бипирамидой и тетрагональной пирамидой (рис. 3), так как процесс идет по маршруту с изменением угла атаки нуклеофила. В ПС началось образование связи S–N и разрыхление связи S–Cl, порядки этих связей одинаковы, а длины связей близки (табл. 1). Это говорит об образовании синхронного ПС, характерного для реакций, протекающих в одну стадию. При этом длина второй рвущейся связи – N–H – не изменяется по сравнению с таковой в исходной молекуле валина.

Полученные результаты, согласно которым реакция валина с 3-НБСХ протекает без образования интермедиата через одно ПС на единственном маршруте, свидетельствуют о том, что реакция идет по механизму бимолекулярного согласованного нуклеофильного замещения.

Реакционный центр в ПС1 реакции аспарагина с БСХ (рис. 4, а), как и в ПС первой реакции имеет структуру промежуточную между тригонально-бипирамидальной и тетрагонально-пирамидальной, так как реакция идет по маршруту с изменяющимся углом атаки нуклеофила. В ПС1 начинается образование связи S–N и разрыхление связи S–Cl. Длины и порядки указанных связей в ПС1 близки (табл. 1). Связь N–H не изменяется по сравнению с молекулой аспарагина, не участвующего в реакции.

После седловой точки, соответствующей ПС1, путь реакции проходит через минимум, соответствующий образованию промежуточного продукта реакции. В нем связь S–N образуется в большей степени, чем в ПС1, связь S–Cl практически разрывается, связь N–H – меняется мало по сравнению с ПС1. Сульфонильный реакционный центр в интермедиате имеет конфигурацию тетрагональной пирамиды.

После минимума интермедиата путь реакции проходит через седловую точку, соответствующую ПС2. В ПС2 реакционный центр, также, как в интермедиате, тетрагонально-пирамидальный (рис. 4, б). При образовании ПС2 происходит отщепление молекулы хлороводорода (побочного продукта реакции), на что указывают длины связей N–H и S–Cl: в интермедиате они равны соответственно  $1,019 \text{ \AA}$ ,  $3,975 \text{ \AA}$ , а в ПС2 –  $3,659 \text{ \AA}$ , и  $4,690 \text{ \AA}$ , а также длина образующейся связи H–Cl: в интермедиате она составляет  $3,016 \text{ \AA}$ , а в ПС2 –  $1,267 \text{ \AA}$ , что практически соответствует длине связи H–Cl в конечном продукте реакции.

Полученные результаты расчета ППЭ реакции аспарагина с БСХ, согласно которым она протекает с образованием интермедиата и двух ПС, свидетельствуют о том, что указанный процесс идет по механизму присоединения-отщепления.

Результаты расчета структурных характеристик ПС реакций и интермедиата реакции аспарагина с БСХ приведены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

Таблица 1

Геометрические и энергетические характеристики ПС и интермедиатов реакций  
*Val* с 3-НБСХ и *Asn* с БСХ в газовой фазе

| Параметр                      | Значение            |                  |       |             |
|-------------------------------|---------------------|------------------|-------|-------------|
|                               | <i>Val</i> + 3-НБСХ | <i>Asn</i> + БСХ |       |             |
|                               |                     | ПС               | ПС1   | интермедиат |
| Длина связи S–N, Å            | 2,100               | 2,175            | 2,000 | 1,650       |
| Порядок связи S–N             | 0,40                | 0,33             | 0,46  | 0,90        |
| Длина связи S–Cl, Å           | 2,798               | 2,752            | 3,975 | 4,690       |
| Порядок связи S–Cl            | 0,40                | 0,39             | 0,00  | 0,00        |
| Длина связи Н–Cl, Å           | 2,928               | 2,340            | 3,016 | 1,267       |
| Длина связи N–H, Å            | 1,007               | 1,004            | 1,019 | 3,659       |
| $\angle C_{\alpha}SN, ^\circ$ | 140                 | 147,92           | 110   | 103,97      |
| $\angle Cl-S-N-H, ^\circ$     | 73,27               | 23,44            | 15,75 | 15,78       |
| $\nu^*, \text{cm}^{-1}$       | -217,90             | -237,90          | –     | -68,11      |

\* – мнимая частота

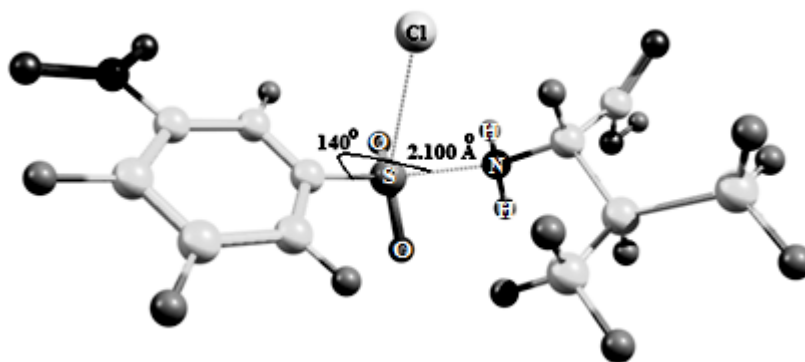


Рис. 3. Структура ПС реакции валина с 3-НБСХ

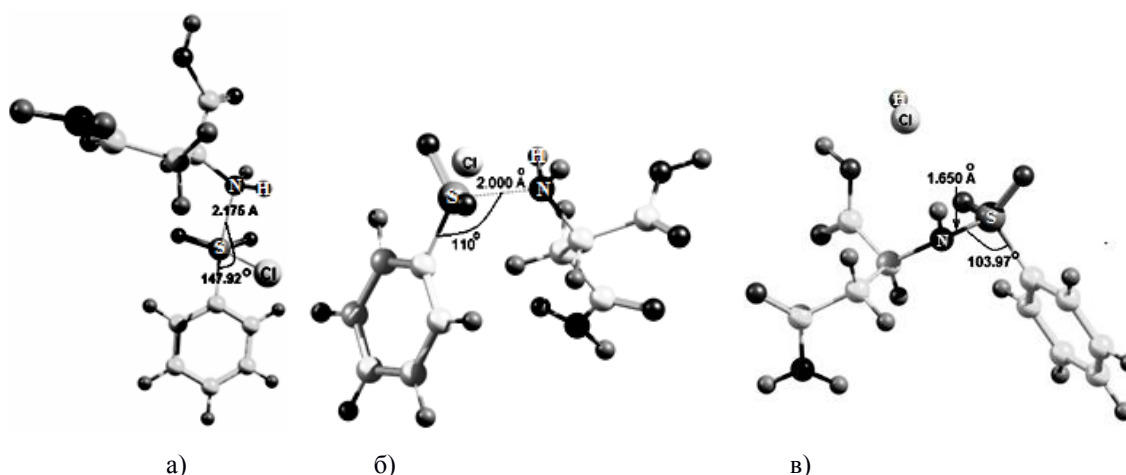


Рис. 4. Структуры ПС и интермедиата реакции аспарагина с БСХ: а) ПС1, б) интермедиат, в) ПС2

Таким образом, результаты расчетов ППЭ реакций валина с 3-НБСХ и аспарагина с БСХ в газовой фазе, показывают, что реакция валина с 3-НБСХ, как и большинство реакций сульфонилхлоридов с  $\alpha$ -аминокислотами, протекает по механизму  $S_N2$ , что

согласуется с данными наших предыдущих работ, посвященных механизмам сульфонилирования  $\alpha$ -аминокислот [7]. Однако, в некоторых случаях, таких как реакция аспарагина с БСХ, взаимодействие сульфонилхлоридов с  $\alpha$ -аминокислотами может протекать и по механизму присоединения-отщепления. Разница в механизмах протекания изучаемых реакций, по-видимому, обусловлена нуклеофильностью  $\alpha$ -аминогруппы  $\alpha$ -аминокислот: у валина электронодонорный радикал, расположенный по соседству с  $\alpha$ -аминогруппой, повышает ее нуклеофильность, способствуя более быстрому протеканию реакции и реализации в ней согласованного механизма. У аспарагина карбонильный атом углерода в боковой цепи, напротив, снижает нуклеофильные свойства  $\alpha$ -аминогруппы, способствуя более медленному протеканию процесса и реализации в нем стадийного механизма.

Рассчитанная энергия активации реакции валина с 3-НБСХ составила 301,6 кДж/моль. Для реакции аспарагина с БСХ энергии активации составили 181,0 кДж/моль – для первой стадии, и 183,6 кДж/моль – для второй стадии; следовательно, лимитирующей стадией будет стадия образования ПС2. Высокие полученные величины энергий активации обеих изученных реакций объясняются тем, что моделирование проводили в газовой фазе, тогда как ранее нами показано, что учет сольватации обычно снижает энергетический барьер реакции [7].

Рассчитанная величина энергетического барьера реакции валина с 3-НБСХ существенно превышает величину энергии активации, рассчитанную нами ранее для газофазной реакции 3-НБСХ с глицином, протекающей по такому же маршруту (106 кДж/моль) [7], что можно объяснить стерическими затруднениями, создаваемыми объемным заместителем валина при нуклеофильной атаке.

Для реакции аспарагина с БСХ полученные величины энергетических барьеров отдельных стадий существенно превышают величину энергии активации, рассчитанную для газофазной реакции БСХ с глицином (126 кДж/моль, механизм  $S_N2$ ), что согласуется с экспериментально полученным более высоким значением константы скорости реакции БСХ с глицином в 40%-ном водном диоксане (145 л/(моль·с)) по сравнению с константой скорости БСХ с аспарагином в том же растворителе (8,8 л/(моль·с)) [7]. По-видимому, различия в скорости и вариантах механизма реакций указанных  $\alpha$ -аминокислот обусловлены наличием в молекуле аспарагина электроакцепторной карбамидной группы, которая снижает нуклеофильность атома азота  $\alpha$ -аминогруппы аспарагина по сравнению с аналогичным атомом глицина. Кроме этого заместитель в аспарагине довольно объемный, и должен создавать стерические затруднения при нуклеофильной атаке.

**Выводы.** Построение и анализ фрагментов трехмерных ППЭ газофазных реакций валина с 3-НБСХ и аспарагина с БСХ позволил установить, что указанные процессы могут протекать по единственному маршруту, начинающемуся аксиальной атакой нуклеофила. На пути реакции валина с 3-НБСХ образуется одно переходное состояние без интермедиатов, процесс протекает в соответствии с механизмом бимолекулярного согласованного нуклеофильного замещения. На маршруте реакции аспарагина с БСХ образуются 2 переходных состояния и интермедиат, реакция протекает по механизму присоединения-отщепления. Протекание изученных реакций по разным механизмам обусловлено природой радикала в  $\alpha$ -аминокислоте, влияющей на нуклеофильные свойства  $\alpha$ -аминогруппы. Конфигурация реакционных центров в переходном состоянии реакции валина с 3-НБСХ и первом переходном состоянии реакции аспарагина с БСХ промежуточная между тригонально-бипирамидальной и

тетрагонально-пирамидальной. Переходное состояние реакции валина с 3-НБСХ синхронное. Во втором переходном состоянии и в интермедиате реакции аспарагина с БСХ реакционный центр имеет форму тетрагональной пирамиды. Рассчитанные величины энергий активации реакций, составившие 301,6 кДж/моль в реакции валина с 3-НБСХ, 181 кДж/моль для первой стадии реакции аспарагина с БСХ и 183,6 кДж/моль – для второй стадии той же реакции, весьма высоки вследствие того, моделирование проводилось в газовой фазе. Лимитирующей стадией реакции аспарагина с БСХ является вторая стадия. Рассчитанная энергия активации реакции 3-НБСХ с валином превышает энергию активации его реакции с глицином в связи со стерическими затруднениями, создаваемыми радикалом валина. Величины энергетических барьеров отдельных стадий реакции БСХ с аспарагином существенно превышают величину энергии активации его реакции с глицином, что согласуется с экспериментальными данными об относительной реакционной способности  $\alpha$ -аминокислот в сульфонилировании. Различия в скорости и вариантах механизма реакций аспарагина и глицина обусловлены наличием у аспарагина в боковой цепи карбонильного атома углерода, снижающего нуклеофильность атома азота  $\alpha$ -аминогруппы и создающего стерические затруднения при атаке нуклеофила.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михалкин, А.П. Получение, свойства и применение N-ацил- $\alpha$ -аминокислот / А.П. Михалкин // Успехи химии. – 1995. – Т. 64, № 3. – С. 275-292.
2. 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.
3. Coumarinyl-substituted sulfonamides strongly inhibit several human carbonic anhydrase isoforms: solution and crystallographic investigations / J. Wagner, B.S. Avvaru, A.H. Robbins, et al. // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. – 2010. – V. 18, No 14. – P. 4873-4878.
4. Pteridine-sulfonamide conjugates as dual inhibitors of carbonic anhydrases and dihydrofolate reductase with potential antitumor activity / S.M. Marques, E.A. Enyedy, C.T. Supuran, et al. // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. – 2010. – V. 18, No 14. – P. 5081-5089.
5. New hydroхуридинон-содержащие сульфонамиды как ингибиторы карбоангидразы также действующие как MMP ингибиторы / M.A. Esteves, O. Ortet, A. Capelo, et al. // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. – 2010. – V. 20, No 12. – P. 3623-3627.
6. 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.
7. Кочетова, Л.Б. Амиды и сульфонамиды: кинетические закономерности синтеза и механизмы реакций / Л.Б. Кочетова, Т.П. Кустова, Л.В. Курицын. – Москва: Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 283 с.
8. Кочетова, Л.Б. Ацилирование амидов, гидразидов, аминокислот и дипептидов / Л.Б. Кочетова, Т.П. Кустова, Н.В. Калинина. – Москва: Директ-Медиа, 2024. – 163 с.
9. Кочетова, Л.Б. Влияние растворителя вода-1,4-диоксан на кинетические закономерности реакций  $\alpha$ -аминокислот с 4-нитрофениловым эфиром уксусной кислоты / Л.Б. Кочетова, Т. П. Кустова // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2026. – № 1. – С. 33-44. – DOI: 10.5281/zenodo.19179429. – EDN: МТМНУН
10. Кустова, Т. П. N-ацилирование  $\beta$ -аланил- $\beta$ -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.
11. Кустова, Т.П. Реакционная способность этилового эфира лейцина в бензоилировании в водно-органических средах / Т.П. Кустова, Л.Б. Кочетова // Известия вузов. Серия химическая. – 2023. – Т. 66, вып.12. – С. 41-48.
12. Organic Chemistry in the Creation of Molecules with Practically Useful Properties / Belyakova Yu. Yu., Yaremenko I. A., Terentev A. O. et al. // Russian Journal of General Chemistry. – 2026. – V. 96, No 1. – P. 1-350.
13. Взаимодействие сульфохлоридов с нуклеофильными реагентами / Р. В. Визгерт, Ю. Г. Скрыпник, М. П. Стародубцева и др. – Москва, 1976. – 51 с. – Деп. в ВИНТИ, № 1237-76.

14. Литвиненко, Л. М. Кинетика и механизм реакций нуклеофильного замещения у тетракоординатного атома серы в ряду производных органических сульфокислот / Л. М. Литвиненко, В. А. Савелова, Т. Н. Соломоиченко, В. Г. Заславский // Структура, реакционная способность органических соединений и механизмы реакций: сб. науч. трудов. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 3-68.
15. Литвиненко, Л. М. Механизмы действия органических катализаторов. Основной и нуклеофильный катализ / Л. М. Литвиненко, Н. М. Олейник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 264 с.
16. Савелова, В. А. Кинетика и катализ реакций нуклеофильного замещения в ряду производных сульфоновых и карбоновых кислот: дис... докт. хим. наук: 02.00.03 / Савелова Вера Андреевна. - Донецк, 1986.
17. Granovsky, A.A. Firefly version 7.1.G. www <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>

## REFERENCES

1. Mikhalkin, A.P. (1995) [Production, properties and application of N-acyl- $\alpha$ -amino acids]. *Uspekhi Khimii = Russian Chemical Reviews*. 64 (3), 275-292. (In Russian).
2. Hanuš, L., Shohami, E., Bab, I., Mechoulam, R. (2014) N-Acyl amino acids and their impact on biological processes. *Biofactors*. 40(4), 381-388.
3. Wagner, J., Avvaru, B.S., Robbins, A.H., Scozzafava, A., Supuran, C.T., McKenna, R. (2010) Coumarinyl-substituted sulfonamides strongly inhibit several human carbonic anhydrase isoforms: solution and crystallographic investigations. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 18(14), 4873-4878.
4. Marques, S.M., Enyedy, E.A., Supuran, C.T., Krupenko, N.I., Krupenko, S.A., Santos, M.A. (2010) Pteridine-sulfonamide conjugates as dual inhibitors of carbonic anhydrases and dihydrofolate reductase with potential antitumor activity. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 18(14), 5081-5089.
5. Esteves, M.A., Ortet, O., Capelo, A., Supuran, C.T. (2010) New hydroxypyrimidinone-containing sulfonamides as carbonic anhydrase inhibitors also acting as MMP inhibitors. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 20(12), 3623-3627.
6. 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 p. (In Russian).
7. Kochetova, L.B., Kustova, T.P. & Kuritsyn, L.V. (2020) *Amides and sulfonamides: kinetic patterns of synthesis and reaction mechanisms*. Moscow: Berlin: Direct-Media. – 283 p. (In Russian).
8. 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).
9. Kochetova, L.B. & Kustova, T.P. (2026) [The effect of water-1,4-dioxane solvent on the kinetics of reactions of  $\alpha$ -amino acids with 4-nitrophenyl ester of acetic acid]. *Vestnik Donetskogo natsyonal'nogo universiteta. Seriya A: Yestestvennyye nauki. = Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*. (1), 33-44. (In Russian).
10. Kustova, T.P. & Kochetova, L.B. (2025) [N-acylation of  $\beta$ -alanyl- $\beta$ -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).
11. 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).
12. Belyakova Yu. Yu., Yaremenko I. A., Terentev A. O. et al. (2026) Organic Chemistry in the Creation of Molecules with Practically Useful Properties. *Russian Journal of General Chemistry*. 96 (1), 1-350.
13. Vizgert, R.V., Skrypnik, Yu G., Starodubtseva, M.P., Maksimenko, N. N., Sheiko, S.G. (1976) Interaction of sulfonyl chlorides with nucleophilic reagents. Moscow. 51 p. Dep. in VINITI, № 1237-76. (In Russian).
14. Litvinenko, L. M., Savelova, V. A., Solomoichenko, T.N., Zaslavskiy, V.G. (1980) [Kinetics and mechanism of nucleophilic substitution reactions at the tetracoordinate sulfur atom in a series of organic sulfonic acid derivatives]. In: *Structure, reactivity of organic compounds and reaction mechanisms: Coll. Sci. pap.* Kiev: Naukova dumka. 3-68. (In Russian).
15. Litvinenko, L. M. & Oleinik, N.M. (1984) *Mechanisms of action of organic catalysts. Base and nucleophilic catalysis*. Kiev: Naukova dumka. 264 p. (In Russian).
16. Savelova, V. A. Kinetics and catalysis of nucleophilic substitution reactions in a series of derivatives of sulfonic and carboxylic acids: *diss... Doct. of Chemical Sciences*: Donetsk. 1986. (In Russian).
17. Granovsky, A.A. Firefly version 7.1.G. www <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>

QUANTUM-CHEMICAL MODELING THE MECHANISMS OF REACTIONS OF VALINE AND ASPARAGINE WITH SULFONYL CHLORIDES IN THE GAS PHASE

*L. B. Kochetova, T. P. Kustova, A. E. Smirnova, I. M. Minnibaeva*

Quantum-chemical calculations of three-dimensional potential energy surfaces of reactions of valine with 3-nitrobenzenesulfonyl chloride and asparagine with benzenesulfonyl chloride in the gas phase were carried out using the RHF//6 31G(d) method within the Firefly 7.1g software package. It was established that the reaction of valine with 3-nitrobenzenesulfonyl chloride proceeds by the mechanism of bimolecular concerted nucleophilic substitution, and the reaction of asparagine with benzenesulfonyl chloride proceeds by the addition-elimination mechanism. The difference in reaction mechanisms is explained by the presence of an electron-withdrawing radical in the asparagine molecule, which reduces the nucleophilic properties of the nitrogen atom of the amino group and complicates the reaction. The structures of the transition states of the reaction were calculated, and their activation energies in the gas phase were determined.

**Keywords:** quantum-chemical modeling, reaction mechanism, sulfonation, amino acids, potential energy surface.

*Поступила в редакцию 28.05.2026 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, Associate Professor, Professor of 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

***Смирнова Анастасия Евгеньевна***

студентка Института математики, информационных технологий и естественных наук, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», г. Иваново, РФ.  
E-mail: nlj48971@gmail.com

***Smirnova Anastasiya Evgen'evna***

student of the Institute of Mathematics, Information Technology and Natural Sciences, Ivanovo State University, Ivanovo, RF.

***Миннибаева Ирина Михайловна***

студентка Института математики, информационных технологий и естественных наук, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», г. Иваново, РФ.  
E-mail: lisichkalu17@gmail.com

***Minnibaeva Irina Mikhailovna***

student of the Institute of Mathematics, Information Technology and Natural Sciences, Ivanovo State University, Ivanovo, RF.

## HIGH TEMPERATURES WHEN USING ASLT UNDERESTIMATE THE SHELF LIFE OF FOOD

© 2026. V. V. Gorbachev, M. A. Belyaeva, A. A. Smirnov

The issue of the shelf life of food systems is not only a technical, but also a global environmental problem. The widely used ASLT (Accelerated Shelf Life Testing) method for food, feed, and medicines requires verification of the validity of its temperature conditions, including when it comes to hardware solutions that allow automated forecasting of shelf life. To verify the adequacy of the estimates, both machine learning algorithms for reanalysis of data published in the literature and proprietary data obtained using IR Fourier spectrometry during semi-annual aging of samples were used. It has been shown that the recommended conditions for ASLT at temperatures of 70–100 °C and above only save analysis time, and are more suitable for assessing the stability of non-food samples (for example, gasoline) than for food.

**Keywords:** Accelerated shelf life test (ASLT); underestimation of values; IR-spectrometry of food oils; oxidation of food; activation energy of chemical reactions ( $E_a$ ); artificial neural network.

**Introduction.** According to current United Nations reports and work carried out by international research teams, slightly more than 1/3 of all products and food raw materials are lost annually, thereby contributing to food waste volume [1, 2], a phenomenon associated with significant environmental risks and anthropogenic impact on the ecosystem. As has been demonstrated, when solving this global problem, the role of an adequate assessment of the shelf life of food products is extremely important [2]. All this takes the topic of food shelf life from a purely technical level to a global ecological and economic level.

For this reason, research in the field of food system stability is one of the important areas of modern food science [3], including in connection with understanding the relationship of these processes with the ability to resist the oxidative influence of free radicals. For these purposes, various physicochemical methods are most often used, such as spectrometry and mass spectrometry [4, 5], as well as colorimetry in the visible and UV spectra. The latter is used, for example, to determine the rate of oxidation processes by measuring anisidine [6] and iodine numbers [7]. Other common approaches include acid number determination [8], IR spectroscopy [9, 10], and chromatographic methods for analyzing changes in chemical composition [11].

Chemical degradation products of lipids and other components of food systems can be toxic to humans or impair the organoleptic properties of food [12, 13]. Taking this into account is important both for the engineering of new food products and for understanding post-production processes that are influenced by environmental parameters. For this reason, scientific areas related to shelf life determination (commodity science), storage conditions (environmental and logistical tasks), and the ability of food systems to preserve their chemical composition over time (food chemistry) remain quite relevant [3]. However, it is not always possible to conduct long-term experiments to assess shelf life in natural conditions, primarily due to the complexity of controlling environmental parameters [14]. This has led to a proliferation of accelerated aging methods, known collectively as the *Accelerated Shelf Life Test* (ASLT) [14–16].

ASLT methods are based on the now-well-known Arrhenius equation (Equation 1), which correlates with the empirical Van't Hoff rule. This rule describes a two- to four- fold increase in the rate of chemical reactions for every 10 °C rise in the temperature of the reaction medium.

$$K = Ae^{-E_A/RT}, \quad (1)$$

Where  $K$  – is the rate of the chemical reaction,  $A$  is the pre-exponential factor,  $E_A$  is the activation energy of joules per mole,  $R$  is the universal gas constant equal to  $8,314 \text{ J} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ , and  $T$  is the temperature in kelvin.

A number of authors suggest the use of other mathematical models. Nevertheless, checking the adequacy of each requires independent research [3, 15, 16]. Various ASLT protocols have now been developed, the essence of which is to increase the temperature and analyze the exposure time of a food product under specified conditions.

The exposure time at elevated temperatures is measured until complete or partial rancidity occurs (e.g., in oils). The resulting shelf life, typically expressed in hours, is then recalculated to normal storage conditions ( $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ , atmospheric pressure). Based on such physicochemical principles, analytical devices such as Oxitest or Rancimat have been developed to estimate shelf life. Some of these devices resemble those used to assess the stability of gasoline and other fuels for internal combustion engines. For example, RapidOxy allows the use of increased oxidizer gas pressure ( $6\text{--}8 \text{ atm}$ ) during analysis. Given that food systems consist of both stable and labile components a fact that affects the estimates-questions arise regarding the appropriateness of such physical conditions for analyzing food systems.

In their experiments, researchers seek to reduce exposure time as much as possible and choose very high temperature ranges (from  $80^\circ\text{C}$  upward). At the same time, it is known that reaction temperature affects not only the reaction rate but also, according to *collision theory*, increases collision energy. This leads to overcoming intermolecular resistance and active oxidation of structures that remain stable under normal conditions [17]. As a result, at elevated temperatures, the likelihood of spontaneous oxidative reactions increases, regardless of whether the fatty acids in the sample are saturated or unsaturated.

A similar methodological problem concerns the justification for increasing pressure in ASLT (it is assumed that this may reduce data scatter). A more reasonable explanation is that pressure increases during experiments because gas solubility decreases with rising temperature [18, 19]. Such conditions affect the rate of oxidant diffusion, the speed and frequency of particle collisions, and ultimately the results obtained.

At the same time, independent assessments would be preferable. However, the difficulties of such work arise from the known variability in food product composition (due to «ecological and geographical zoning» of raw materials) and from differences in analytical conditions across research groups. In our opinion, an elegant solution is to reanalyze already published data obtained using hardware solutions (e.g., Oxitest), especially since machine learning algorithms make this approach relatively easy to implement.

Thus, this **work aimed** to reanalyze data from previously published studies using neural networks and to predict previously unpublished values obtained with automated hardware solutions (Oxitest analyzer).

**Materials and methods.** The materials for the study were published data [19] on the chemical composition and oxidation rate of 10 types of freshly squeezed vegetable oils (sesame, linseed, pecan, sunflower), as well as their fatty acid ratios. Oxidation rates at different temperatures for each fatty acid composition and predicted storage values at  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  were also taken from the same publication. All published data were entered into a table we compiled, which was used to train an artificial neural network (hereinafter, ANN).

The ANN structure was chosen in the form of a multilayer perceptron. Figure 1 shows a schematic description of the neural network architecture.

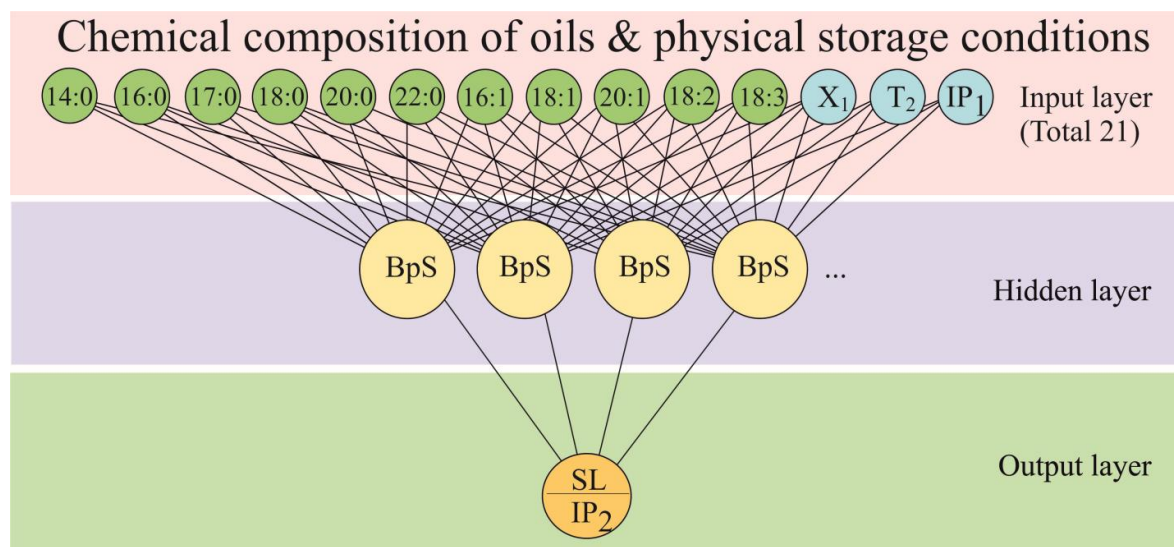


Figure 1. Schematic representation of the neural network architecture (ANN). Note: Part of the input and hidden layer neurons are not shown. A shared neuron is indicated in the output layer, since the same structure was used to calculate two values: IP (induction point) — the time in hours before the onset of uncontrolled oxidation — and SL (shelf life) in days. BpS is a bipolar sigmoid function. Numbers in green circles (e.g., 14:0) represent fatty acid concentrations; X1 and T2 represent physical parameters such as temperature, antioxidant concentrations, etc.

This structure was dictated by the conventional nature and relative simplicity of our calculations, similar to approaches in the literature [20]. According to the publication [19], the authors found linear relationships between the predicted shelf life of oils and the conditions under which ASLT was conducted, which allowed the use of relatively compact ANN architectures. The input neurons (21 in total) contained data on fatty acid composition, analysis temperature, inflection time on the graph (known as the induction point, IP) during uncontrolled oil oxidation, the proportion of unsaturated, polyunsaturated, and monounsaturated fatty acids, iodine number, smoking point, and the proportions of carotenoids, chlorophylls, and tocopherols, measured at different analysis temperatures (70 °C, 90 °C, and 100 °C).

The hidden layer contained no more than five neurons, with a bipolar sigmoid function serving as the activation function. Using this structure, two IP values were predicted — the induction time (in hours) before the inflection on the graph at different temperatures, and the predicted storage time in days (shelf life, SL). All correlations were assessed using Pearson's correlation coefficient and Tukey's test. The data were processed in Excel. Graphs and statistical analyses were performed using Statistica 10 and PAST. The graphs were processed in Corel Draw.

The second block of data for comparison consisted of results obtained for six types of vegetable oils: linseed, sunflower, coconut, olive, and corn, as well as a blend of these five oils in equal proportions. These were analyzed using an IR-Fourier spectrophotometer. The analyses were performed on a Bruker Alpha spectrophotometer equipped with an attenuated total reflection (ATR) accessory. For each of the listed samples, parameters were measured repeatedly: in their native state, after 4 hours of heating at 90 °C, and after six months of open storage in a dark room (with access to oxygen, open container) at 20 °C. All values were normalized and averaged. Changes in the spectral curves were then analyzed in comparison with known data on the influence of emerging and disappearing molecular groups on spectral characteristics.

**Results and discussions.** Recent evidence suggests that the Van't Hoff empirical rule is not strictly linear over the 20–100 °C temperature range [3]. However, even if we accept the

linear nature of correlations and mathematical models based on the Arrhenius equation, many researchers still neglect the role of activation energy ( $E_a$ ). As is well known, activation energy is linked to the other parameters shown in Equation 1.

Using a neural network, we predicted the missing values for 40, 50, 60 and 80 °C (these data were missing in the original work), so we obtained a continuous series of values in 10 °C increments from 40 to 100 °C.

To predict the values, three points were selected (according to the algorithm from the published work). The entire range was divided into three partially overlapping ranges: the low-temperature range (40–50–60 °C, average 50 °C), the moderate-temperature range (50–60–80 °C, average 63,3 °C), and the high-temperature range (70–90–100 °C, average 86,6 °C). The final predicted values (in storage days) with 95 % confidence intervals (CI) are shown in Figure 2. Thus, the predicted values depend on the analysis temperature (i.e., the selected reference points).

For example, the predicted shelf life values obtained for the 70–100 °C range are statistically different from those for other temperature ranges (their 95 % CIs do not overlap). In our opinion, such low estimates arise because activation energy increases significantly with temperature. Moreover, under elevated pressure, these conditions enable oxygen to oxidize both unsaturated and saturated fatty acids, which on average leads to a drop in predicted shelf life values.

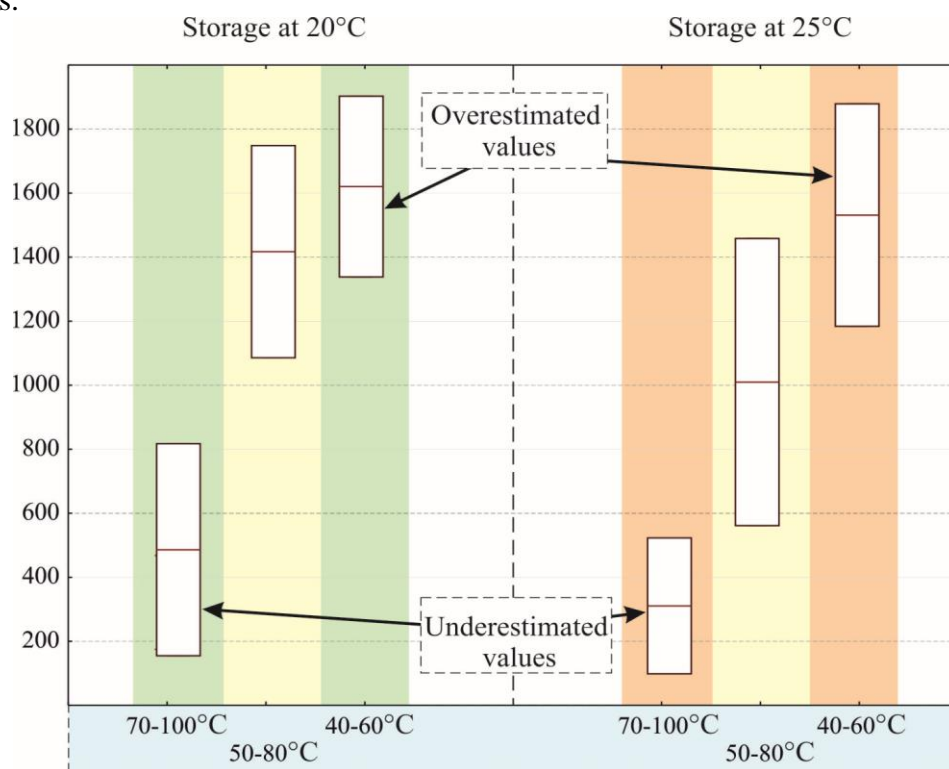


Figure 2. Predicted storage values (in days) with 95% confidence intervals (ordinate axis) for 10 types of vegetable oils across three temperature ranges (color-coded). The middle line within each rectangle indicates the mean value. Note: Values for the 70–100 °C range are from the literature; all other values were predicted using an ANN.

In this regard, a number of recent studies conducted without considering this factor at temperatures of 80–120 °C and above seem controversial [15, 19]. This approach is most likely justified for assessing the stability of distillates or fuels and lubricants for internal combustion engines, as suggested by American and European standards (ASTM D7525-14-

2024; EN 16091:2022). However, gasoline and other fuels consist of substances with similar chemical structures, which is not the case for vegetable oils or other food systems. They are mixtures of saturated and unsaturated structures that can differ by a factor of two in carbon skeleton length, among other differences.

Returning to Figure 2, we find that the values for the 40–60 °C range are overestimated relative to the average. The opposite is true: as temperature decreases, so do oxidative processes and activation energy, while the differences in predicted values increase. This logic can be extended further: as temperatures approach absolute zero, oxidation processes slow down so much that they would be expected to cease entirely at absolute zero. If research were conducted at such low temperatures, shelf life estimates would be overestimated, regardless of the food product's chemical composition. Conversely, at excessively high temperatures, all food storage periods are underestimated.

At both extremely high and low temperatures, not only the mean values are distorted but also the spread of estimates (sigma). This indicates the poor statistical power of such data to distinguish samples by shelf life. The largest range of values occurs in the 50–80 °C range, suggesting that this range provides the greatest discriminatory power and, consequently, the highest sensitivity of the method.

Based on the values obtained, we calculated the deviation (sigma) of the predicted induction point (IP) values relative to the mean. The graph is shown in Figure 3. As shown, the maximum deviation occurs at approximately 58 °C (this point represents the average value for the entire range). However, for the calculated values in the 40–100 °C range, the maximum spread — and therefore the sensitivity of the method — shifts slightly to approximately 66,5 °C, with a 95 % CI of 61–72 °C.

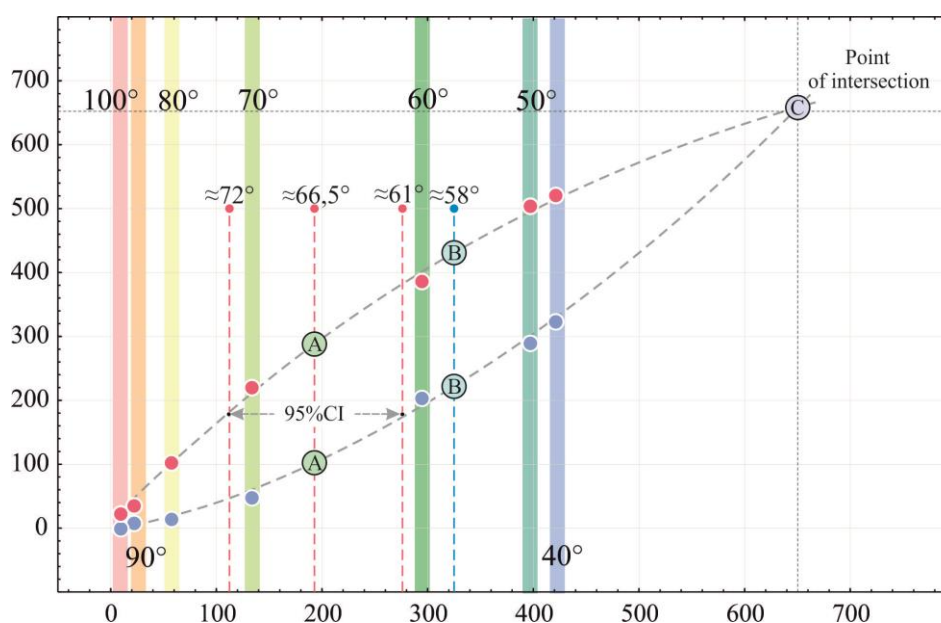


Figure 3. The spread of 95 % CI values (relative to the mean) for literature-based and modeled estimates, along with the corresponding trend lines (dotted). Note: The multi-colored lines correspond to IP values for samples obtained at different temperatures. The average values for ANN-predicted samples correspond to point A (approximately 66,5 °C). The average values based on graphical analysis of the entire data range are indicated by point B (approximately 58 °C). The 95 % CI for the forecast data is highlighted by two red dotted lines to the left and right of point A, corresponding to temperatures of approximately 61–72 °C. The intersection point labeled C indicates where the trend lines of the two data series cross (and corresponds to temperatures below 0 °C).

The IP calculations (Figure 3) suggest that ASLT shelf life estimates at temperatures outside the 53–72 °C range are either overestimated or underestimated. This range represents the maximum spread after subtracting the 95 % CI values for the average point (58 °C). The direction of the bias depends on whether the temperature is below or above this interval.

The sensitivity of the method decreases beyond this 95 % confidence interval. The use of high temperatures would be justified only if fats consisted of a single substance or of substances with similar physicochemical parameters. However, as mentioned earlier, food systems are multicomponent, which greatly distorts the values in such temperature ranges.

Notably, an earlier study – albeit using older methods – reached conclusions similar to ours [14, 17], though with a caveat regarding polyunsaturated fatty acids. The authors noted that if a sample has a high omega-3 fatty acid content, the temperature should not exceed 40–50 °C [21]. In general, temperatures above 60 °C are undesirable due to the same effect: increased activation energy accelerates oxygen-driven oxidation regardless of the chemical structure of the fatty acids. However, the results of such work (from the 1970s) are currently being ignored by some authors in pursuit of faster experimental turnaround.

Attempts to evaluate correlations between chemical composition and the obtained values revealed the following: shelf life (based on values at 70–100 °C) correlated with the proportion of saturated fatty acids at  $r = 0,46$ , with monounsaturated fatty acids at  $r = 0,45$ , and showed an inverse correlation with the proportion of unsaturated fatty acids ( $r = -0,52$ ). However, none of these correlations were statistically significant ( $p = 0,11$  to  $0,18$ ). Calculation of the relationship between the values of estimates obtained at temperatures of 50–80 °C and the proportions of fatty acids showed a correlation for saturated fatty acids  $r = -0,45$  ( $p = 0,2$ ); monounsaturated fatty acids  $0,09$  ( $p = 0,7$ ); and for polyunsaturated fatty acids  $r = -0,01$  ( $p = 0,9$ ).

An assessment of the relationship between the estimates obtained at 40–60 °C revealed correlations: for saturated fatty acids,  $r = -0,51$  ( $p = 0,12$ ); for monounsaturated fatty acids,  $r = -0,62$  ( $p = 0,052$ ); and for polyunsaturated fatty acids,  $r = 0,68$  ( $p = 0,028$ ), with the last being statistically significant.

These estimates can be clearly interpreted within the previously proposed paradigm: the oxidation rates of unsaturated fats (with double bonds) and saturated fatty acids converge as temperature increases (i.e., the range between them,  $\Delta$ , decreases), which undoubtedly distorts the resulting forecasts.

When searching for correlations with individual substances, it was found that the values obtained for the 70–100 °C range correlate with the content of fatty acids with the following carbon skeletons: C:17/0,  $r = 0,69$  ( $p = 0,027$ ); C:20/0,  $r = 0,92$  ( $p = 0,00014$ ); C:22/0,  $r = 0,86$  ( $p = 0,001$ ). For the 40–60 °C range, correlations were found with the concentration of low-chain and unsaturated fatty acids: C:14/0,  $r = 0,87$  ( $p = 0,0009$ ); C:16/0,  $r = -0,64$  ( $p = 0,043$ ); C:17/0  $r = -0,74$  ( $p = 0,012$ ); C:18/3,  $r = 0,71$  ( $p = 0,019$ ).

The values obtained using Tukey's test are also very interesting and are presented in Table 1. As is well known, Tukey's range test provides both statistical values and test power (confidence intervals  $1-\alpha$ ) for any data set. As can be seen from Table 1, when measurements are taken in the 50–80 °C range, the differentiation of the obtained values at the statistical level ( $p < 0,05$ ) is maximal. This holds despite the fact that a correlation of this parameter with the composition and chemical structure of fat components was found for all three categories of fatty acids.

It follows that the parameters and content of fatty acids are adequate for research purposes only in a narrow temperature range. In other cases, excess or insufficient activation energy does not allow reliable estimates (40–60 °C vs. 70–100 °C), which indicates a weakening of the statistical power of these ranges (i.e., differences in storage periods may not be correctly identified).

Table 1  
The values of the Tukey's test, for a generalized sample  
from literature data and predicted ANN.

| T         | SFA                             | MUFA                            | PUFA                            |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 70–100 °C | 3,3<br>(p=0,20)                 | 2,6<br>(p=0,44)                 | 2,7<br>(p=0,42)                 |
| 50–80 °C  | 7,9<br>(p=1,10E <sup>-5</sup> ) | 7,2<br>(p=5,84E <sup>-5</sup> ) | 7,3<br>(p=5,03E <sup>-5</sup> ) |
| 40–60 °C  | 1,54<br>(p=0,88)                | 0,88<br>(p=0,98)                | 0,94<br>(p=0,98)                |

Note: The test shows that the predicted values and chemical composition dependencies are significant for the central temperature range, but not for the remaining ranges, T – temperature; SFA – saturated fatty acids; MUFA – monounsaturated fatty acids; PUFA – polyunsaturated fatty acids.

We calculated the molar mass of a set of glycerol esters and fatty acids (coarsened without taking into account fat-soluble radicals such as chlorophylls or tocopherols). Calculations were performed taking into account the proportions of fatty acids (i.e., as weighted averages). We also estimated the average number of double bonds (C=C) and single carbon-carbon bonds (C-C) per fatty acid molecule, as well as the number of moles of these bonds. Finally, we estimated the activation energy of all these bonds based on the known energy required for a single bond.

Taking into account the molar values and fractions of fatty acids in the indicated oils, the weighted average number of C-C bonds was 16,13 per fatty acid molecule (calculated from the fatty acid composition reported in the literature). This corresponds to approximately three times more moles of these bonds (48,39) per average mole of vegetable oil. The amount of C=C bonds was a weighted average of 0,134 per fatty acid molecule, or 0,402 per mole of triglycerides. If we roughly assume the density of vegetable oils to be 0,914–0,921 g/mL and take into account that the authors used an average of 5 mL per analysis, then the sample mass was 4,57–4,60 g. Given the average molar mass of 279,28 g/mol, this corresponds to 0,0163–0,0165 moles of triglycerides. Based on the previous values, we conclude that 5 mL of oil contains approximately 0,78–0,79 moles of C-C bonds and 0,0066 moles of C=C bonds.

Taking into account the known activation energy of the carbon-carbon bond (without involving mineral or organic catalysts), we calculated the minimum amount of energy required for activation. Based on the literature data, we assume that the C-C bond reaction energy is approximately 90 kcal/mol (377 kJ/mol) [22]. When heated, given the specific heat capacity of iron, the energy transferred is approximately 0,64 kJ/°C/kg of iron (the approximate reactor mass is assumed to be 0,5 kg of iron). We calculated the amount of energy supplied to the sample when heated, for example, to 90 °C: 90 °C × 0,5 kg × 0,64 kJ / °C / kg = 28,8 kJ. At the same time, at least 1,5–3 kJ (taking into account 100% heat dissipation losses) is needed to initiate oxidation of a 0,0165 mol sample. Thus, we apply energy levels to food products that are approximately 10 times higher than the activation energy required for the analysis. It is not surprising that the values between samples «converge» with increasing temperature, because with the given parameters, it does not matter which chemical structure is oxidized – the activation energy for oxygen will be more than sufficient to oxidize any structure.

As additional evidence, we present the IR-Fourier spectral estimates for six types of oils (averaged) that were subjected to heat treatment and stored open at 20 °C indoors for six months. The graph is shown in Figure 4. As shown, the lower graph (shaded in color, corresponding to long-term stored samples) differs markedly from the other two (native oils and samples aged at 90 °C).

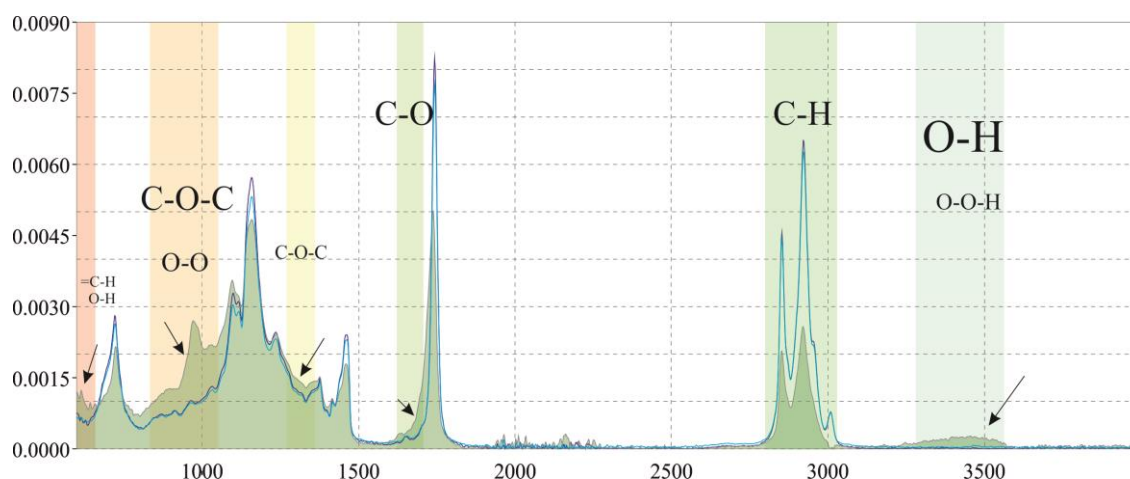


Figure 4. IR spectra for the studied oil samples, as well as for samples subjected to accelerated aging and aging in natural conditions at normal temperature for 6 months. Note: the color indicates the spectral characteristics that have changed with natural aging and the types of chemical bonds responsible for this.

In particular, when stored at room temperature, the proportion of molecular groups increases, and their wave characteristics extend the integral area of the broad peak in the 3200–3600  $\text{cm}^{-1}$  range, primarily due to peroxide ( $-\text{OOH}$ ) and hydroxyl ( $-\text{OH}$ ) groups. Additionally, peroxide and simple ether groups increase the peak area in the 900–1100  $\text{cm}^{-1}$  range, which is not observed for hardware - aged oils, since peroxides are thermally unstable.

A similar situation is observed on the graph for the 1200–1300  $\text{cm}^{-1}$  range. In contrast, for thermally aged oils, the intensity decreases slightly in the 2800–3000  $\text{cm}^{-1}$  range, but more markedly in the 500–600  $\text{cm}^{-1}$  range and in the vicinity of 1000  $\text{cm}^{-1}$ . This indicates different mechanisms of molecular oxidation. In thermally aged oils, degradation prevails without the formation of peroxides, aldehydes, or esters, whereas during natural aging, all these components accumulate.

This, in theory, allows for the creation of a mathematical apparatus (a computer program) that takes into account not only the shelf life of lipid fractions but also the conditions of such storage. Thus, according to both neural network data and IR Fourier spectrum analysis, excessive temperature (it is recommended not to exceed the average value of 58  $^{\circ}\text{C}$ ) involves mechanisms different from those of natural aging and is not a direct analogue. This leads to underestimation of the shelf life of food products.

**Conclusion.** Determining the shelf life of food is an important task directly related to the environmental and technological challenges of incomplete product consumption and subsequent disposal. These factors directly affect emissions and environmental pollution. If the expiration date is set incorrectly or underestimated, it encourages premature disposal of a suitable resource, increasing the mass of food waste in landfills. As is clear from the presented data, temperature ranges of 70–120  $^{\circ}\text{C}$  or higher (recommended in some studies) are inappropriate for estimating shelf life. This approach clearly saves time, but it distorts the values obtained during analysis and ultimately leads to a deterioration of the environmental situation.

In our opinion, elevated analysis temperatures (70  $^{\circ}\text{C}$  and above) are more suitable for determining non-food products, for example, the detonation stability of gasoline fractions of alkanes or cosmetic components. Firstly, gasoline should not contain rapidly oxidizing components, as these would lead to engine destruction upon detonation (ignition would occur prematurely). Secondly, fuel components should not differ significantly from each other in chemical composition — which is not the case for food systems.

In conclusion, we note that the use of machine learning algorithms and modern spectrometry methods has made it possible to identify the existing problem quite elegantly.

## REFERENCES

1. Xue, L. Missing Food, Missing Data? A Critical Review of Global Food Losses and Food Waste Data / L. Xue, G. Liu, J. Parfitt, X. Liu, E. Van Herpen, Å. Stenmarck, C. O'Connor, K. Östergren, S. Cheng // *Environmental Science & Technology*. – 2017. – Vol. 51, No. 12. – P. 6618–6633. – DOI: 10.1021/acs.est.7b00401
2. Reyes, V. The Potential for Reducing Food Waste through Shelf-Life Extension: Actionable Insights from Data Digitization / V. Reyes, E. Cahill, K. E. Mis Solval// *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, No. 7. – P. 2986. – DOI: 10.3390/su16072986
3. Steele, R. Understanding and measuring the shelf-life of food / R. Steele. – NW, Boca Raton: Woodhead Publishing Ltd. – 2004. – 448 p. – DOI: 10.1201/9781439823354
4. Gerbig, S. Real-Time Food Authentication Using a Miniature Mass Spectrometer / S. Gerbig, S. Neese, A. Penner, B. Spengler, S. Schulz // *Anal. Chem.* – 2017. – Vol. 89, No. 20. – P. 10717–10725. – DOI: 10.1021/acs.analchem.7b01689
5. Lindon, J. C. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry / J. C. Lindon. – Academic Press. – 2000. – P. 2651–2661. – DOI: 10.1016/B978-0-12-803224-4
6. De Boer, A. A. Examination of marine and vegetable oil oxidation data from a multi-year, third-party database / A. A. De Boer, A. Ismail, K. Marshall, G. Bannenberg, Y. Kevin L, R. William // *Food Chemistry*. – 2018. – Vol. 254. – P. 249–255. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.180
7. Ghohestani, E. Colorimetric determination of peroxide value in vegetable oils using a paper based analytical device / E. Ghohestani, J. Tashkhourian, B. Hemmateenejad // *Food Chemistry*. – 2023. – Vol. 403. – P. 134345. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134345
8. Sharma, S. Acid Value of Various Domestic Uses Oil / S. Sharma, J. V. Kumar // *Res. Journ. Scie. and Technol.* – 2015. – Vol. 7, No. 2. – P. 109. – DOI: 10.5958/2349-2988.2015.00012.1
9. Rohman, A. Infrared spectroscopy for quantitative analysis and oil parameters of olive oil and virgin coconut oil: A review / A. Rohman // *International Journal of Food Properties*. – 2017. – Vol. 20, No. 7. – P. 1447–1456. – DOI: 10.1080/10942912.2016.1213742
10. García Martín, J. F. Potential of Near-Infrared Spectroscopy for the Determination of Olive Oil Quality / J. F. García Martín // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 8. – P. 2831. – DOI: 10.3390/s22082831
11. Qian, Y. Purity of Olive Oil Commercially Available in Poland / Y. Qian, A. Grygier, A. Majewski, W. Dorota, A. Siger, M. Rudzinska // *J. Oleo Sci.* – 2022. – Vol. 71, No. 1. – P. 43–50. – DOI: 10.5650/jos.ess21222
12. Amarnath, V. Scavenging 4-Oxo-2-nonenal / V. Amarnath, K. Amarnath // *Chem. Res. Toxicol.* – 2015. – Vol. 28, No 10. – P. 1888–1890. – DOI: 10.1021/acs.chemrestox.5b00301
13. Zarkovic, N. 4-Hydroxynonenal as a bioactive marker of pathophysiological processes / N. Zarkovic // *Molecular Aspects of Medicine*. – 2003. – Vol. 24, No 4–5. – P. 281–291. – DOI: 10.1016/s0098-2997(03)00023-2
14. Frankel, E. N. Lipid oxidation / E. N. Frankel // *Progress in Lipid Research*. – 1980. – Vol. 19, No. 1–2. – P. 1–22. – DOI: 10.1016/0163-7827(80)90006-5
15. Aktar, T. Determining the Arrhenius Kinetics of Avocado Oil: Oxidative Stability under Rancimat Test Conditions / T. Aktar, E. Adal // *Foods*. – 2019. – Vol. 8, No. 7. – P. 236. – DOI: 10.3390/foods8070236
16. Rabiej-Kozioł, D. Steryl Sinapate as a New Antioxidant to Improve Rapeseed Oil Quality during Accelerated Shelf Life / D. Rabiej-Kozioł, M. P. Krzemiński, A. Szydłowska-Czerniak // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 11. – P. 3092. – DOI: 10.3390/ma14113092
17. Labuza, T. P. Kinetics of lipid oxidation in foods / T. P. Labuza, L. R. Dugan // *C R C Critical Reviews in Food Technology*. – 1971. – Vol. 2, No. 3. – P. 355–405. – DOI: 10.1080/10408397109527127
18. Ke, P. J. Bunsen coefficient for oxygen in marine oils at various temperatures determined by an exponential dilution method with a polarographic oxygen electrode / P. J. Ke, R. G. Ackman // *J. Am. Oil Chem. Soc.* – 1973. – Vol. 50. – P. 429–435. – DOI: 10.1007/BF02639847
19. Tsao, C.-H. Application of OXITEST for Prediction of Shelf-Lives of Selected Cold-Pressed Oils / C.-H. Tsao, C.-W. Chang, Y.-C. Ho, Y.-K. Chuang, W.-J. Lee // *Front. Nutr.* – 2021. – Vol. 8. – P. 763524. – DOI: 10.3389/fnut.2021.763524
20. Bahmani L. ANN modeling of extraction kinetics of essential oil from tarragon using ultrasound pre-treatment / L. Bahmani, M. Aboonajmi, A. Arabhosseini, H. Mirsaeedghazi // *Engineering in Agriculture*. – 2018. – Vol. 11, No. 1. – P. 25–29. – DOI: 10.1016/j.eaef.2017.10.003

21. Frankel, E. N. Lipid Oxidation (Second Edition) / E. N. Frankel. – Oily Press. – 2005. – 722 p. – DOI: 10.1533/9780857097927
22. Parr, J. M. Carbon-carbon bond activation by Mg, Al, and Zn complexes / J. M. Parr, M. R. Crimmin // Chem Sci. – 2023. – Vol. 14, No. 40. – P. 11012–11021. – DOI: 10.1039/D3SC03336H

## ВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ASLT ЗАНИЖАЮТ СРОК ГОДНОСТИ ПРОДУКТОВ

*В. В. Горбачев, М. А. Беляева, А. А. Смирнов*

Проблема сроков годности пищевых систем является не только технической, но и глобальной экологической проблемой. Широко применяемый метод ASLT (ускоренное тестирование срока годности) как для продуктов питания, кормов, так и лекарственных средств, требует проверки обоснованности его температурных режимов, в том числе, если речь идет об аппаратных решениях, позволяющих производить автоматизированное прогнозирование сроков хранения. Для проверки адекватности оценок в работе были привлечены как алгоритмы машинного обучения для реанализа опубликованных в литературе данных, так и собственные результаты, полученные с применением ИК-Фурье спектроскопии при полугодичном состаривании образцов. Было показано, что рекомендуемые условия проведения ASLT при температурах 70-100°C и выше, экономят только время проведения анализа, и больше подходят для оценки стабильности непивных образцов (например, бензинов), нежели для продуктов питания.

**Ключевые слова:** Ускоренное тестирование срока годности (ASLT), занижение значений, ИК-спектроскопия пищевых масел, окисление пищевых продуктов, энергия активации химических реакций ( $E_a$ ), искусственная нейронная сеть.

*Received 27.05.2026*

### *Горбачев Виктор Валерьевич*

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории аквакультуры, Санкт-Петербургский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: genetic2@yandex.ru  
ORCID: 0000-0003-2737-8604  
SPIN-код: 1919-0725  
Author ID: 233155

### *Gorbachev Victor Valeryevich*

Candidate of Biological Sciences (PhD), Senior Researcher at the Laboratory of Aquaculture; St. Petersburg Branch of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO State Research University (GosNIORH named after L.S. Berg), St. Petersburg, RF.

### *Беляева Марина Александровна*

доктор технических наук, профессор кафедры пищевых технологий и биоинженерии, кафедры информатики, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, РФ.  
E-mail: belyaeva.ma@rea.ru  
SPIN-код: 2811-0040  
Author ID: 660780

### *Belyaeva Marina Aleksandrovna*

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Food Technology and Bioengineering, of the Department of Computer Science, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, RF.

### *Смирнов Андрей Анатольевич*

доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела морских рыб Дальнего Востока; ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», г. Москва, РФ.  
E-mail: andrsmir@mail.ru  
ORCID: 0009-0003-4940-6175  
SPIN-код: 4426-1940  
Author ID: 878231

### *Smirnov Andrey Anatolyevich*

Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of the Marine Fish Department of the Far East, Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO Federal State Budgetary Institution, Moscow, RF.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 612.76. 796

DOI: 10.5281/zenodo.20799684

EDN: SXGTWT

**ПУЛЬСОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕНЕСЕННОГО ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ОБЪЕМА ВЫПОЛНЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УПРАЖНЕНИЙ В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**© 2026. *Н. И. Аньшаков, Р. В. Тамбовцева*

Цель исследования – оценить объем перенесенного физиологического напряжения, как характеристику внешней работы при выполнении силовых упражнений (жим лежа, приседание, становая тяга) в режиме предельных повторений, на уровне интенсивности - 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ. В исследовании участвовали 12 спортсменов, из различных видов спорта. Для определения МПК и предельной ЧСС использовали тест с повышением нагрузки до волевого отказа на беговом тредбане. Для измерения эргометрических и физиологических характеристик физической нагрузки использовали линейный энкодер GumAwaqe, портативный эргоспирометр MetaLyzer и анализатор лактата Lactate Plus. Для реализации цели исследования были использованы показатели нагрузочной экспозиции, рассчитанные по потреблению  $O_2$  и по ЧСС ( $H\dot{V}O_2$  и  $H\dot{E}cс$ ).  $H\dot{V}O_2$  и  $H\dot{E}cс$  во всех упражнениях сильно линейно взаимосвязаны между собой ( $r = 0,85-0,95$ ) и с максимальным приростом концентрации лактата ( $\Delta La$ ) ( $\rho = 0,81-0,89$ ); с внешней механической работой ( $A$ ) выявлены умеренные и сильные связи:  $\rho = 0,65-0,89$ .

Полученные результаты свидетельствуют о возможности оценки перенесенного физиологического напряжения, как косвенной характеристики объема выполненной механической работы и величины накопленного лактата в упражнении, с помощью показателя  $H\dot{E}cс$ .

**Ключевые слова:** интенсивность упражнения, нагрузочная экспозиция, внешняя механическая работа, лактат, ЧСС, потребление кислорода, силовые упражнения.

**Введение.** Эргометрический подход для оценки силовых упражнений основан на измерении и расчете ряда характеристик: тоннажа, работы, мощности, силы, скорости. Наиболее доступным в спортивной практике является расчет тоннажа упражнения [1], для оценки остальных характеристик силовых упражнений необходима специальная измерительная аппаратура и участие специалистов высокого уровня. Однако, только по тоннажу невозможно оценить объем перенесенного физиологического напряжения. При этом, измерение концентрации лактата в крови требует инвазивного вмешательства, а измерение потребления кислорода требует специалистов высокой квалификации и дорогостоящего газометрического оборудования, которое неудобно использовать во время упражнений. Эти методы сильно ограничены в тренировочной практике. При выполнении силовых упражнений простейшим методом контроля является измерение ЧСС в процессе выполнения нагрузки и в восстановительном периоде после её завершения.

Для оценки внешней физической работы мы исходили из модели, предложенной в недавней публикации Impellizzeri с соавторами [2], которые исследовали воздействие физической нагрузки на организм человека. В этой работе для количественного описания тренировочного воздействия авторами был предложен показатель – нагрузочная экспозиция ( $H\dot{E}$ ) [2], аналогичный кумулятивному воздействию (cumulative exposure) из эпидемиологии [3, 4].

НЭ есть внутренняя (физиологическая) нагрузка, которая представляет собой произведение интенсивности упражнения на его продолжительность. Если интенсивность выражена в относительных единицах, то произведение интенсивности на продолжительность (в минутах) имеет размерность времени – это согласуется с традиционными моделями учёта внутренней нагрузки, такими как TRIMP (Training Impulse), предложенными Vanister [5], Edwards [6], Lucia et al. [7], Foster et al. [8] и др. Для оценки интенсивности упражнения мы использовали УИФЗ (удельная интенсивность физиологических затрат) – показатель, предложенный для циклических и тяжелоатлетических упражнений [9, 10].

В нашем исследовании мы проверяем возможность использования НЭ для количественной оценки выполненной механической работы и степени тяжести перенесенной физической нагрузки при выполнении силовых упражнений в различных режимах интенсивности. Основное преимущество данного подхода в оценке нагрузки – методическая простота и удобство измерения в контексте реального тренировочного процесса.

Цель исследования – оценить объем перенесенного физиологического напряжения, как характеристику внешней работы при выполнении силовых упражнений (жим лежа, приседание, становая тяга) в режиме предельных повторений, на уровне интенсивности – 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на базе Центра спортивных инновационных технологий и подготовки сборных команд Москомспорта и Российского университета спорта. Экспериментальная работа включала три этапа (см. табл. 1).

Таблица 1

## Организация и этапы исследования

| № | Этап исследования   | Содержание этапа исследования  |
|---|---|--|
| 1 | Измерение антропометрических показателей.<br>Определение максимальных функциональных возможностей (МПК и ЧСС <sub>макс</sub> ). | Измерение длины тела осуществлялось с применением металлического антропометра. Оценка массы тела и анализ компонентного состава выполнялись методом биоимпедансометрии с использованием многочастотного анализатора состава тела InBody.<br>Для определения МПК и предельной ЧСС использовалось тест с повышением нагрузкой до волевого отказа на беговом тредбане |
| 2 | Определение одноповторного максимума (1ПМ) и непосредственное выполнение базовых силовых упражнений.                            | За 1–2 дня до выполнения серии упражнений определяли 1ПМ. Нагрузка выполнялась в режиме 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ на предельное количество повторений. Во всех измерениях проводился параллельный мониторинг газообмена и ЧСС.  |
| 3 | Анализ и обработка полученных данных.   | Расчет эргометрических и физиологических показателей. Статистическая обработка данных и выявление корреляционных связей между показателями.  |

Методика расчета показателей физической работы, полученных на основании данных о потреблении кислорода и ЧСС в динамике работы и восстановления, представлены в табл. 2, 3.

Внешняя физическая работа (А, кГм) рассчитывалась:

$$A = n \times m \times h, \text{ где}$$

n – количество повторений, m – вес штанги (кГ),

h – вертикальное перемещение штанги в фазе подъёма (м).

Таблица 2

Расчетные физиологические показатели физической работы, полученные на основании данных о потреблении кислорода в динамике работы и восстановления

| Показатели по потреблению O <sub>2</sub> |                                     |   |
|--|-------------------------------------|---|
| Обозначения                              | Формула                             | Физиологический смысл   |
| KЗ                                       | = КП + КД                           | Кислородный запрос упражнения (KЗ, л): сумма объема потребленного кислорода за время работы (кислородный приход – КП) и кислородного долга за 10 мин восстановления (КД), сверх предстартового уровня   |
| СОКЗ                                     | = KЗ / t                            | Скорость образования кислородного запроса (СОКЗ, л/мин): отношение кислородного запроса ко времени работы в упражнении (t, мин)   |
| ΔМПК                                     | = МПК – прПО <sub>2</sub>           | Индивидуальный максимум потребления кислорода за вычетом исходного уровня (ΔМПК): разница между максимальным потреблением кислорода (МПК) и предстартовым уровнем (прПО <sub>2</sub> , л/мин)   |
| УИФЗ <sub>O<sub>2</sub></sub>            | = СОКЗ / ΔМПК                       | Удельная интенсивность физиологических затрат по кислороду (УИФЗ <sub>O<sub>2</sub></sub> , у. ед.) за время работы в упражнении: отношение скорости образования кислородного запроса (СОКЗ) к индивидуальному уровню максимального потребления кислорода за вычетом предстартового уровня. Одна единица УИФЗ <sub>O<sub>2</sub></sub> соответствует уровню кислородного запроса, равного величине ΔМПК |
| НЭ <sub>O<sub>2</sub></sub>              | = t × УИФЗ <sub>O<sub>2</sub></sub> | Нагрузочная экспозиция (НЭ <sub>O<sub>2</sub></sub> , мин), объем физиологической работы в упражнении, рассчитанный по объемам потребленного O <sub>2</sub>   |

Таблица 3

Расчетные физиологические показатели физической работы, полученные на основании данных о частоте сердечных сокращений (ЧСС) в динамике работы и восстановления

| Показатели по ЧСС     |   |  |
|-----------------------|---|--|
| Обозначения           | Формула                                     | Физиологический смысл  |
| ПЗ                    | = ПП + ПД                                   | Пульсовой запрос (ПЗ, уд); суммарная пульсовая стоимость упражнения: пульсовая сумма за время работы (пульсовой приход – ПП) и за 5 мин восстановления (пульсовой долг – ПД), сверх предстартового уровня  |
| СОПЗ                  | = ПЗ / t                                    | Скорость образования пульсового запроса упражнения (СОПЗ, уд/мин): отношение суммарной пульсовой стоимости упражнения ко времени работы в упражнении (t, мин)  |
| ΔЧСС <sub>макс.</sub> | = ЧСС <sub>макс.</sub> – ЧСС <sub>пр.</sub> | Пульсовой резерв (ΔЧСС <sub>макс.</sub> , уд/мин): разница между максимальной ЧСС (ЧСС <sub>макс.</sub> , определяется в рамп-тесте) и предстартовым уровнем ЧСС в упражнении (ЧСС <sub>пр.</sub> )  |
| УИФЗ <sub>чсс.</sub>  | = СОПЗ / ΔЧСС <sub>макс.</sub>              | Удельная интенсивность физиологических затрат по ЧСС за время работы в упражнении (УИФЗ <sub>чсс.</sub> , у. ед.): отношение скорости образования пульсового запроса упражнения к пульсовому резерву (ΔЧСС <sub>макс.</sub> ). Одна единица УИФЗ <sub>чсс.</sub> соответствует уровню пульсового запроса, равного величине ΔЧСС <sub>макс.</sub> |
| НЭ <sub>чсс.</sub>    | = t × УИФЗ <sub>чсс.</sub>                  | Нагрузочная экспозиция (НЭ <sub>чсс.</sub> , мин), объем физиологической работы в упражнении, рассчитанная по пульсовым суммам   |

Протокол исследования предусматривал выполнение силовых упражнений с максимальным количеством повторений, в связи с чем восстановление ЧСС после завершения работы в ряде случаев превышало пять минут. Тем не менее, быстрая фаза

восстановления завершаются к пятой минуте поствазочного периода, поэтому пульсовой долг рассчитывали именно за этот временной интервал. При этом, если у конкретного испытуемого ЧСС возвращалась к стабильному предстартовому уровню ранее пяти минут (либо потребление  $O_2$  – ранее десяти минут), расчёт пульсового и кислородного долга проводили по фактической длительности восстановительного периода для данного спортсмена.

Для проверки информативности полученных показателей с помощью измерения ЧСС был проведен сравнительный анализ с их аналогами, полученными с помощью измерения объемов потребленного кислорода. С этой целью была организована специальная серия исследований, в рамках которой испытуемые в разные дни выполняли базовые силовые упражнения с тяжелоатлетической штангой: жим штанги лёжа на горизонтальной скамье, приседания со штангой на спине и становая тяга классическая. В дальнейшем упражнения именуется как «жим лёжа», «приседания» и «становая тяга». Нагрузка выполнялась в режиме предельных повторений, на уровне интенсивности - 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ. Измерения проводились после завершения разминки: в течение пяти минут регистрировался предстартовый уровень показателей в положении сидя, затем – в ходе выполнения работы и в десятиминутный восстановительный период при сохранении положения сидя.

Программа исследования была одобрена на собрании этического комитета по проверке подготовки и проведения медико-биологических и клинических исследований РУС «ГЦОЛИФК» (протокол №1 от 03.02.2025 г.). Все спортсмены перед исследованием получали медицинское заключение о возможности проведения тестов с максимальными нагрузками. В момент проведения исследований все спортсмены были здоровы и находились в оптимальном физическом состоянии в подготовительном этапе спортивной деятельности. От каждого было получено информированное согласие на участие в исследовании.

Достоверность результатов обеспечивалась строгой стандартизацией протокола выполнения упражнений, использованием валидированного оборудования, а также параллельной регистрацией биохимических, физиологических и эргометрических показателей. Совокупность этих факторов минимизирует случайную ошибку измерения и повышает надёжность выявленных зависимостей. Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием стандартных методов описательной и сравнительной статистики. Расчёты выполнены в программных пакетах Statistica 13.0 и Microsoft Excel. Коэффициент корреляции Спирмена применялся в тех случаях, когда распределение хотя бы одного из связанных показателей отличалось от нормального, а также при наличии признаков рангового или порядкового характера. Коэффициент корреляции Пирсона использовался для тех пар показателей, у которых оба распределения не имели статистически значимых отклонений от нормального закона по критерию Шапиро–Уилка и удовлетворяли требованиям параметрической статистики (линейность связи, отсутствие выраженных выбросов).

**Результаты исследования.** В результате измерений получены следующие усредненные данные, описывающие выборку испытуемых: возраст –  $20,6 \pm 4,6$  лет, масса тела –  $77,8 \pm 10,2$  кг, МПК –  $49,3 \pm 6,1$  мл/мин/кг, ЧСС<sub>max</sub> –  $195 \pm 12$  уд/мин.

Эргометрические и физиологические показатели испытуемых (n=12) в различных предельных упражнениях в режиме 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ представлены в таблицах 4–6.

Таблица 4

Эргометрические и физиологические показатели исследования в упражнении «жим лежа» (n=72, M ± σ).

| Показатели              | % от 1ПМ |          |          |          |          |          |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                         | 100      | 90       | 80       | 70       | 60       | 50       |
| Жим лежа                |          |          |          |          |          |          |
| вес <sub>шт.</sub> , кг | 81±16    | 72±14    | 65±13    | 57±11    | 49±10    | 40 ±8    |
| n, кол-во повтор.       | 1±0      | 4±1      | 8±2      | 15±2     | 21±4     | 30±2     |
| h, м                    | 0,36±0,0 | 0,36±0,0 | 0,37±0,0 | 0,36±0,1 | 0,37±0,0 | 0,37±0,1 |
| Тупр, кг                | 81±16    | 281±102  | 548±149  | 831±214  | 1019±228 | 1209±220 |
| t, мин                  | 0,1±0,0  | 0,2±0,1  | 0,4±0,1  | 0,6±0,1  | 0,76±0,2 | 1,0±0,2  |
| pO <sub>2</sub> , л     | 0,04±0,0 | 0,1±0,1  | 0,2±0,1  | 0,4±0,1  | 0,5±0,2  | 0,7±0,2  |
| во <sub>2</sub> , л     | 1,2±0,5  | 1,8±0,7  | 2,0±0,7  | 2,3±0,8  | 2,5±0,9  | 2,7±1,0  |
| ПСр, уд                 | 3,6±1,0  | 13,7±7   | 24,6±9   | 38,9±10  | 50,0±17  | 73,4±18  |
| ПСв, уд                 | 118±47   | 160±62   | 182±41   | 200±54   | 207±45   | 224±49   |
| УИФЗ <sub>о2</sub>      | 6,0±2,6  | 2,6±1,0  | 1,6±0,6  | 1,3±0,5  | 1,1±0,4  | 0,9±0,3  |
| УИФЗ <sub>чсс</sub>     | 13,6±5,1 | 5,9±2,0  | 3,8±0,9  | 2,9±0,7  | 2,5±0,5  | 2,2±0,4  |
| A, кгМ                  | 29±6     | 103±43   | 198±50   | 294±78   | 380±98   | 446±94   |
| НЭ <sub>чсс</sub> , мин | 0,9±0,3  | 1,2±0,4  | 1,5±0,3  | 1,8±0,3  | 1,9±0,4  | 2,1±0,4  |
| НЭ <sub>о2</sub> , мин  | 0,4±0,1  | 0,5±0,2  | 0,6±0,2  | 0,7±0,2  | 0,8±0,2  | 0,9±0,3  |
| ΔЛа, ммоль/л            | 1,0±0,2  | 2,4±0,7  | 3,4±0,6  | 4,5±0,7  | 4,9±0,8  | 5,7±0,7  |
| максЛа, ммоль/л         | 2,04±1,8 | 3,5±0,6  | 4,5±0,6  | 5,6±0,5  | 6,2±0,8  | 6,9±0,7  |

Таблица 5

Эргометрические, биохимические и физиологические показатели исследования (M ± σ), полученные в упражнении «становая тяга» до предела в режиме 100, 90, 80, 70, 60, 50 % от 1ПМ (n=72).

| Показатели              | % от 1ПМ  |           |           |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         | 100       | 90        | 80        | 70        | 60        | 50        |
| Становая тяга           |           |           |           |           |           |           |
| вес <sub>шт.</sub> , кг | 123±25    | 111±22    | 98±20     | 86±17     | 74±14     | 61±12     |
| n, кол-во повтор.       | 1±0       | 6±3       | 12±5      | 17±6      | 25±6      | 36±7      |
| t, мин                  | 0,07±0,01 | 0,33±0,12 | 0,57±0,16 | 0,78±0,21 | 1,06±0,25 | 1,44±0,26 |
| Тупр, кг                | 123±25    | 609±220   | 1100±450  | 1442±488  | 1772±422  | 2164±469  |
| h, м                    | 0,56±0,1  | 0,55±0,1  | 0,55±0,1  | 0,56±0,1  | 0,55±0,1  | 0,55±0,1  |
| pO <sub>2</sub> , л     | 0,04±0,02 | 0,2±0,1   | 0,5±0,2   | 0,9±0,5   | 1,5±0,6   | 2,4±0,8   |
| во <sub>2</sub> , л     | 1,6±0,6   | 3,1±1,0   | 3,9±1,0   | 4,2±1,0   | 4,5±0,9   | 4,8±0,9   |
| ПСр                     | 4±1       | 22±9      | 41±14     | 63±24     | 92±23     | 134±33    |
| ПСв                     | 136±41    | 201±53    | 243±41    | 261±41    | 281±37    | 300±41    |
| УИФЗ <sub>о2</sub>      | 6,3±2,1   | 3,0±1,3   | 2,3±0,5   | 1,9±0,5   | 1,7±0,4   | 1,4±0,3   |
| УИФЗ <sub>чсс</sub>     | 14,6±5,7  | 5,6±2,5   | 3,8±0,9   | 3,2±0,8   | 2,7±0,5   | 2,3±0,4   |
| A, кгМ                  | 69±17     | 334±125   | 603±232   | 809±291   | 983±296   | 1197±340  |
| НЭ <sub>чсс</sub> , мин | 0,3±0,1   | 0,9±0,3   | 1,4±0,6   | 1,8±0,5   | 2,0±0,5   | 2,5±0,3   |
| НЭ <sub>о2</sub> , мин  | 0,4±0,2   | 0,9±0,3   | 1,2±0,3   | 1,4±0,3   | 1,7±0,4   | 2,0±0,4   |
| ΔЛа, ммоль/л            | 1,0±0,1   | 2,8±0,9   | 4,1±1,1   | 5,3±1,8   | 6,5±1,8   | 7,8±2,1   |
| максЛа, ммоль/л         | 2,2±0,4   | 4,1±1,0   | 5,4±1,2   | 6,6±1,9   | 7,7±1,9   | 9,1±2,1   |

Представленные в таблицах 4–6 все эргометрические и физиологические показатели повышаются со снижением интенсивности (% от 1ПМ) и, соответственно, увеличением продолжительности упражнения. При этом, значения пульсовых показателей по величине больше, чем значения аналогичных показателей, рассчитанных по O<sub>2</sub>. Это может быть связано с тем, что ЧСС отражает комплексный характер хронотропного ответа на нагрузку [11–15].

Таблица 6

Эргометрические, биохимические и физиологические показатели исследования ( $M \pm \sigma$ ), полученные в упражнении «приседание» до предела в режиме 100, 90, 80, 70, 60, 50% от 1ПМ ( $n=72$ ).

| Показатели              | % от 1ПМ |          |          |          |          |          |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                         | 100      | 90       | 80       | 70       | 60       | 50       |
| Приседание              |          |          |          |          |          |          |
| вес <sub>шт.</sub> , кг | 111±25   | 100±23   | 89±20    | 78±17    | 66±15    | 55±13    |
| n, кол-во повтор.       | 1±0      | 7±2      | 12±3     | 22±5     | 33±4     | 49±10    |
| t, мин                  | 0,1±0,0  | 0,4±0,1  | 0,7±0,2  | 1,1±0,2  | 1,5±0,2  | 2,1±0,4  |
| h, м                    | 0,53±0,1 | 0,52±0,1 | 0,53±0,1 | 0,53±0,1 | 0,53±0,1 | 0,54±0,1 |
| Тупр, кг                | 111±25   | 676±266  | 1073±296 | 1683±286 | 2124±465 | 2664±774 |
| pO <sub>2</sub> , л     | 0,04±0,0 | 0,3±0,2  | 0,8±0,4  | 1,5±0,3  | 2,3±0,5  | 3,7±0,8  |
| во <sub>2</sub> , л     | 1,7±0,6  | 3,3±0,7  | 3,8±0,6  | 4,5±0,7  | 4,6±0,8  | 5,0±0,8  |
| ПСр                     | 5±2      | 32±13    | 55±16    | 97±18    | 136±29   | 208±39   |
| ПСв                     | 138±44   | 220±32,3 | 256±43   | 292±38   | 301±51   | 344±37   |
| УИФЗ <sub>O2</sub>      | 6,9±2,3  | 2,8±0,7  | 2,0±0,5  | 1,6±0,4  | 1,4±0,3  | 1,2±0,3  |
| УИФЗ <sub>ЧСС</sub>     | 15,0±5,1 | 5,0±1,2  | 3,5±0,8  | 2,7±0,4  | 2,3±0,3  | 2,0±0,3  |
| A, кгМ                  | 59±13    | 345±119  | 562±150  | 890±178  | 1122±251 | 1402±310 |
| НЭ <sub>ЧСС</sub> , мин | 1,1±0,4  | 1,9±0,4  | 2,3±0,3  | 2,8±0,4  | 3,3±0,4  | 4,0±0,5  |
| НЭ <sub>O2</sub> , мин  | 0,5±0,2  | 1,0±0,3  | 1,3±0,3  | 1,7±0,3  | 2,0±0,4  | 2,5±0,4  |
| ΔЛа, ммоль/л            | 1,1±0,3  | 3,2±0,9  | 4,6±1,0  | 6,7±1,6  | 8,0±2,0  | 9,7±2,1  |
| максЛа, ммоль/л         | 2,1±0,5  | 4,3±0,9  | 5,7±0,9  | 7,9±1,6  | 9,2±2,0  | 10,9±2,1 |

Примечание:

максЛа – максимальная концентрация лактата;

Тупр – тоннаж упражнения;

A – внешняя механическая работа, выполненная в упражнении;

НЭ<sub>O2</sub> – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по O<sub>2</sub>;

НЭ<sub>ЧСС</sub> – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по ЧСС;

НЭ<sub>анO2</sub> – анаэробная часть нагрузочной экспозиции, рассчитанная по O<sub>2</sub>;

НЭ<sub>анЧСС</sub> – анаэробная часть нагрузочной экспозиции, рассчитанная по ЧСС.

Мы установили корреляционные взаимосвязи между выполненной работой и одноименными показателями НЭ. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ( $\rho$ )\* и Пирсона ( $r$ )\*\* между величинами НЭ и величинами A, (при  $p < 0,001$ ).

| Показатели               | НЭ <sub>O2</sub> | A     |
|--------------------------|------------------|-------|
| Жим лежа ( $n=72$ )      |                  |       |
| НЭ <sub>O2</sub>         | 1,00             | 0,65* |
| НЭ <sub>ЧСС</sub>        | 0,85**           | 0,66* |
| Приседание ( $n=72$ )    |                  |       |
| НЭ <sub>O2</sub>         | 1,00             | 0,79* |
| НЭ <sub>ЧСС</sub>        | 0,95**           | 0,89* |
| Становая тяга ( $n=72$ ) |                  |       |
| НЭ <sub>O2</sub>         | 1,00             | 0,86* |
| НЭ <sub>ЧСС</sub>        | 0,92**           | 0,85* |

Как показывают результаты, представленные в таблице 7, показатели НЭ<sub>O2</sub> и НЭ<sub>ЧСС</sub> тесно линейно взаимосвязаны между собой во всех упражнениях. Это объясняется тем, что УИФЗ<sub>ЧСС</sub> и УИФЗ<sub>O2</sub> являются множителями при расчетах показателей нагрузочной экспозиции и при этом тесно взаимосвязаны между собой ( $\rho \geq 0,92$ ).

В упражнениях «становая тяга» и «приседание» выявлены высокие корреляционные связи показателей  $HЭ_{чсс}$  и  $A$ . Однако, в отличие от этих упражнений, в упражнении «жим лежа» уровень корреляционной связи – умеренный. Это, вероятно, связано с биомеханическими особенностями этого упражнения: положением тела и локальным характером мышечной работы и др. При этом, индивидуальные корреляционные связи между  $HЭ_{чсс}$  и  $A$  у всех спортсменов во всех упражнениях (в том числе и в жиме лежа) высокие ( $\rho = 0,90–0,99$ ;  $p < 0,01$ ). Очевидно, это связано с тем, что расчеты производились на основе индивидуальных антропометрических, эргометрических и физиологических показателей испытуемых. Другими словами - для оценки и планирования тренировочной нагрузки спортсменов целесообразно использовать их индивидуальные показатели.

Выполненная механическая работа,  $HЭ$  и величина прироста концентрации лактата тесно связаны друг с другом.  $HЭ$  сильно линейно связана с  $A$  и  $\Delta La$ , между  $\Delta La$  и  $A$  – высокие линейные связи (см. табл. 9).

Таблица 9

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ( $\rho$ ) между  $\Delta La$  и  $A$ ,  $\Delta La$  и  $HЭ$  при выполнении силовых упражнений в режиме 100,90,80,70,60,50% от 1ПМ ( $n=72$ , при  $p < 0,001$ ).

| Показатели | Жим лежа    | Приседание  | Становая тяга |
|------------|-------------|-------------|---------------|
|            | $\Delta La$ | $\Delta La$ | $\Delta La$   |
| $A$        | 0,89        | 0,95        | 0,91          |
| $HЭ_{O_2}$ | 0,81        | 0,92        | 0,89          |
| $HЭ_{чсс}$ | 0,83        | 0,93        | 0,91          |

Как показывает табл. 9  $HЭ_{O_2}$  и  $HЭ_{чсс}$  прямо и сильно связана как с количеством механической работы, так и с величиной накопленного лактата ( $\rho = 0,81–0,95$ ). Это позволяет использовать  $HЭ_{чсс}$  для количественной оценки выполненной работы. Наиболее тесные связи  $HЭ_{O_2}$  и  $HЭ_{чсс}$  с  $\Delta La$  выявлены в приседании и становой тяге ( $\rho > 0,89$ ). Уровень корреляционной связи в упражнении жим лёжа несколько ниже. Это, вероятно, связано с локальным характером мышечной работы и с меньшим образованием лактата (см. табл. 4–6).

Прямая линейная зависимость между представленными показателями означает, что с увеличением суммарной механической работы пропорционально растёт и концентрация лактата и  $HЭ_{чсс}$ . Таким образом, величина  $HЭ_{чсс}$  дает тренеру представление как о количестве механической работы, так и об уровне перенесенного физиологического напряжения спортсмена.

**Заключение.** Во всех упражнениях между одноименными показателями  $HЭ_{O_2}$  и  $HЭ_{чсс}$  установлены тесные линейные взаимосвязи ( $r = 0,85–0,95$ ).

В упражнениях глобальной характера – «приседание» и «становая тяга» установлены высокие линейные корреляционные связи ( $\rho = 0,79–0,89$ ) между  $HЭ_{O_2}$ ,  $HЭ_{чсс}$  и объёмом внешней работы.

В упражнении локального характера – «жим лежа» установлены умеренные ( $r = 0,65$ ,  $r = 0,66$ ) внутригрупповые корреляционные связи между  $HЭ_{O_2}$ ,  $HЭ_{чсс}$  и объёмом внешней работы.

Во всех упражнениях показатели  $HЭ_{O_2}$  и  $HЭ_{чсс}$  демонстрируют высокие корреляционные связи с  $\Delta La$  ( $\rho = 0,81–0,93$ ).

Анализ результатов исследования позволяет сделать выводы о том, что  $HЭ_{чсс}$  может быть использован для косвенной оценки объема выполненной физической работы в том случае, если нет возможности регистрировать потребление  $O_2$ , измерить внешнюю нагрузку и концентрацию лактата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zatsiorsky V.M., Kraemer W.J. Science and Practice of Strength Training. – 3rd ed. – Champaign: Human Kinetics, 2022. – 408 p.
2. Impellizzeri F. M., Shrier I., McLaren S. J., Coutts A. J., McCall A., Slattery K., Jeffries A. C., Kalkhoven J. T. Understanding Training Load as Exposure and Dose // *Sports Medicine*. – 2023. – Vol. 53, No 9. – P. 1667–1679. – DOI: 10.1007/s40279-023-01833-0.
3. Checkoway H., Pearce N., Kriebel D. Research Methods in Occupational Epidemiology. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – Vol. 34 (Monographs in Epidemiology and Biostatistics). – DOI: 10.1093/aje/kwi020.
4. Kriebel D., Checkoway H., Pearce N. Exposure and Dose Modelling in Occupational Epidemiology // *Occupational and Environmental Medicine*. – 2007. – Vol. 64, No 7. – P. 492–498. – DOI: 10.1136/oem.2006.03003.
5. Banister E. W. Modeling Elite Athletic Performance // *Physiological Testing of Elite Athletes* / ed. by J. Green, P. Thomas. – Champaign, IL : Human Kinetics, 1991. – P. 403–422. – DOI: 10.12691/jpar-5-2-5.
6. Edwards S. The Heart Rate Monitor Book. – 5th ed. – Port Washington : Polar CIC, 1993. – 170 p.
7. Lucia A. et al. Heart Rate Response to Professional Road Cycling: The Tour de France // *International Journal of Sports Medicine*. – 1999. – Vol. 20, No 3. – P. 167–172. – DOI: 10.1055/s-1999-970284.
8. A New Approach to Monitoring Exercise Training / C. Foster, J. A. Florhaug, J. Franklin, L. Gottschall, L. A. Hrovatin, S. Parker, P. Doleshal, C. Dodge // *Journal of Strength and Conditioning Research*. – 2001. – Vol. 15, No 1. – P. 109–115.
9. Козлов А. В., Аньшаков Н. И., Сонькин В. Д. Неинвазивные методы определения физиологических параметров тренировочной нагрузки для спортсменов циклических видов // Сборник тезисов XXIV съезда Физиологического общества им. И. П. Павлова. — Санкт-Петербург, 2023. – С. 540.
10. Козлов А. В., Ваваев А. В., Якушкин А. В., Лаптев А. И., Юриков Р. В., Сонькин В. Д. Удельная интенсивность физиологических затрат при циклической работе различной мощности // *Физиология человека*. – 2022. – Т. 48, № 1. – С. 18–25. – DOI: 10.31857/S0131164622010076.
11. Scott C.B. Contribution of anaerobic energy expenditure to whole body thermogenesis. *Nutr. Metab. (Lond)*. – 2005. – Vol. 2, No. 1. – P. 14. – DOI: 10.1186/1743-7075-2-14
12. Jose A.D., Stitt F., Collison D. The effects of exercise and changes in body temperature on the intrinsic heart rate in man. *Am. Heart J.* – 1970. – Vol. 79, No. 4. – P. 488. – DOI: 10.1016/0002-8703(70)90254-1
13. Nutritional needs in hot environments: Applications for military personnel in field operations. Ed. Marriott B.M. – Washington: National Academies Press, 1993. – P. 392. – DOI: 10.17226/2094
14. Brooks G. A., Arevalo J. A., Osmond A. D. et al. Lactate in Contemporary Biology: A Phoenix Risen // *The Journal of Physiology*. – 2022. – Vol. 600, No 5. – P. 1229–1251. – DOI: 10.1113/JP280955.
15. Баевский Р.М. Проблема оценки и прогнозирования функционального состояния организма и ее развитие в космической медицине // *Усп. физиол. наук*. – 2006. – Т. 37, № 3. – С. 42.

## REFERENCES

1. Zatsiorsky, V. M. & Kraemer, W. J. (2022) Science and Practice of Strength Training (3rd ed.). Champaign, IL, Human Kinetics, 408 p.
2. Impellizzeri, F. M., Shrier, I., McLaren, S. J., Coutts, A. J., McCall, A., Slattery, K., Jeffries, A. C., & Kalkhoven, J. T. (2023) Understanding training load as exposure and dose. *Sports Medicine*. 53 (9), 1667-1679, doi: 10.1007/s40279-023-01833-0.
3. Checkoway, H., Pearce, N., & Kriebel, D. (2004) Research methods in occupational epidemiology. *Monographs in Epidemiology and Biostatistics*. 34, doi: 10.1093/aje/kwi020.
4. Kriebel, D., Checkoway, H., & Pearce, N. (2007) Exposure and dose modelling in occupational epidemiology. *Occupational and Environmental Medicine*. 64 (7), 492-498, doi: 10.1136/oem.2006.03003.
5. Banister, E. W. (1991) Modeling elite athletic performance. In: Green, J., & Thomas, P. (Eds.) *Physiological testing of elite athletes*. Champaign, IL, Human Kinetics, 403-422, doi: 10.12691/jpar-5-2-5.
6. Edwards, S. (1993) *The Heart Rate Monitor Book* (5th ed.). Port Washington, Polar CIC, 170 p.
7. Lucia, A. et al. (1999) Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*. 20 (3), 167-172, doi: 10.1055/s-1999-970284.
8. Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P. & Dodge, C. (2001) A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 15 (1), 109–115.
9. Kozlov, A. V., Anshakov, N. I. & Sonkin, V. D. (2023) [Non-invasive methods for determining physiological parameters of training load for athletes in cyclic sports] In: Proceedings of the XXIV Congress of the I. P. Pavlov Physiological Society, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, p. 540. (In Russian).

10. Kozlov, A. V., Vavaev, A. V., Yakushkin, A. V., Laptev, A. I., Yurikov, R. V. & Sonkin, V. D. (2022) Specific intensity of physiological costs during cyclic work of varying power. *Human Physiology*. 48 (1), 18–25, doi: 10.31857/S0131164622010076. (In Russian).
11. Scott, C. B. (2005) Contribution of anaerobic energy expenditure to whole body thermogenesis. *Nutrition & Metabolism*. 2 (1), 14, doi: 10.1186/1743-7075-2-14.
12. Jose, A. D., Stitt, F. & Collison, D. (1970) The effects of exercise and changes in body temperature on the intrinsic heart rate in man. *American Heart Journal*. 79 (4), 488–498, doi: 10.1016/0002-8703(70)90254-1.
13. Marriott, B. M. (Ed.) (1993) *Nutritional needs in hot environments: Applications for military personnel in field operations*. Washington, DC, National Academies Press, 392 p., doi: 10.17226/2094.
14. Brooks, G. A., Arevalo, J. A., Osmond, A. D. et al. (2022) Lactate in contemporary biology: A phoenix risen. *The Journal of Physiology*. 600 (5), 1229, doi: 10.1113/JP280955.
15. Baevskii, R. M. (2006) [The problem of assessing and predicting the functional state of the body and its development in space medicine]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk = Advances in Physiological Sciences*. 37 (3), 42. (In Russian).

#### PECULIARITIES OF ADAPTATION OF STUDENTS OF DIFFERENT MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL STATUS TO PHYSICAL ACTIVITIES OF DIFFERENT ORIENTATION

*N. I. Anshakov, R. V. Tambovtseva*

The aim of this study was to assess the amount of physiological stress experienced as a characteristic of external work during strength exercises (bench press, squat, deadlift) performed at maximum repetitions, at intensities of 100, 90, 80, 70, 60, and 50 % of 1RM. Twelve athletes from various sports participated in the study. A treadmill volitional failure test was used to determine  $\text{VO}_2$  max and maximum heart rate. A GymAware linear encoder, a MetaLyzor portable ergospirometer, and a Lactate Plus lactate analyzer were used to measure the ergometric and physiological characteristics of physical exercise. To achieve the study's objectives, exercise exposure indices calculated from  $\text{O}_2$  consumption and heart rate ( $\text{NEO}_2$  and HRNE) were used.  $\text{NEO}_2$  and HRNE were strongly linearly correlated across all exercises ( $r = 0.85\text{--}0.95$ ) and with the maximum increase in lactate concentration ( $\Delta\text{La}$ ) ( $\rho = 0.81\text{--}0.89$ ). Moderate to strong correlations with external mechanical work ( $A$ ) were found:  $\rho = 0.65\text{--}0.89$ .

The obtained results indicate the possibility of using the NEHR indicator for indirectly assessing the volume of mechanical work performed and the amount of lactate accumulated during the exercise.

**Keywords:** exercise intensity, load exposure, external mechanical work, lactate, heart rate, oxygen consumption, strength exercises.

*Поступила в редакцию 19.05.2026 г.*

##### ***Аньшаков Николай Иванович***

аспирант кафедры биохимии и биоэнергетики спорта им. Н.И. Волква, ФГБОУ ВО «Российский университет спорта» (РУС «ГЦОЛИФК»), г. Москва, РФ;

аналитик отдела функциональной подготовки спортсменов, ГКУ «Центр спортивных инновационных технологий и подготовки сборных команд», г. Москва, РФ.

E-mail: anshakov.nikolya@mail.ru

ORCID: 0009-0004-6446-5410

SPIN-код: 3501-3456

##### ***Anshakov Nikolay Ivanovich***

Postgraduate student of the Department of Biochemistry and Bioenergetics of Sports named after N.I. Volkov, Russian University of Sports (GTSOLIFK), Moscow, Russia;

analyst of the Department of Functional Training of Athletes, Center for Sports Innovative Technologies and Training of National Teams, Moscow, Russia.

##### ***Тамбовцева Ритта Викторовна***

доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой биохимии и биоэнергетики спорта им. Н.И. Волкова, ФГБОУ ВО «Российский университет спорта» (РУС «ГЦОЛИФК»), г. Москва, РФ.

E-mail: ritta7@mail.ru

ORCID: 0009-0003-9709-599X

SPIN-код: 3112-4627

##### ***Tambovtseva Ritta Viktorovna***

Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Biochemistry and Bioenergy of Sports named after N.I. Volkov, Russian University of Sports (GTSOLIFK), Moscow, Russia.

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В НОВЫХ УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2026. М. А. Болдырева

Статья посвящена актуальной тематике по формированию и оценке здоровьесберегающей универсальной компетенции у студентов вузов. Особое внимание уделяется подбору показателей для оценки текущего состояния, а также разработке интегральной оценки и описанию информационно-диагностической панели для проведения тестирования текущего состояния обучающихся, применимой в рамках электронного обучения.

**Ключевые слова:** здоровье; студенты; работоспособность; функциональное состояние; психофизиологические показатели; время реакции; ЭЭГ.

**Введение.** Современная тенденция реформирования, связанная с процессами внедрения новых форматов обучения (электронное, дистанционное), а также выход из Болонской системы и национально-ориентированная независимость («суверенизация» российского образовательного пространства, технологическое лидерство) требует реформ и изменений экосистемы образования в целом [1, 2].

Основными триггерами изменений в системе высшего образования стали:

- компетентностный подход;
- актуализация ФГОС ВО и модели аккредитационного мониторинга;
- электронное и дистанционное образование.

Построение образовательного процесса в соответствии с компетентностным подходом связано с обеспечением условий, приближенных к реальной профессиональной деятельности. В результате внедрения этого нововведения существенно увеличилась информационная нагрузка на студента, произведено перераспределение аудиторных часов с увеличением часов самостоятельной работы, зачастую не контролируемой. Эти выводы подтверждаются в исследованиях О.И. Вагановой и коллег [3].

При построении индивидуальной образовательной траектории современного выпускника следует обратить внимание на развитие всего перечня универсальных и общепрофессиональных компетенций, а также профессиональных знаний и умений со способностью их реализации на практике. Изменение условий подготовки в высших учебных заведениях в рамках требований новых Федеральных государственных образовательных стандартов, сопряженных с увеличением академической нагрузки на студентов, приводит к тому, что необходимо подчеркнуть важность по развитию здоровьесберегающих программ оценки и сопровождения обучающихся на различных уровнях обучения.

Интеграция здоровьесберегающих технологий в учебный процесс высших учебных заведений является важной задачей, направленной на создание комфортной и безопасной образовательной среды, т. к. здоровьесберегающие технологии, с одной стороны, включены в Концепцию реализации национальных целей в сфере науки и высшего образования до 2030 года, а с другой – в перечень универсальных компетенций базовой подготовки студентов в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования [4–6].

Основными целями интеграции технологий сохранения здоровья, в том числе в учебный процесс с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий могут быть:

1) улучшение физического и психического здоровья обучающихся с помощью различных педагогических средств и инструментов, внедрения оздоровительных программ и мероприятий во внеучебную деятельность;

2) создание условий для оценки функционального состояния студентов и умственной работоспособности в процессе обучения (индивидуальный маршрут, электронный паспорт здоровья) с использованием персональных гаджетов регистрации параметров здоровья;

3) повышение уровня когнитивных функций (памяти, внимания, принятия решений) и мотивации к учебной активности;

4) уменьшение утомляемости и стресса, снижение информационных перегрузок за счет рационализации режима бодрствования/сон;

5) формирование культуры здоровья и вовлечение студентов в здоровый образ жизни при формировании программ и мероприятий спортивного и культурного направления [7].

В связи с указанными проблемами состояния здоровья обучающихся следует обратить внимание на разработку основных принципов концепции здоровьесберегающих технологий в сфере образования с применением цифровых технологий.

**Литературный обзор.** Современные тенденции развития образовательного процесса несмотря на «бесшовную» интеграцию ИКТ приводят к интенсификации образовательного процесса при сохранении бюджета учебного времени, усилению напряженности образовательного процесса в связи с требованием определенного уровня цифровых компетенций участников образовательного процесса, истощению психофизиологических резервов и развитию стрессовых состояний обучающихся (при наличии дедлайнов, многозадачности, информационных и когнитивных перегрузок, аттестационных мероприятий, сессии и пр.).

Ряд исследований показал мощное влияние цифровизации на здоровье студентов [8, 9]. Несмотря на трудности, связанные с цифровой трансформацией образования, ряд авторов описывают следующие положительные эффекты электронного обучения, влияющие на академические способности (чтение, письмо, счет, арифметическое мышление) и конкретные когнитивные и метакогнитивные способности (принятие решений, мультимодальный анализ информации, увеличение долгосрочного удержания учебных материалов, постановка целей, решение проблем, навык саморегуляции обучения).

Различные педагогические исследования актуализируют вопрос влияния цифровых устройств на когнитивные процессы обучающихся. С одной стороны, цифровые ресурсы повышают информационную подкованность и способствуют росту читательской активности, а с другой стороны, безграничный доступ к базе знаний приводит к ухудшению показателей оперативной памяти и концентрации внимания, растет физическое и эмоциональное истощение [10].

Известно, что общее состояние здоровья студентов представляет собой:

- динамический процесс адаптации к воздействиям внешних и внутренних факторов (стрессоустойчивость);

- учебная работоспособность как обязательное условие возможности полноценного выполнения студентом учебной нагрузки с сохранением оптимального функционального состояния (многозадачность);

- важный индикатор будущего трудового, экономического, культурного потенциала общества.

Внедрение ФГОС ВО предусматривает формирование у студентов универсальной компетенции, направленной на здоровьесохранение (УК-7 «Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной жизнедеятельности») независимо от направления подготовки. Проанализировав работы ряда ученых (Н.М. Ковриго, В.В. Колбанова, Н.К. Смирнова, Г.А. Сулкарнаевой и др.), напрашивается вывод о необходимости качественной подготовки студентов к реализации здоровьесберегающей и здоровье-формирующей деятельности, а также способности к реализации функции сохранения и укрепления здоровья после выпуска из образовательного учреждения. В литературных источниках описаны различные виды здоровьесберегающих технологий, применяющихся в учебном процессе на современном этапе. Среди основных можно перечислить работы Е.С. Барышевой и коллег [11], Е.Т. Кузнецовой и Н.В. Коляды [12], Н.В. Поповой и К.К. [13], в которых отражены следующие направления для организации здоровьесберегающей экосистемы:

- индивидуально-ориентированная программа в цифровом формате «Паспорт здоровья»;

- оздоровительные технологии в процессе физического воспитания в рамках проекта «Цифровой университет»;

- применение интерактивных технологий обучения с фиксацией хода образовательного процесса (цифровой след) и учетом психофизиологических показателей обучающегося (внимание, память, принятие решения, восприятие, усталость, информационная нагрузка и пр.);

- технологии здоровьесберегающего сопровождения образовательного пространства посредством физической культуры, популяризации спорта, физической культуры, двигательной рекреации с вовлечением всех субъектов образовательного процесса – студенческой молодежи и профессорско-преподавательского состава.

Авторская концепция по формированию универсальной компетенции здоровьесбережения в высшем учебном заведении в ходе электронного обучения включает следующие направления:

- Отбор параметров для диагностики состояния здоровья обучающихся и их регистрация с помощью бесконтактных устройств (фитнес-браслеты, айтрекер и пр.);

- Мониторинг состояния здоровья обучающихся по отобранным психофизиологическим параметрам и прогнозирование функционального состояния с помощью инструментов искусственного интеллекта и машинного обучения (информационный и когнитивный перегруз, усталость, монотония и пр.);

- Мониторинг работоспособности обучающихся (эффективность и напряжение) по психофизиологическим параметрам (сенсомоторный навык, цифровые навыки) в ходе образовательного процесса;

- Прогнозирование успешности освоения профессионально-важных качеств и компетенций различного уровня (от универсальных до профессиональных и метакогнитивных навыков) по параметрам учебной аналитики;

- Развитие мультимедийной образовательной платформы для размещения материалов и сбора учебной информации, формирования уровня цифровых навыков у всех участников образовательной среды.

Эти проблемы порождают в качестве первостепенного направления развития исследований необходимость в разработке подходов и инструментов мониторинга состояния здоровья обучающихся в новых условиях цифрового обучения.

Под мониторингом здоровья в образовательной организации понимают «процессы диагностики физического развития, функциональных резервов организма, нейродинамических показателей нервной системы, психического состояния, индивидуальных конституциональных особенностей, адаптивных (резервных) возможностей, образа жизни и наследственности, определяющих жизнеспособность организма и здоровьесберегающей среды, в которой происходит учебная и трудовая деятельность участников образовательного процесса» [14].

Диагностика здоровья обучающихся в рамках физиологического мониторинга опирается на базовые показатели: физическое здоровье, двигательную активность, умственную и физическую работоспособность [15]. Ведущим признаком индивидуального здоровья считается хорошая способность адаптации к меняющимся условиям, высокий адаптационный потенциал физического и психического здоровья. Позитивные сдвиги в перечисленных показателях в референтных пределах являются отражением использования адекватных, эффективных и безопасных педагогических средств в учебном процессе.

Основная задача данной работы связана с рассмотрением основных инструментов мониторинга состояния здоровья обучающихся с применением элементов электронного обучения и внедрение методов оценки текущего функционального состояния и умственной работоспособности как одно из направлений реализации концепции здоровьесберегающих технологий в высшем образовании.

Традиционно для оценки физического развития используют стандартный набор параметров:

- антропометрические показатели (ростовые показатели, масса тела, ростовые индексы);
- физиометрические показатели (индекс Кетле, весо-ростовой показатель, динамометрия кисти и стантовая динамометрия, силовой и жизненный индексы, систолическое и диастолическое давление, ЧСС);
- реакция сердечно-сосудистой системы на стандартную физическую нагрузку (проба Мартине);
- оценка состояния резервов дыхательной системы (ЖЕЛ, индекс Робинсона, пробы Штанге, Генчи);
- количественная оценка уровня соматического здоровья (по методу Г.Л. Апанасенко);
- динамика функционального состояния (изменение вегетативного баланса с вычислением показателя активности регуляторных систем – ПАРС);
- адаптационный потенциал по Р.М. Баевскому;
- оценка возбудимости вегетативной нервной системы (ортостатическая проба);
- оценка уровня физической работоспособности (проба Руффье);
- определение уровня тревожности с помощью теста Спилберга-Ханина.

Кроме этого, в оценке состояния здоровья используют функциональные пробы, которые позволяют оценить общее состояние организма, его резервные возможности, особенности адаптации различных систем к физическим нагрузкам.

Особое внимание стоит обратить на внедрение инновационных цифровых технологий из области превентивной медицины в виде носимых средств для контроля уровня и качества текущего функционального состояния (Д.В. Коломийцева; А.Н. Толстихин и коллеги; С.А. Кравченко и коллеги; Н.Ю. Патаркацишвили и коллеги; В.А. Старовойтова и коллеги; И.В. Богдан и коллеги; R.T. Barnes; S.P. Wallace и др.). Фитнес браслеты позволяют измерять артериальное давление, регистрировать частоту сердцебиения, частоту и периодичность дыхания, температуру тела, интенсивность

потоотделения, капнограмму, содержание холестерина в крови, содержание кислорода в крови, расход калорий, длительность и соотношение различных стадий сна, качество сна, количество пройденных шагов (шагомер), уровень усталости и уровень стресса.

Текущие физиологические показатели выводятся на экран в удобном и понятном цифровом или графическом виде, а также позволяют накапливать информацию за определенный период времени и отследить динамику с целью дальнейшей коррекции функционирования организма в амбулаторных или поликлинических условиях. Помимо фиксации параметров носимое устройство позволяет по принципу обратной связи корректировать и оптимизировать текущее состояние, что может быть своевременно использовано в образовательном процессе.

Следовательно, современные цифровые технологии портативного мониторинга показателей здоровья при достаточно небольших затратах показываются существенные результаты и предоставляют возможность самомониторинга и персонализированного подхода, адаптированного под индивидуальные нужды и цели пользователей (ежедневный мониторинг, спортивная тренировка и пр.), что является неотъемлемой частью совершенствования стратегии обеспечения эффективной адаптации студентов к учебному процессу, а также поддержания здоровьесберегающей компетенции в высшей школе.

**Материалы и методы.** Нашим коллективным авторов [16] предложен способ оценки уровня когнитивного напряжения обучающегося, вызванного учебной нагрузкой в процессе компьютерного тестирования по параметрам сенсомоторной реакции.

Использование активационного подхода оценки функционального состояния может быть адаптировано и применено для образовательных целей. Функциональное состояние ( $FS$ ) вычисляются по абсолютным значениям латентного периода времени реакции, которое отражает текущий уровень активации ЦНС, степень развития утомления под влиянием факторов окружающей среды [7]. Оптимальное значение показателя  $FS$  находится в диапазоне 4,2–5,5 и рассчитывается по формуле:

$$FS = \frac{\ln l}{T_{\text{мод}}} * \Delta T_{0,5} [\text{сек}^{-2}],$$

где  $T_{\text{мод}}$  – время реакции, соответствующее модальному классу гистограммы ВР;  $\Delta T_{0,5}$  – диапазон времени реакций на уровне половины амплитуды модального значения времени простой двигательной реакции. Время реакции ( $TR$ ) также может представлять диагностический показатель уровня утомления или активации нервных процессов в ЦНС. Его показатель варьирует в диапазоне 1,0–2,8 и рассчитывается по формуле:

$$TR = \frac{\ln P_{\text{max}}}{\Delta T_{0,5} [\text{сек}^{-1}]},$$

где  $P_{\text{max}}$  – вероятность (частота) появления значения, равного амплитуды модального значения;  $\Delta T_{0,5}$  – диапазон времени реакций на уровне половины амплитуды модального значения.

Уровень функциональных возможностей организма (или резерв,  $R$ ) позволяет диагностировать период времени, в течение которого организм способен удержать функциональное состояние в определенном диапазоне. Эмпирическим путем определен оптимальный диапазон показателя  $R$  как 2,7–4,8, который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\ln P_{\text{max}}}{\Delta T_{0,5} * T_{0,5} [\text{сек}^{-2}]},$$

где  $T_{0,5}$  – среднее время реакции для диапазона времени реакций на уровне 0,5  $P_{\text{max}}$ .

Приведенные выше показатели могут быть использованы для интегральной оценки здоровья обучающихся в новых условиях и позволяют оценить способность организма адаптироваться к изменяющимся условиям и нагрузкам за счёт резервов ЦНС. В контексте электронного обучения функциональный резерв ЦНС может влиять на когнитивные способности обучающихся.

**Анализ результатов.** Для диагностики функционального состояния в ходе обучения предложены методики экспресс-диагностики и оперативного контроля функционального состояния и работоспособности обучающихся. Основные параметры и их рекомендуемые референтные пределы для диагностических процедур показаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры диагностики функционального состояния обучающихся  
(составлено автором на основе самостоятельного анализа, расчетов и обработки данных)

| Параметр<br><i>1</i>  | Значение показателя<br><i>2</i>   | Состояние<br><i>3</i>  |
|---|---|--|
| Оценка ФС и работоспособности по физиологическим параметрам |   |  |
| ЧСС   | 75–100 уд/мин   | Оптимальное  |
|   | 101–120   | Ограниченное   |
|   | 121–150   | Существенно ограничено   |
|   | >150  | Утрачено   |
| Оценка тонуса вегетативной НС                               | >–16  | Тонус парасимпатической иннервации   |
|   | от -16 до 15  | Баланс   |
|   | >16   | Тонус симпатической иннервации   |
| Частота дыхания   | 10–14   | Оптимальное  |
|   | 15–25   | Ограниченное   |
|   | 26–30   | Существенно ограничено   |
|   | >31   | Утрачено   |
| Электро-кожная проводимость                                 | <6  | Оптимальное  |
|   | 7–18  | Ограниченное   |
|   | 19–30   | Существенно ограничено   |
|   | >31   | Утрачено   |
| Подвижность нервной системы                                 |   |  |
| Простая зрительно-моторная реакция                          | <225 мс   | Подвижная нервная система, высокий уровень функциональных возможностей центральной нервной системы. Преобладание процессов возбуждения |
|   | 226–276 мс  | средний уровень активации ЦНС, быстрое действие и стабильность реакций средние, состояние регуляторных механизмов устойчивое.          |
|   | 278–317 мс  | сниженный уровень функциональных возможностей ЦНС, преобладание процессов торможения. Состояние неблагоприятное для деятельности.      |
|   | >328 мс   | низкий уровень функциональных возможностей ЦНС, быстрое действие низкое,   |
| Уровень внимания, восприятия, памяти                        |   |  |
| Сложная зрительно-моторная реакция, ЭЭГ                     | СЗМР, индекс 0–15, Латентный период P300 <300 мс, амплитуда N200 >5 мВ                            | Оптимальное  |
|   | СЗМР, индекс 16–20, повышение мощности тета-ритма (4–8 Гц) на 20 %, Латентный период P300 >320 мс | Ограниченное   |

Продолжение табл. 1

| 1                                       | 2  | 3   |
|---|--|---|
|   | СЗМР, индекс 21–25   | Существенно ограничено  |
|   | СЗМР, индекс >26   | Утрачено  |
| Увеличение числа ошибок СЗМР            | <20  | Оптимальное   |
|   | 21–40  | Ограниченное  |
|   | 41–60  | Существенно ограничено  |
|   | >61  | Утрачено  |
| Счет в уме                              | Показатель 0–5   | Оптимальное   |
|   | 6–15   | Ограниченное  |
|   | 16–25  | Существенно ограничено  |
|   | >26  | Утрачено  |
| Оценка продуктивности/утомляемости      |  |   |
| Время сложной сенсомоторной реакции     | 330–520 мс   | высокий уровень сенсомоторных реакций, безошибочность высокая, при 64 высоком быстродействии и стабильности реакции выше средних значений                 |
|   | 521–605 мс   | уровень сенсомоторных реакций выше среднего, безошибочность выше средних значений. Быстродействие выше средних значений, при средней стабильности реакций |
|   | 606–680 мс   | средний уровень реакций, безошибочность средняя, быстродействие выше средних значений, при стабильности реакций ниже среднего.                            |
|   | 681–715 мс   | низкий уровень реакций, безошибочность низкая, стабильность реакции ниже среднего   |
| Оценка ситуативной тревожности          |  |   |
| ЭЭГ, ССП                                | Латентный период Р300 ССП (<300 мс), фронтальная альфа-асимметрия  | Отсутствие тревожности, психическое равновесие и устойчивое настроение  |
|   | Рост латентного периода Р300 ССП (>320 мс), рост мощности бета-ритма   | Повышение тревожности, дефицит внимания, внутреннее напряжение, колебание настроения и работоспособности  |
|   | Снижение амплитуды Р300 ССП  | Высокая тревожность, растерянность, утомляемость, раздражительность, напряжение   |
|   | Рост бета/альфа индекса ЭЭГ; рост бета-2 (20–30 Гц) и снижение мощности фронтальной альфа асимметрии, рост мощности тета ритма в височных отведениях | Чрезмерная тревожность, панические атаки, депрессивные расстройства, соматовегетативные симптомы  |
| Степень агрессивности и конфликтности   |  |   |
| Опросники по шкалам                     | 0–16   | Низкий уровень  |
|   | 17–27  | Средний   |
|   | 28–46  | Высокий   |
|   | 47–60  | Очень высокий   |
| Уровень нервно-психической устойчивости |  |   |
| На основе опросников или ЭЭГ            | Опросник >335, альф-ритм ЭЭГ 8–13 Гц и амплитуда >50 мВ  | Высокая нервно-психическая неустойчивость при умственных и физических нагрузках   |
|   | Опросник 334–116, Индекс бета/тета ритмов 2–3  | Высокая нервно-психическая неустойчивость (неадекватное поведение/самооценка/восприятие окружения)  |

| 1 | 2  | 3   |
|---|--|---|
|   | Опросник 115–34, Индекс бета/тета ритмов <1,5            | Повышенная нервно-психическая неустойчивость (вероятность срывов, кратковременные нарушения поведения при экстремальных эмоциональных и физических нагрузках) |
|   | Опросник 33–0, альфа-ритм ЭЭГ 8–13 Гц и амплитуда <30 мВ | Низкий уровень нервно-психической неустойчивости, высокий уровень поведенческой регуляции   |

Методика «Простая зрительно-моторная реакция» (ПЗМР) позволяет зарегистрировать среднее значение времени реакции на стимул и диагностировать скорость реагирования и подвижность нервной системы, уровень функциональных возможностей центральной нервной системы. Моторная реализация возможна при нажатии на клавишу манипулятора «мышь».

Методика определения латентного периода сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР) в психофизиологической практике используется для количественной оценки динамики основных нервных процессов (возбуждение/торможение) с целью прогнозирования степени утомляемости и продуктивности через уровень внимания к стимулам. Система должна регистрировать время реакции при различении сигналов разной модальности/категории и пр. (разные фигуры, разные цвета) и правильность фиксации. Количество ошибок можно относить к диагностике утомления, дефицита и резервов внимания.

Методика оценки ситуативной тревожности позволяет определить степень адекватного реагирования в обычном режиме. Используют тесты выбора цветоассоциаций и времени, затраченного на восприятие различий. Также возможно использование нейрофизиологических коррелятов по параметрам ЭЭГ – альфа, тета, бета-ритмы и латентный период компонента P300 ССП, что позволяет вывести интегральный показатель и диагностировать уровень тревожности.

Методика для выявления склонности личности к агрессивности и конфликтам предполагает использование опросника, включающего следующие шкалы: вспыльчивость, наступательность, обидчивость, неуступчивость, бескомпромиссность, мстительность, нетолерантность, подозрительность, агрессивность, конфликтность. Устойчивое негативное реагирование личности наблюдается в проблемной ситуации у лиц с психическими аномалиями, неудовлетворительной нервно-психической устойчивостью и акцентуациями характера. Вычисляются показатели агрессивности позитивной (по шкалам наступательность и неустойчивость) и негативной (по шкалам нетолерантность и мстительность), конфликтности (по шкалам бескомпромиссность, вспыльчивость, обидчивость и подозрительность).

Оценку нервно-психической устойчивости можно провести с использованием опросника, который позволяет выявить отдельные признаки личностных нарушений, особенности поведения, состояния психической деятельности, оценить вероятность нервно-психических срывов; а также с помощью объективных показателей на основе ЭЭГ (мощность и амплитуда ритмических диапазонов).

Следовательно, были отобраны психофизиологические параметры для оценки функционального состояния обучающихся, позволяющие прогнозировать текущее состояние и рекомендовать своевременную коррекцию.

**Обсуждение.** Авторский подход заключается в использовании информационно-диагностической панели для проведения тестирования психофизиологических и

физиологических параметров оценки текущего состояния обучающихся, которая включает следующие блоки: блок «Регистрация параметров», блок «Менеджер исследований», блок «Диагностика состояния», блок «Заключение и рекомендации».

Блок «Регистрация параметров» позволяет регистрировать входные данные обучающихся, верифицировать их профиль, вносить и корректировать персональные показатели из базы данных, вести список посещений и организовывать статистический анализ по базе данных. Указанный блок может взаимодействовать с набором параметров цифрового следа обучающегося и параметрами учебной аналитики.

Блок «Менеджер исследований» содержит методики для проведения исследований входного и текущего контроля функционального и психоэмоционального состояния в соответствии с отобранными параметрами. Блок «Выбор контроля» позволяет произвести отбор видов контроля: входной или периодический. Блок «Диагностика состояния» предназначен для проведения измерений, фиксации физиологических и психологических параметров состояния организма, работает с набором методик и параметров, входящих в состав комплекса для соответствующего вида контроля (входного или периодического). В этом блоке в соответствии с критериями производится анализ данных согласно разработанной системы. Блок «Заключение и рекомендации» осуществляет вывод данных на экран о текущем функциональном и психоэмоциональном состоянии организма, уровне работоспособности обучающегося, регуляторных механизмах организма. Данные могут сопоставляться с результатами образовательных достижений для общего прогноза и составления психофизиологического портрета обучающегося. Методики для тестирования и контроля функционального состояния центральной нервной системы включают оценку физиологических (ЧСС, частота дыхания, электрокожная проводимость), психофизиологических параметров (уровень внимания, объем памяти, оценка продуктивности); и психологических (уровень эмоционального реагирования, уровень тревожности, нервно-психической устойчивости и пр.).

**Выводы.** Таким образом, в статье рассмотрены традиционные методы оценки функционального состояния и предложена инновационно-прогностическая панель как инструмент мониторинга состояния обучающихся, которая может быть использована как объективный способ по регистрации значений соматического, психологического и адаптационного компонентов здоровья в новых условиях цифрового обучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роберт И.В. Аксиологический подход к прогнозу развития образования в условиях цифровой парадигмы. Инновационные процессы в профессиональном и высшем образовании и профессиональном самоопределении: колл. монография / гл. ред. Н.Д. Подуфалов. – М: Изд-во «Экон-Информ», 2020. – С. 47–73.
2. Уваров А.Ю., Фруммин И. Д. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования [Текст] / А. Ю. Уваров, Э. Гейбл, И. В. Дворецкая и др. ; под ред. А. Ю. Уварова, И. Д. Фрумина ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики», Ин-т образования. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. – 343 с.
3. Ваганова О.И., Павлова Е.С., Шаголова О.Г., Воронина И.Р. Технология индивидуализации обучения // Балтийский гуманитарный журнал. – 2020. – Т. 9, № 2(31). – С. 208–211.
4. Алешковский И.А., Гаспаршвили А.Т., Крухмалева О.В., Нарбут Н.П., Савина Н.Е. Особенности формирования образовательных траекторий российских студентов: оценка и возможности // Высшее образование в России. – 2023. – Т. 32, № 4. – С. 137-155.
5. Чекалина Т.А., Тимонина В.И. Высшее образование в период пандемии: практики организации дистанционного обучения // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2021. – №2(42). – С. 115–121.

6. Курьян М.Л., Воронина Е.А. Форсированный переход на онлайн-обучение и новые возможности для участников образовательного процесса: обзор исследований // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Психология и педагогика. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 772–790.
7. Айдаркин Е.К., Болдырева М.А. Здоровьесберегающие технологии в высшем образовании / Айдаркин Е.К., Болдырева М.А.; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета. – 2024. – 451 с.
8. Баева Л. В. Влияние цифровизации образования на человека в контексте проблемы безопасности // Философия образования. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 131–144.
9. Буланова М. Б., Великая Н. М. Цифровизация высшего образования в период пандемии: преимущества и риски // Университетское управление: практика и анализ. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 25–36.
10. Кучма В.Р. Основы формирования здоровья детей. Учебное пособие. 2023. Изд.: Феникс, Ростов-на-Дону. – 256 с.
11. Барышева Е. С., Болдырев П. А., Науменко О. А., Нотова С. В., Болодурина И. П. Индивидуально-ориентированные здоровьесберегающие технологии в вузе на примере компьютерной программы «Паспорт здоровья» // Современные проблемы науки и образования. Электронный журнал. – 2021. – № 1. – 10 с. – URL: <https://science-education.ru/article/view?id=30475> (дата обращения: 23.04.2026).
12. Кузнецова Е.Т., Коляда Н.В. Формирование здоровьесберегающей компетенции студентов учреждения высшего образования в процессе физического воспитания // Здоровье для всех. Педагогические науки. – 2020. – № 2. – С. 17–22.
13. Попова Н.В., Данике К.К. Здоровьесберегающие технологии в работе со студенческой молодежью: анализ и пути совершенствования // Физическая культура. Спорт. Туризм. Двигательная рекреация. – 2021. – № 6(3). – С. 118–124.
14. Айзман Р. И. Современные представления о здоровье и критерии его оценки // Сибирский педагогический журнал. – 2012. – № 9. – С. 85–89.
15. Сонькин В. Д., Макарова Л. В., Параничева Т. М. Научно-методическое обеспечение сохранения и укрепления здоровья обучающихся в условиях образовательной организации (обзор литературы). Сообщение 2. здоровьесберегающие технологии, применяемые в системе образования // Новые исследования. – 2024. – № 2. – С. 8 – 30.
16. Айдаркин Е.К., Щербина Д.Н., Павловская М.А. Способ оценки уровня внимания оператора при компьютерном тестировании // Патент РФ № RU2441585 от 20.12.2008. Заявка № 2007112370/14 от 03.04.2007.

## REFERENCES

1. Robert, I.V. (2020) *An axiological approach to forecasting the development of education in the context of the digital paradigm. Innovative processes in vocational and higher education and professional self-determination*. In: Podufalov, N.D. (eds.) Moscow: Econ-Inform. pp. 47 – 73. (In Russian).
2. Uvarov, A.V. & Frumin I.D. et al. (2019). *Challenges and Prospects of Digital Transformation in Education*. In: Uvarov, A.V. & Frumin I.D. (eds.) Publishing House of the Higher School of Economics. 343 p. (In Russian).
3. Vaganova, O.I. & Pavlova, I.S., Shaglova, O.G., Voronina, I.R. (2020). [Technology of individualized learning]. *Baltic Humanitarian Journal*. 2(31), 208–211. (In Russian).
4. Aleshkovsky, I.A., & Gasparishvili, A.T., Krukhmaleva, O.V., Narbut, N.P., Savina, N.E. (2023). [Features of the formation of educational trajectories of Russian students: assessment and possibilities]. *Higher Education in Russia*. 32(4), 137–155. (In Russian).
5. Chekalina, T.A., & Timonina, V.I. (2021). [Higher education during the pandemic: practices of organizing distance learning]. *Professional education in Russia and abroad*. №2(42). p. 115–121. (In Russian).
6. Kuryan, M.L., & Voronina, E.A. (2023). [Forced transition to online learning and new opportunities for participants in the educational process: a review of research]. *RUDN Journal of Psychology and Pedagogics*. 20(4), 772–790. (In Russian).
7. Aidarkin, E.K., & Boldyreva, M.A. (2024). [*Health-saving technologies in higher education*]. In: Aidarkin, E.K., & Boldyreva, M.A. (eds.) Southern Federal University, Rostov-on-Don, Taganrog. 451 p. (In Russian).
8. Baeva, L.V. (2020). [The impact of digitalization of education on a person in the context of security issues. *Philosophy of education*]. 20(2), 131–144. (In Russian).
9. Bulanova, M. B., & Velikaya, N. M. (2021). [Digitalization of higher education during the pandemic: advantages and risks]. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz*. 25(4). p. 25–36. (In Russian).

10. Kuchma, V.R. (2023). [Fundamentals of Children's Health Formation]. Study Guide. Kuchma, V.R. (eds.) Fenix, Rostov-on-Don. 256 p. (In Russian).
11. Barysheva, E. S., & Boldyrev, P. A., Naumenko, O. A., Notova, S. V., Bolodurina I. P. (2021). [Individually oriented health-saving technologies in a university using the example of the computer program «Health Passport»]. *Sovremennye problemi nauki i obrazovaniya*. Electronic journal. – URL: <https://science-education.ru/article/view?id=30475> (Date of access 23.04.2026). (In Russian).
12. Kuznetsova, E.T., & Kolyada, N.V. (2020). [Formation of health-preserving competence of students of higher education institutions in the process of physical education]. *Zdorovie dlya vsekh. Pedagogical sciences*. 2, 17–22. (In Russian).
13. Popova, N.V., & Danike, K.K. (2021). [Health-saving technologies in working with student youth: analysis and ways of improvement]. *Fizicheskaya kul'tura i sport. Tyrizm. Dvigatel'naya reakcia*. 6(3), 118–124. (In Russian).
14. Aizman, R.I. (2012). [Modern concepts of health and criteria for its assessment]. *Siberian Pedagogical Journal*. 9, 85–89. (In Russian).
15. Sonkin V.D., & Makarova L.V., Parancheva T.M. (2024). [Scientific and methodological support for maintaining and strengthening the health of students in an educational organization (literature review). Message 2. Health-saving technologies used in the education system]. *Novye issledovaniya*, 2, 8–30. (In Russian).
16. Aidarkin, E.K., & Shcherbina, D.N., Pavlovskaya, M.A. [Method for assessing the level of operator attention during computer testing]. Russian Federation Patent No. RU2441585 from 20.12.2008. Application No. 2007112370/14 dated 03.04.2007.

#### DEVELOPMENT OF APPROACHES AND TOOLS FOR MONITORING THE HEALTH OF STUDENTS IN THE NEW CONDITIONS OF DIGITAL LEARNING

**M. A. Boldyreva**

This article is devoted to the current topic of developing and assessing universal health saving competencies in students. Particular attention is paid to the selection of indicators for assessing current status, as well as the development of an integrated assessment and description of an information and diagnostic panel for testing students' current status, applicable to e-learning.

**Keywords:** health, students, performance, functional state, psychophysiological indicators, reaction time, EEG.

*Поступила в редакцию 07.05.2026 г.*

**Болдырева Марина Алексеевна**

Кандидат биологических наук, доцент;  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
г. Ростов-на-Дону, РФ.  
E-mail: mpavlovskaya@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-9164-7296  
SPIN-код: 8571-5683  
AuthorID: 207558

**Boldyreva Marina A.**

Candidate of Biological Sciences,  
Southern Federal University  
Rostov-on-Don, RF.

## ОСОБЕННОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ГЕМОДИНАМИКИ У ЛЫЖНИКОВ С ВАГОТОНИЧЕСКИМ ТИПОМ АВТОНОМНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ В ГОДИЧНОМ ТРЕНИРОВОЧНОМ ЦИКЛЕ

© 2026. *Р. И. Ефремова, А. П. Спицин*

В работе представлены результаты исследования центральной и периферической гемодинамики лыжников 10–11 лет с доминированием парасимпатического отдела автономной нервной системы. Изучены расчетные показатели деятельности сердечно-сосудистой системы в переходный, подготовительный и соревновательный период подготовки. В результате исследования были обнаружены особенности изменения показателей гемодинамики в зависимости от периода подготовки и от активности парасимпатической автономной нервной системы. Данные изменения отражают специфическую картину влияния разнонаправленных нагрузок на организм юных лыжников.

**Ключевые слова:** центральная гемодинамика; юные лыжники; годичный тренировочный цикл.

**Введение.** Лыжные гонки являются одним из популярных и доступных зимних видов спорта в России [1, 2]. В результате систематических тренировок повышается работоспособность, улучшается работа сердечно-сосудистой и дыхательной системы, развиваются основные группы мышц [3–5]. Исследование приспособительных реакций организма человека к тренировочному процессу является одним из ведущих направлений в общей проблеме адаптации. Изменения, происходящие в организме под действием тренировочных нагрузок, обусловлены направленностью физических упражнений, уровнем подготовленности, индивидуальными особенностями и рядом других факторов [6, 7]. Если же нарушены режим труда и отдыха, либо время восстановления после нагрузок было недостаточным, то возникает напряжение регуляторных процессов, которое может проявляться в изменении работы сердечно-сосудистой системы (ССС) и вегетативной регуляции [8]. Важно своевременно контролировать текущее функциональное состояние организма и вносить коррективы в тренировочный и соревновательный процесс. Несмотря на большое количество исследовательских работ в данном направлении, малоизученным остается определение влияния разнонаправленных физических нагрузок на организм молодых, начинающих лыжников-гонщиков. При этом необходимо учитывать, что гемодинамические сдвиги зависят от активности нервной системы. Наиболее доступными методами, позволяющими быстро оценить функциональное состояние ССС, являются расчетные показатели центральной гемодинамики.

**Цель.** Проанализировать показатели центральной гемодинамики лыжников-гонщиков с ваготоническим типом регуляции автономной нервной системы (АНС) в годичном тренировочном цикле.

**Материал и методы.** Обследовано 46 юношей лыжников 10–11 лет, со спортивным стажем 1–2 года. Исследование проведено в 3 этапа годичного тренировочного цикла (переходный, подготовительный и соревновательный период). Все родители обследованных детей подписали информированное согласие на участие в исследовании.

Для определения типа АНС регистрировали электрокардиограмму на электрокардиографе «ВНС – Микро» («Нейрософт», г. Иваново) во II стандартном

отведении по стандартной методике. С помощью программы «Поли-Спектр» рассчитаны временные стандартизированные характеристики динамического ряда кардиоинтервалов. Для оценки вегетативного тонуса использован основной интегральный показатель RRNN и дополнительный показатель индекс напряжения (ИН). К нормотоникам (эйтоникам) отнесли спортсменов с RRNN от 701 до 900 мс, с ИН в пределах 30,0-90,0 усл. ед., к ваготоникам – RRNN более 901 мс, ИН менее 30,0 усл. ед., к симпатотоникам – RRNN менее 700 мс, ИН более 120,0 усл. ед.

Для изучения показателей центральной гемодинамики проведены инструментальные и расчетные методы исследования. Для анализа адаптивных реакций сердечно-сосудистой системы у начинающих лыжников использованы расчетные показатели: частота сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление систолическое (САД) и диастолическое (ДАД), ударный и минутный объем крови (УО и МОК), сердечный индекс (СИ), общее и удельное периферическое сопротивление сосудов (ОПСС и УПСС), коэффициент эффективности кровообращения (КЭК), коэффициент выносливости (КВ), двойное произведение (ДП). В ходе трехэтапного исследования сформированы 3 группы спортсменов в зависимости от преобладающего типа АНС.

**Анализ результатов.** Гемодинамические показатели юных спортсменов в начале годовичного тренировочного цикла представлены в табл. 1. ЧСС в группе спортсменов находится в пределах возрастных значений, характерных для лиц, занимающихся циклическими видами спорта, что подчеркивает влияние направленности тренировочных нагрузок. Систолическое и диастолическое давление соответствует возрастной норме (САД =  $103 \pm 6,5$  мм. рт. ст., ДАД =  $70 \pm 5,5$  мм. рт. ст.). Величина среднего динамического артериального давления (СДД) в группе лыжников ниже возрастной нормы (90–100 мм. рт. ст.). Исследователями уделяется большое внимание определению возрастных границ артериального давления (АД) и антропометрических показателей, так как эти значения варьируют из-за различных темпов роста, когда степень физического и полового созревания не соответствует "паспортному" возрасту ребенка [9].

Таблица 1  
Показатели гемодинамики юных лыжников в переходный период подготовки ( $M \pm m$ )

| Показатель                   | Значение (n=17)      |
|------------------------------|----------------------|
| ЧСС, уд/мин                  | $68,14 \pm 3,28$     |
| САД, мм. рт. ст              | $99,28 \pm 5,39$     |
| ДАД, мм. рт. ст              | $70,71 \pm 3,16$     |
| СДД, мм. рт. ст              | $80,23 \pm 3,6$      |
| УО, мл                       | $44,31 \pm 2,18$     |
| МОК, л/мин                   | $3036,9 \pm 247,82$  |
| СИ, л/мин/м <sup>2</sup>     | $2,66 \pm 0,25$      |
| ОПСС, дин*с*см <sup>-5</sup> | $2220,85 \pm 253,3$  |
| УПСС, усл. ед                | $32,5 \pm 4,42$      |
| КЭК, усл. ед                 | $1969,28 \pm 305,21$ |
| КВ, усл. ед                  | $25,8 \pm 2,9$       |
| ДП, усл. ед                  | $67,67 \pm 5,19$     |

Примечание: n – число спортсменов

Значения МОК в нашем случае достигаются за счет понижения ЧСС, но и увеличения ударного объема крови. Коэффициент экономичности кровообращения равный  $1969,28 \pm 305,21$  усл. ед, свидетельствует об оптимальных затратах организма на передвижение крови, при норме 2600 усл. ед.

Таким образом, анализ показателей гемодинамики свидетельствует о том, что у всех исследуемых спортсменов отмечена экономичная работа сердечной мышцы.

**В подготовительный период подготовки** 71 % спортсменов ваготонический тип АНС сохранили. При сравнении показателей с исходным состоянием (в переходный период) отмечается тенденция к урежению ЧСС  $68,14 \pm 3,28$  уд/мин до  $64,5 \pm 2,46$  уд/мин, но изменения не значимы ( $p=0,351$ ). Не претерпевают изменений значения САД и ДАД. Вместе с тем выявлено достоверное увеличение УО с  $44,31 \pm 2,18$  мл до  $50,6 \pm 0,88$  мл ( $p=0,008$ ), без достоверных изменений ЧСС и МОК ( $p>0,05$ ), что относится к особенностям физиологического спортивного сердца [10]. Также наблюдается тенденция к снижению ДП с  $67,67 \pm 5,19$  усл. ед. до  $60,75 \pm 1,53$  усл. ед. ( $p=0,252$ ). В сравнении с переходным периодом без изменений остается сердечный индекс (СИ) и общее периферическое сосудистое сопротивление (ОПСС), а коэффициент выносливости (КВ) уменьшается с  $25,8 \pm 2,9$  усл. ед. в переходном периоде до  $22,9 \pm 1,95$  усл. ед. в подготовительном. Этот результат связан с влиянием парасимпатической АНС в регуляции сократительной функции миокарда [11].

У второй части спортсменов (29 %) происходит переход с ваготонического на *нормотонический тип* АНС. Частота сердечных сокращений достоверно увеличивается до  $80,5 \pm 5,5$  уд/мин ( $r=0,024$ ), но при этом САД, ДАД и СДД остаются без существенных изменений. Общее и удельное периферическое сопротивление сосудов снизилось, но не значительно. Другие показатели гемодинамики (МОК, УО, СИ, КВ, ДП, ИФС) также не претерпевают существенных изменений ( $p>0,05$ ), что, по-видимому, свидетельствует о стабильно высоком уровне адаптации ССС к нагрузкам.

**В соревновательный период годового цикла** у 88 % спортсменов сохраняется данный тип АНС. У спортсменов с *сохранившимся ваготоническим типом* в соревновательный период средние значения ЧСС, САД остались без существенных изменений по сравнению с переходным периодом. Вместе с тем, ДАД снизилось с  $70,71 \pm 3,16$  мм. рт. ст. до  $59 \pm 2,21$  мм. рт. ст. ( $p=0,014$ ), СДД уменьшилось с  $80,23 \pm 3,6$  мм. рт. ст. до  $71,6 \pm 2,24$  мм. рт. ст. ( $p=0,088$ ). Достоверное повышение значений УО (с  $44,31 \pm 2,18$  мл. до  $58,48 \pm 1,45$  мл.,  $p=0,000$ ) и снижение ОПСС (с  $2220,85 \pm 253,3$   $\text{дин} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-5}$  до  $1486,089 \pm 110,48$   $\text{дин} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-5}$ ,  $p=0,007$ ) в соревновательный период по сравнению с переходным периодом годового цикла повлияло и на увеличение МОК (с  $3036,9 \pm 247,82$  л/мин до  $3982,74 \pm 216,42$  л/мин,  $p=0,019$ ). Данные изменения связаны с адаптацией сердечно-сосудистой системы к повышенным потребностям организма. Повысилось значение КЭК (с  $1969,28 \pm 305,21$  усл. ед. до  $2582,1 \pm 136,0$  усл. ед.,  $p=0,025$ ) в пределах нормы и понизился КВ с  $25,8 \pm 2,9$  усл. ед. до  $18,07 \pm 1,03$  усл. ед. Подобные значения, по мнению ряда авторов свидетельствует о снижении нагрузки на сердечно-сосудистую систему в холодное время года [12–15].

#### **Выводы.**

1. Полученные результаты свидетельствуют, что у юных лыжников значения показателей центральной и периферической гемодинамики: ЧСС, САД, ДАД, УО, МОК, СИ, ОПСС, УПСС, КЭК, КВ, ДП в начале годового цикла тренировок соответствуют возрастной норме.

2. В подготовительный период подготовки у большей части спортсменов (71 %), у которых сохранился ваготонический тип АНС, изменения свидетельствуют об

улучшении функционального состояния по сравнению с переходным периодом. У остальных спортсменов, которые перешли в группу с нормотоническим типом АНС (29 %), наблюдается некоторое ослабление деятельности ССС, но в пределах оптимальной нормы. Адаптация миокарда сердца к интенсивным нагрузкам тесно связана с напряжением его сократительной функции, как по частоте, так и по амплитуде. Данные изменения гемодинамических показателей связаны со сменой интенсивности нагрузок и показывают как происходит оптимизация адаптации организма к нагрузкам, характерным для подготовительного периода.

3. В соревновательный период у 88 % спортсменов изменения показателей гемодинамики следует рассматривать как защитно-компенсаторную реакцию, направленную на стабилизацию интенсивности кровотока за счет усиления систолической функции миокарда.

4. Изменение показателей центральной гемодинамики в годичном тренировочном цикле характеризует высокий уровень соматического здоровья. Следовательно, описанный путь регуляции ССС к разнонаправленным нагрузкам у юных лыжников с преобладающим ваготоническим типом АНС, в результате грамотно построенного режима труда и отдыха, является физиологически благоприятным для сердца и в целом для всего организма. Для полноты анализа влияния разнонаправленных нагрузок требуется дополнительное исследование спортсменов с симпатотоническим и нормотоническим типом АНС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизов Ф.Г. Лыжный спорт всё о коньковом ходе: Учебное пособие. – Казань, 2018 – 105 с.
2. Ширков Ю.А. О развитии лыжных видов спорта в России // Karelian Scientific Journal. – 2019. – Т. 8, № 1(26). – С. 54-56. – DOI: 10.26140/knz4-2019-0801-0015
3. Функциональное состояние сердечно-сосудистой и дыхательной систем спортсменов видов спорта на выносливость (на примере лыжных гонок) / В.С. Нопина, О.Н. Акимкина, А.С. Нопин, В.В. Корнева // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – Т. 8, № 3. – DOI: 10.24412/2588-0500-2024\_08\_03\_29
4. 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. – URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=13816> (дата обращения: 29.04.2026).
5. Григорьева И.В. Влияние физических упражнений на сердечно-сосудистую систему / И. В. Григорьева, А. А. Плотников, Е. Г. Волкова // Вестник Воронежского института высоких технологий 2022. – Т. 16, № 1. – URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=184> (дата обращения: 27.04.2026).
6. Абзалов Н.И. Резервы насосной функции сердца развивающегося организма при гипо- и гиперкинезии : Монография / Н.И. Абзалов, Р.А. Абзалов, Р.Р. Нигматуллина. – Казань: К(П)ФУ, 2015. – 116 с.
7. Дугнист П.Я. Особенности адаптации организма спортсмена к физическим нагрузкам: аналитический обзор / П.Я. Дугнист, Е.В. Романова // Здоровье человека, теория и методика физической культуры и спорта. – 2016. – № 2. – С. 3-13. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-adaptatsii-organizma-sportsmena-k-fizicheskim-nagruzkam-analiticheskii-obzor/viewer/> (дата обращения: 27.04.2026).
8. Шлык Н.И. Оценка качества тренировочного процесса у лыжников-гонщиков и биатлонистов по результатам ежедневных исследований variability сердечного ритма / Н.И. Шлык, Е.С. Лебедев, О.С. Вершинина // Наука и спорт: современные тенденции. – 2019. – Т. 7, № 2. – URL: <http://lib.sportedu.ru/Press/NiSST/2019n2/p92-105.pdf> (дата обращения: 27.04.2026).
9. Оценка физического развития детей различного возраста: учебное пособие / Н.А. Барабаш Л.К. Гладких, В.А. Желев и др.; под ред. А.В. Желева, Е.В. Михалева, Н.А. Барабаш. – Томск: Издательство СибГМУ, 2018 – 134 с.
10. Васильев А.П. Спортивное сердце / А.П. Васильев, Н.Н. Старельцова // Медицинский совет. – 2018. – №12. – С. 185-188. – DOI: 10.21518/2079-701X-2018-12-185-188

11. Ситдииков Ф.Г. Вагусная регуляция развивающегося сердца / Ф.Г. Ситдииков, А.Р. Гиззатуллин, Н.И. Зиятдинова – Казань: ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", 2016 – 234 с.
12. Корельская И.Е. Оценка состояния сердечно-сосудистой системы юных спортсменов, занимающихся лыжными гонками, постоянно проживающих в северном регионе России / И.Е. Корельская, Е.Н. Воронцова // Научное обозрение. Биологические науки. – 2018. – № 2. – С. 15-20. – DOI: 10.17513/srbs.1097
13. Андреева Г.Ф., Горбунов В.М. Основные аспекты сезонной сердечно-сосудистой смертности // Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии. – 2021. – Т. 17, № 1. – С. 92-98. – DOI: 10.20996/1819-6446-2021-02-01.
14. Иванова Е.Г. Климатогеографические условия как фактор риска сердечно-сосудистых заболеваний у некоторых жителей западной Сибири / Иванова Е.Г., Фомин И.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2024. – № 1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33283> (дата обращения: 28.04.2026).
15. Влияние времени года и температуры воздуха на состояние пациентов со стабильной ишемической болезнью сердца / И.Л. Козловская, О.С. Булкина, В.В. Лопухова, Н.А. Чернова // Кардиология. Терапия. – 2016. – № 2 (119). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vremeni-goda-i-temperatury-vozduha-na-sostoyanie-patsientov-so-stabilnoy-ishemicheskoy-boleznyu-serdtsa/viewer> (дата обращения: 28.04.2026).

## REFERENCES

1. Gazizov, F.G. (2018) [Skiing: Everything About the Skating Technique: A Study Guide]. – Kazan, 105 p. (In Russian).
2. Shirkov, Yu.A. (2019) On the Development of Ski Sports in Russia. *Karelian Scientific Journal*. 8. (1/26), 54-56, doi: 10.26140/knz4-2019-0801-0015. (In Russian).
3. Nopina, V.S. Akimkina, O.N. Nopin, A.S. & Korneva, V.V. (2024) Functional state of the cardiovascular and respiratory systems of athletes in endurance sports (on the example of cross-country skiing). *Modern Issues of Biomedicine*. 8. (3), doi: 10.24412/2588-0500-2024\_08\_03\_29. (In Russian).
4. Melnikova, N.V. Egorycheva, E.V., Chernysheva, I.V., & Shlemova, M.V. (2015) The effects of physical training on blood and the circulatory system. *International Student Scientific Bulletin*. 5-3. Retrieved from: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=13816> (accessed: 29.04.2026). (In Russian).
5. Grigorieva, I.V. Plotnikov, A.A. & Volkova, E.G. (2022) The effect of physical exertion on the cardiovascular system / I. V. Grigorieva, // *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. Retrieved from: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=184> (date of application: 27.04.2026). (In Russian).
6. Abzalov, N.I. Abzalov, R.A. & Nigmatullina, R.R. (2015) Reserves of the pumping function of the heart of a developing organism in case of hypo- and hyperkinesia. Kazan: Kazan Federal University. (In Russian).
7. Dugnist, P.Ya. & Romanova, E.V. (2016) Features of the Athlete's Body Adaptation to Physical Strain. *Human Health, Theory and Methods of Physical Culture and Sports*. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-adaptatsii-organizma-sportsmena-k-fizicheskim-nagruzkam-analiticheskiy-obzor/viewer/> (date of application: 27.04.2026). (In Russian).
8. Shlyk, N.I. Lebedev, E.S., & Vershinina, O.S. (2019) Assessment of the Training Process Quality in Cross-Country Skiers and Biathletes Based on Daily Heart Rate Variability Studies. Retrieved from: <http://lib.sportedu.ru/Press/NiSST/2019n2/p92-105.pdf/> (date of application: 27.04.2026). (In Russian).
9. Barabash, N.A. Gladkikh, L.K. & Zhelev, V.A. (2018) Assessment of Physical Development in Children of Different Ages: A Study Guide / edited by A.V. Zhelev, E.V. Mikhalev, & N.A. Barabash. – Tomsk: Siberian State Medical University Publishing House, 2018 – 134 p. (In Russian).
10. Vasilyev, A.P. & Streltsova, N.N. (2018) Sporting Heart. *Medical Council*. 12. 185-188, doi: 10.21518/2079-701X-2018-12-185-188 (In Russian).
11. Sitdikov, F.G. Gizzatullin, A.R., & Ziyatdino, N.I. (2016) Vagal Regulation of the Developing Heart. Kazan: Kazan Federal University. 234 p. (In Russian).
12. Korelskaya, I.E. & Vorontsova, E.N. (2018) Assessment of the Cardiovascular System of Young Athletes Engaged in Cross-Country Skiing and Living in the Northern Region of Russia. *Scientific Review. Biological Sciences*. 2, 15-20, doi: 10.17513/srbs.1097. (In Russian).
13. Andreeva, G.F. & Gorbunov, V.M. (2021) Basic Aspects of Seasonal Cardiovascular Mortality. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology*. 17(1). 92-98, doi:10.20996/1819-6446-2021-02-01. (In Russian).

14. Ivanova, E.G. & Fomin, I.V. (2024) Climatic and Geographical Conditions as a Risk Factor for Cardiovascular Diseases in Some Residents of Western Siberia. Problems of Science and Education. 1. Retrieved from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33283> (date of application: 28.04.2026). (In Russian).
15. Kozlovskaya, I.L., Bulkina, O.S., Lopukhova, V.V. & Chernova, N.A. (2016) Influence of the season and air temperature on the condition of patients with stable coronary artery disease. // Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vremeni-goda-i-temperatury-vozduha-na-sostoyanie-patsientov-so-stabilnoy-ishemicheskoy-boleznyu-serdtsa/viewer> (date of application: 28.04.2026). (In Russian).

#### FEATURES OF CENTRAL HEMODYNAMICS IN SKIERS WITH VAGOTONIC TYPES OF AUTONOMOUS NERVOUS SYSTEM IN THE ANNUAL TRAINING CYCLE

*R. I. Efremova, A. P. Spitsin*

The paper presents the results of a study of the central and peripheral hemodynamics of 10-11-year-old skiers with a parasympathetic type of the autonomic nervous system. The study examined the calculated indicators of the cardiovascular system during the transition, preparatory, and competitive periods of training. The results of the study revealed specific changes in hemodynamic indicators depending on the training period and the activity of the parasympathetic autonomic nervous system. These changes reflect the specific effects of multidirectional loads on the bodies of young skiers.

**Keywords:** central hemodynamics; young skiers; annual training cycle.

*Поступила в редакцию 02.05.2026 г.*

***Ефремова Руфина Ильсуровна***

аспирант;  
ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, РФ.  
E-mail: [rufina\\_85@inbox.ru](mailto:rufina_85@inbox.ru)  
ORCID: 0009-0009-8378-0308  
SPIN-код: 2568-1149

***Efremova Rufina***

postgraduate student;  
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.  
e-mail: [rufina\\_85@inbox.ru](mailto:rufina_85@inbox.ru)

***Спицин Анатолий Павлович***

доктор медицинских наук, профессор;  
ФГБОУ ВО «Кировский государственный медицинский университет», г. Киров, РФ.  
E-mail: [rufina\\_85@inbox.ru](mailto:rufina_85@inbox.ru)  
ORCID: 0000-0002-0942-6361  
SPIN-код: 7499-8880

***Spitsin Anatoly***

doctor of Medical Sciences, Professor;  
FSBEI HE "Kirov State Medical University",  
Kirov, Russian Federation  
e-mail: [rufina\\_85@inbox.ru](mailto:rufina_85@inbox.ru)

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЮГА КАМЧАТКИ В ГРАДИЕНТЕ УРБАНИЗАЦИИ ПОБЕРЕЖЬЯ

© 2026. К. М. Зарипова, Е. А. Тихонова

В августе 2025 года на 50 станциях в прибрежных акваториях южной Камчатки проведены исследования содержания взвешенных веществ в районах с разной степенью урбанизации. Пробы отбирали из поверхностного горизонта батометром, фильтровали через мембранные фильтры (0,45 мкм). Выделены три зоны: городская (менее 10 км от крупных городов), пригородная (10–30 км от городов или менее 5 км от посёлков) и фоновая (более 30 км от населённых пунктов). Установлены статистически значимые различия между зонами. Медианное содержание взвеси в городской зоне (5,58 мг/л) в 3,8 раза превышает фоновые значения (1,48 мг/л). Максимум (31,10 мг/л) зафиксирован в Авачинской губе – более чем в три раза выше рыбохозяйственного норматива (10,0 мг/дм<sup>3</sup>). Для оценки влияния урбанизации применён индекс, учитывающий размер ближайшего населённого пункта и удалённость от него. Построена экспоненциальная регрессионная модель ( $R^2 = 0,65$ ;  $p < 0,001$ ), объясняющая 65 % вариации содержания взвешенных веществ.

**Ключевые слова:** урбанизация побережья, взвешенные вещества, прибрежные акватории, полуостров Камчатка, антропогенное воздействие, Охотское море, Тихий океан.

**Введение.** Урбанизация прибрежных зон является одним из наиболее значимых антропогенных факторов, трансформирующих морские экосистемы: около 40 % населения мира проживает в пределах 100 км от побережья [1], при этом в прибрежных зонах Земли сосредоточено 90 % морского биоразнообразия, что делает их особенно уязвимыми к антропогенному прессу. Наряду с возрастающей урбанизацией прибрежных районов [2, 3], усиливается нагрузка на водные объекты за счет интенсификации хозяйственной деятельности, расширения портовой инфраструктуры, точечного и диффузного сброса сточных вод, а также трансформации береговой линии, что может приводить к ухудшению гидроморфологических и химических характеристик водных объектов, деградации природных фильтров и снижению способности экосистем к саморегуляции.

Рост городов, сопровождающийся увеличением площади непроницаемых покрытий (асфальт, бетон, кровля), коренным образом изменяет естественные пути переноса вещества. Городское развитие значительно трансформировало естественный гидрологический цикл: непроницаемые покрытия запечатывают грунт, мешают инфильтрации воды и могут увеличивать объем и скорость поверхностного стока [4, 5]. С одной стороны, это способствует более интенсивному смыву загрязняющих веществ и частиц почвы в водоемы. С другой стороны, сам источник поступления взвешенного материала может трансформироваться: изоляция осадочных пород в ряде случаев приводит к сокращению их естественного разрушения и, как следствие, к снижению поступления взвеси с урбанизированных водосборов [1].

Изменения гидрологии, геоморфологии и экологии городских водотоков, возникающие вследствие изоляции почв и создания дренажных систем, подробно описаны в классических и современных работах [6–9]. Повышенные уровни взвешенных веществ и загрязнителей в бассейнах стока стали серьезной проблемой для управления городскими водосборами; для обозначения деградации городских

водотоков был введен специальный термин «синдром городской реки» (urban stream syndrome) [9, 10].

Урбанизация побережья может сопровождаться различными изменениями качества воды в прибрежных зонах, включая повышение электропроводности, концентрации биогенов и бактерий [11]. Особое значение в этом контексте имеют взвешенные вещества, которые переносят широкий спектр поллютантов, в том числе тяжелые металлы, биогенные элементы, нефтяные углеводороды и микроорганизмы, и влияют на прозрачность воды, продуктивность фитопланктона и состояние бентосных сообществ [12]. Данная роль делает содержание взвешенных веществ в прибрежных акваториях чувствительным маркером антропогенного воздействия. При этом зоны с повышенными концентрациями взвеси могут образовывать отчетливые «линзы», пространственно приуроченные к конкретным источникам, таким как порты, судоходные пути и терминалы [13].

Исследования на реках урбанизированных территорий России также показывают, что поступление взвеси с городских территорий в водотоки является одним из основных путей распространения загрязнителей. Их вынос может многократно превышать поступление из природных ландшафтов, особенно за счет площадного смыва с селитебных территорий, дорог и неорганизованного стока ливневых вод [14].

Анализ спутниковых данных за 2000–2023 гг. показал, что урбанизация и связанное с ней расширение площади непроницаемых поверхностей являются одними из главных факторов изменения мутности прибрежных вод по всему миру [1]. Примечательно, что Россия входила в 20 ведущих стран по доле прибрежных вод (в пределах 100 км от берега), в которых среднегодовое содержание взвешенных веществ превышало 10 мг/л. В [1] также отмечается, что нелинейные взаимосвязи между гидродинамическими сдвигами, вызванными изменением климата, и антропогенным воздействием формируют сложные и пространственно неоднородные схемы переноса вещества между сушей и морем. В одних районах наблюдается истощение запасов осадочного материала, в других фиксируется локальное накопление или усиление ресуспензии донных осадков.

Полуостров Камчатка относится к регионам с высоким биоразнообразием, однако его прибрежные экосистемы испытывают возрастающую антропогенную нагрузку от немногочисленных, но крупных урбанизированных центров: Петропавловска-Камчатского, Елизово и Вилючинска [15, 16].

Целью данной работы является выявление связи между уровнем урбанизации побережья и содержанием взвешенных веществ в прибрежных водах южной Камчатки на основе данных, полученных в ходе экспедиционных исследований в августе 2025 года.

**Материалы и методы.** Пробы взвешенных веществ были отобраны в августе 2025 года в рейсе ПС «Профессор Мультиановский» в акваториях Северо-Западной Пацифики и юго-восточной части Охотского моря на 50 станциях (рис. 1). Для определения содержания взвешенных веществ в воде пробы воды из поверхностного горизонта отбирали при помощи розетки с батометрами. В объеме 1 л фильтровали на установке для вакуумной фильтрации с применением вакуумного насоса, фильтровальной установки и колбы Бунзена. Для отделения взвеси использовались нитроцеллюлозные мембранные фильтры с ячеей 0,45 мкм с заранее известными массами. После фильтрации фильтры высушивали при комнатной температуре, хранили в эксикаторе и для транспортировки в лабораторию герметично упаковывали в зип-пакеты в соответствии с РД 52.24.468-2019.

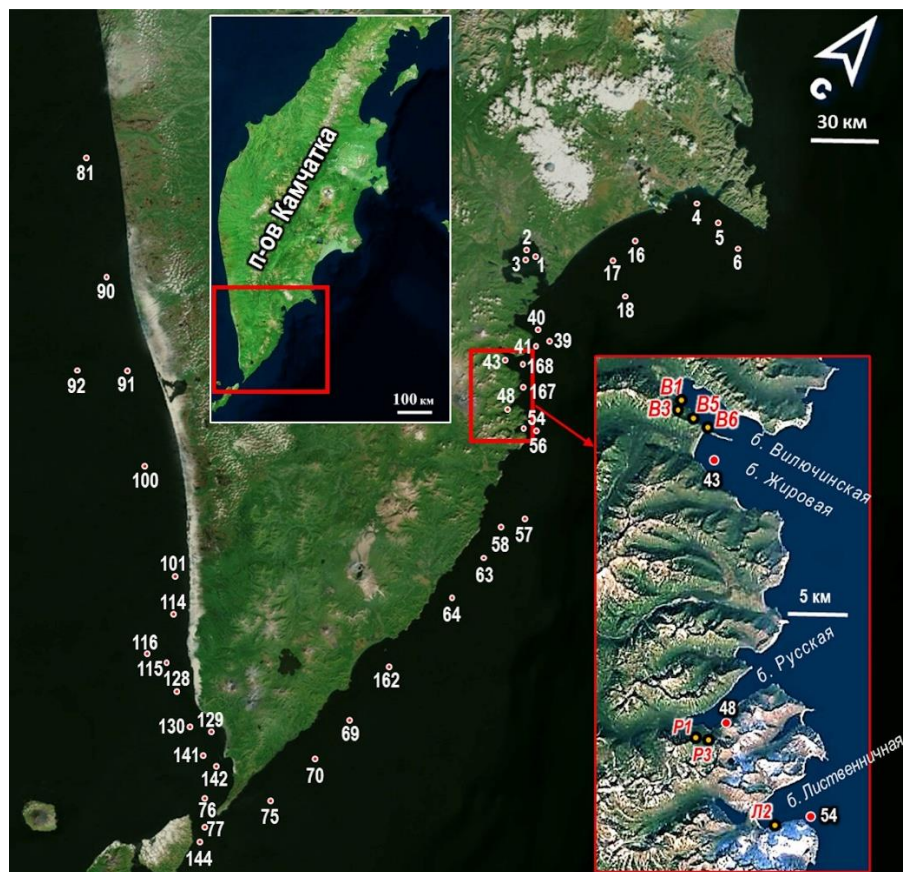


Рис. 1. Картограмма станций отбора проб взвешенных веществ в морской воде в прибрежных акваториях полуострова Камчатка.

Для оценки влияния урбанизации побережья на пространственное распределение взвешенных веществ все 50 станций были разделены на три группы: городская, пригородная и фоновая зоны. К городской зоне отнесены станции (1, 2, 3, 39, 40, 41, 43, B1, B3, B5, B6, 48, P1, P3), расположенные менее чем в 10 км от крупных городов (Петропавловск-Камчатский, Елизово, Вилючинск). Пригородная зона включает станции (4, 5, 6, 16, 17, 18, 54, L12, 56, 90, 91, 167, 168), находящиеся на расстоянии 10–30 км от крупных городов или менее 5 км от посёлков. Фоновую зону составили станции (57, 58, 63, 64, 69, 70, 75, 76, 77, 81, 92, 100, 101, 114, 115, 116, 128, 129, 130, 141, 142, 144, 162), удалённые более чем на 30 км от любых населённых пунктов.

Для количественной оценки влияния прибрежных населённых пунктов на содержание взвешенных веществ в морской воде был применён индекс урбанизации. Данный показатель учитывает размер ближайшего населённого пункта (через численность населения) и удалённость от него. Индекс вычислялся по формуле:

$$I = \ln(P / D),$$

где  $P$  – численность населения ближайшего населённого пункта (тыс. чел.),  $D$  – расстояние до него (км). Использование натурального логарифма позволило стабилизировать дисперсию и привести распределение расчётных значений к виду, удобному для последующего регрессионного анализа. Согласно [17], использование подобных индексов широко распространено при изучении влияния урбанизации побережья на состояние прибрежных экосистем. Численность населения при этом является одним из наиболее часто учитываемых показателей. Подход, сочетающий учёт

размера поселения и расстояния до него, был реализован, в частности, в работах [18] и [19] при оценке качества вод в Великих озёрах и в прибрежной зоне Китая соответственно.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета Microsoft Excel. Для оценки нормальности распределения выборок содержания взвешенных веществ в выделенных зонах применяли критерий Шапиро–Уилка. Поскольку распределение во всех группах статистически значимо отличалось от нормального ( $p < 0,05$ ), для сравнения трёх независимых групп использовали непараметрический ранговый критерий Краскала–Уоллиса. При обнаружении статистически значимых различий между группами ( $p < 0,05$ ) последующие попарные сравнения выполняли с помощью критерия Данна с поправкой Бонферрони для контроля множественных сравнений. Выбор критерия Данна обусловлен тем, что он адаптирован для непараметрического дисперсионного анализа и корректно работает при различных объёмах сравниваемых групп. Поправка Бонферрони применена для контроля ошибки I рода при множественных сравнениях. Для оценки силы и направления связи между содержанием взвешенных веществ и индексом урбанизации рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона после логарифмического преобразования зависимой переменной.

**Результаты и обсуждение.** Содержание взвешенных веществ в воде в исследованном районе колеблется в широких пределах (рис. 2). Для оценки влияния урбанизации побережья на пространственное распределение взвешенных веществ в поверхностном водном горизонте прибрежных акваторий южной части полуострова 50 станций были разделены на три группы в соответствии с градиентом антропогенной нагрузки: городская ( $n=14$ ), пригородная ( $n=13$ ) и фоновая ( $n=23$ ) зоны. Критериями для выделения зон послужили удаленность от населенных пунктов и их площадь. Результаты сравнения содержания взвешенных веществ в поверхностном водном горизонте выделенных зон представлены на рис. 3.

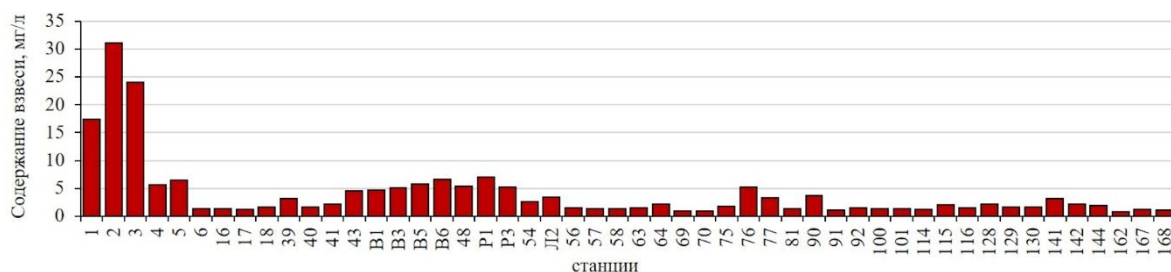


Рис. 2. Содержания взвешенных веществ (мг/л) в поверхностном горизонте прибрежных акваторий южной Камчатки.

Наибольшие уровни содержания и максимальный разброс значений наблюдаются в городской зоне. Медиана содержания здесь составляет 5,58 мг/л. Максимальное значение в этой группе достигает 31,10 мг/л (станция 2 в Авачинской губе), что превышает установленный для рыбохозяйственных водных объектов норматив ( $10,0 \text{ мг/дм}^3$ ) [20] более чем в три раза. Высокая вариабельность показателей в городской зоне, по-видимому, связана с неравномерным поступлением загрязненных поверхностных и ливневых стоков, а также с локальными условиями водообмена в отдельных бухтах. Согласно [21], ежегодный сброс сточных вод в Авачинскую губу составляет почти 15 млн  $\text{м}^3$  через 49 выпусков (без учета еще 20 бесхозяйных выпусков). В г. Петропавловске-Камчатском проходят очистку порядка 20 % сточных вод (на 7 очистных сооружениях), в г. Вилочинске – на одном сооружении, в Елизовском районе – также на одном. Очистка ливневых стоков отсутствует.

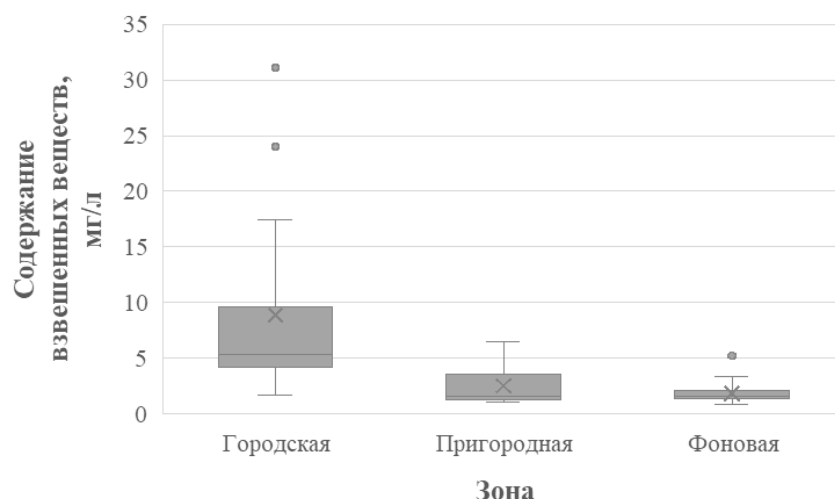


Рис. 3. Сравнение содержания взвешенных веществ (мг/л) в морской воде прибрежных акваторий южной Камчатки в зонах с разным уровнем урбанизации побережья.

Отметим, что общее содержание взвешенных веществ в воде было отмечено среди показателей, указывающих на долгосрочную тенденцию к ухудшению качества воды в связи с урбанизацией водосборного бассейна [22].

В пригородной зоне содержание взвешенных веществ снижается. Медиана здесь составляет 1,65 мг/л, а разброс значений существенно меньше, чем в городской зоне.

Фоновая зона, удаленная от населенных пунктов более чем на 30 км, характеризуется минимальными и наиболее стабильными содержаниями взвеси. Медианное значение составляет 1,48 мг/л, при этом 75 % проб содержат менее 2,1 мг/л.

Отметим, что медианное содержание взвеси в городской зоне в 3,4 раза превышает показатель пригородной зоны и в 3,8 раза – фоновой. Средние значения составляют соответственно: 9,82, 2,99 и 1,73 мг/л.

Статистическая значимость различий между выделенными группами подтверждена с использованием непараметрического критерия Краскала–Уоллиса ( $N = 32,4$ ;  $p < 0,0001$ ). Выбор непараметрического метода обусловлен тем, что распределение данных отличалось от нормального по критерию Шапиро–Уилка ( $p < 0,05$ ). Последующие попарные сравнения по критерию Данна с поправкой Бонферрони выявили статистически значимые различия между всеми парами групп: город–пригород ( $p < 0,001$ ), город–фон ( $p < 0,001$ ) и пригород–фон ( $p < 0,01$ ).

Зависимость содержания взвешенных веществ от рассчитанного индекса урбанизации представлена на рис. 3. На рисунке прослеживается положительная зависимость между исследуемыми параметрами: с ростом значения  $I$  наблюдается тенденция к увеличению содержания взвешенных веществ.

Подбор различных регрессионных моделей показал, что наилучшей аппроксимацией обладает экспоненциальная функция (рис. 3). Все параметры модели статистически значимы ( $p < 0,001$ ). Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,65$  свидетельствует о том, что построенная модель объясняет 65 % наблюдаемой вариации содержания взвешенных веществ. Дополнительно рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона между логарифмом значений содержания взвешенных веществ и индексом урбанизации составил  $r = 0,81$  ( $p < 0,001$ ), что указывает на сильную линейную связь между этими преобразованными переменными. В [23] также выявили значимые корреляции ( $r > 0,5$ ;  $p < 0,05$ ) между комбинированными индексами урбанизации водосборных территорий и содержанием взвешенных веществ в воде при анализе 30-летних рядов данных на 16 водосборах Гонконга.

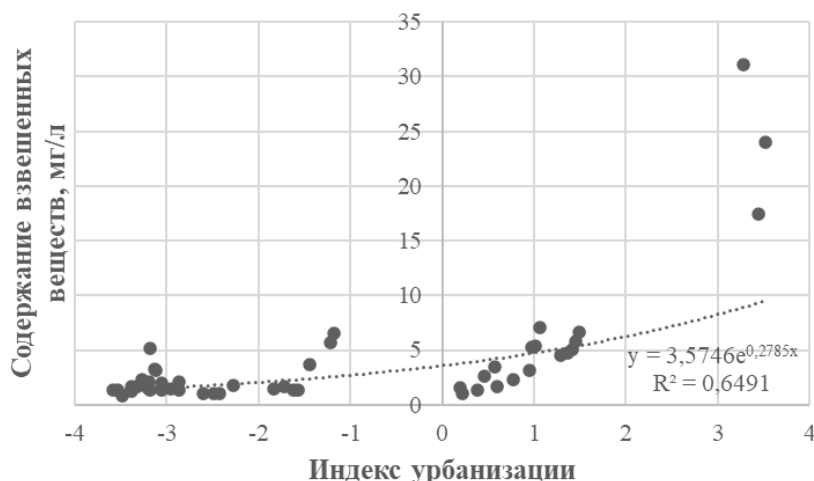


Рис. 3. Зависимость содержания взвешенных веществ в поверхностном горизонте прибрежных акваторий юга полуострова Камчатка от интегрального индекса урбанизации ( $I$ ).

Оставшиеся 35 % дисперсии, не объясненные моделью, связаны с природными факторами, не учтенными в анализе, включая вынос взвеси речным стоком, штормовое взмучивание, локальные гидродинамические условия. Учет этих факторов требует дополнительных исследований с привлечением данных по сезонной динамике стока и гидрометеорологическим условиям.

**Заключение.** В ходе исследования установлено, что урбанизация побережья является значимым фактором, определяющим пространственное распределение взвешенных веществ в прибрежных акваториях юга полуострова Камчатка. Статистический анализ выявил градиент «город–пригород–фон»: медианное содержание взвеси в городской зоне (5,58 мг/л) в 3,8 раза превышает фоновые значения (1,48 мг/л), а различия между всеми выделенными зонами были статистически значимы. Полученная регрессионная модель, учитывающая индекс урбанизации, объясняет 65 % вариации содержания взвешенных веществ в поверхностном водном горизонте прибрежных акваторий юга полуострова Камчатка и указывает на нелинейный, ускоряющийся характер влияния урбанизации по мере приближения к крупным населенным пунктам.

*Отбор проб проводился в рейсе ПС «Профессор Мультиановский» в рамках «Тихоокеанского Плавающего университета» (проекты № 075-03-2025-662/8 и № 075-03-2025-421/5); определение содержания взвеси и анализ полученных результатов - гос. задания ФИЦ ИнБЮМ «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7).*

#### PECULIARITIES OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION IN THE COASTAL WATERS OF SOUTHERN KAMCHATKA ALONG THE COASTAL URBANIZATION GRADIENT

*K. M. Zaripova, E. A. Tikhonova*

In August 2025, studies of suspended matter content were conducted at 50 stations in the coastal waters of southern Kamchatka, in areas with different degrees of coastal urbanization. Water samples were taken from the surface layer using a bathometer and filtered through membrane filters (0.45  $\mu\text{m}$  pore diameter). Three zones

were identified: urban (less than 10 km from large cities), suburban (10–30 km from cities or less than 5 km from towns), and background (more than 30 km from settlements). Statistically significant differences between the zones were established. The median suspended matter content in the urban zone (5.58 mg/L) is 3.8 times higher than background values (1.48 mg/L). The maximum concentration (31.10 mg/L) was recorded in Avacha Bay – more than three times above the fisheries standard (10.0 mg/dm<sup>3</sup>). To assess the impact of urbanization, an index was applied that takes into account the size of the nearest settlement and the distance from it. An exponential regression model was obtained ( $R^2 = 0.65$ ;  $p < 0.001$ ), explaining 65% of the variation in suspended matter content.

**Keywords:** coastal urbanization, suspended particulate matter, coastal waters, Kamchatka Peninsula, anthropogenic impact, Sea of Okhotsk, Pacific Ocean.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yan F., He B., Lyne V. et al. Global coastal water clarity has increased due to human intervention // *Communications Earth & Environment*. – 2025. – Vol. 6. – P. 641. – DOI: 10.1038/s43247-025-02638-x.
2. Nicholls R.J. et al. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure // *Nature Climate Change*. – 2021. – Vol. 11. – P. 338–342.
3. Lansu E.M. et al. A global analysis of how human infrastructure squeezes sandy coasts // *Nature Communications*. – 2024. – Vol. 15. – P. 1–7.
4. Motlagh A. Urban Stormwater and Groundwater Quality: Pathways, Risks, and Green Infrastructure Solutions // *Environments*. – 2025. – Vol. 12, No. 11. – P. 446.
5. Alhasaani Z.S., Abdulameer L., Nile B.K. Urban land use change and sewer system resilience: a comprehensive review // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2025. – Vol. 10. – P. 545. – DOI: 10.1007/s41062-025-02360-9.
6. Leopold L.B. Hydrology for Urban Land Planning: A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. – US Geological Survey, 1968. – Circular 554. – DOI: 10.3133/cir554.
7. Paul M.J., Meyer J.L. Streams in the Urban Landscape // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 2001. – Vol. 32, No. 1. – P. 333–365. – DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040.
8. Bhaskar A.S., Beesley L., Burns M.J., Fletcher T.D., Hamel P., Oldham C.E., Roy A.H. Will It Rise or Will It Fall? Managing the Complex Effects of Urbanization on Base Flow // *Freshwater Science*. – 2016. – Vol. 35, No. 1. – P. 293–310. – DOI: 10.1086/685084.
9. Safdar S., Jefferson A.J., Costello D.M., Blinn A. Urbanization and Suspended Sediment Transport Dynamics: A Comparative Study of Watersheds with Varying Degree of Urbanization Using Concentration-Discharge Hysteresis // *ACS ES&T Water*. – 2024. – Vol. 4, No. 9. – P. 3904–3917. – DOI: 10.1021/acsestwater.4c00214.
10. Walsh C.J., Roy A.H., Feminella J.W., Cottingham P.D., Groffman P.M., Morgan R.P. The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search for a Cure // *Journal of the North American Benthological Society*. – 2005. – Vol. 24, No. 3. – P. 706–723. – DOI: 10.1899/04-028.1.
11. Nagy R.C., Lockaby B.G., Kalin L., Anderson C. Effects of urbanization on stream hydrology and water quality: the Florida Gulf Coast // *Hydrological Processes*. – 2012. – Vol. 26, No. 13. – P. 2019–2030. – DOI: 10.1002/hyp.8336.
12. Linders T. et al. Particle sources and transport in stratified Nordic coastal seas in the Anthropocene // *Elementa: Science of the Anthropocene*. – 2018. – Vol. 6. – P. 29. – DOI: 10.1525/elementa.149.
13. Lomakin P.D., Chepyzhenko A.A., Chepyzhenko A.I. Colored Dissolved Organic Matter and Total Suspended Matter as the Indicators of Water Pollution in the Kerch Strait // *Physical Oceanography*. – 2025. – No. 4. – P. 492–507. – URL: <https://mhi-ras.editorum.ru/en/nauka/article/106277/view> (дата обращения: 05.03.2026).
14. Курочкина В.А., Богомолова Т.Г., Киров Б.Л. Антропогенная нагрузка на реки урбанизированных территорий // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 8. – С. 100–109.
15. Зарипова К.М., Тихонова Е.А. Распределение взвешенных веществ в прибрежных акваториях полуострова Камчатка // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. – 2025. – № 71. – С. 108–119. – DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-108-119.
16. Кириченко В.Е., Чернягина О.А. Интегральная карта антропогенного воздействия на природные комплексы Камчатки // Дальневосточная региональная конференция, посвященная памяти А.П. Васильковского (95-летие), Магадан, 28-29 ноября 2006 г. – URL: <https://terrakamchatka.ru/file/archive/maprus.htm>
17. Marlow B.N., Griffen B.D. Urbanization indices development and use in the coastal ecological realm: a review // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2025. – Vol. 13. – P. 1607614. – DOI: 10.3389/fevo.2025.1607614.

18. Howell E.T., Chomicki K.M., Kaltenecker G. Patterns in water quality on Canadian shores of Lake Ontario: Correspondence with proximity to land and level of urbanization // *Journal of Great Lakes Research*. – 2012. – Vol. 38. – P. 32–46.
19. Fan X., Li L., Yuan Y. et al. Urbanization and water quality dynamics and their spatial correlation in coastal margins of mainland China // *Ecological Indicators*. – 2022. – Vol. 138. – P. 108812. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108812.
20. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26 мая 2025 г. № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» // КонсультантПлюс. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 16.12.2025).
21. Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2024 году / Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. – Петропавловск-Камчатский, 2025. – 397 с.
22. Gomes P.I.A., Wai O.W.H. Investigation of Long-Term River Water Quality Trends in Hong Kong to Identify Role of Urbanization, Seasons and Pollution Sources // *Water Air Soil Pollut.* – 2020. – Vol. 231. – P. 378. – DOI: 10.1007/s11270-020-04753-1.
23. Gomes P.I.A., Karunatilaka P.D. Investigation of long-term river water quality variations using different urbanization indices and assessment of common scientific perspectives of urbanization on water quality // *Environmental Quality Management*. – 2023. – Vol. 32, No. 3. – P. 239–249. – DOI: 10.1002/tqem.21900.

## REFERENCES

1. Yan, F., He, B., Lyne, V., et al. (2025). Global coastal water clarity has increased due to human intervention. *Communications Earth & Environment*, 6, 641. DOI: 10.1038/s43247-025-02638-x.
2. Nicholls, R. J., et al. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11, 338–342.
3. Lansu, E. M., et al. (2024). A global analysis of how human infrastructure squeezes sandy coasts. *Nature Communications*, 15, 1–7.
4. Motlagh, A. (2025). Urban Stormwater and Groundwater Quality: Pathways, Risks, and Green Infrastructure Solutions. *Environments*, 12(11), 446.
5. Alhasaani, Z. S., Abdulameer, L., & Nile, B. K. (2025). Urban land use change and sewer system resilience: a comprehensive review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 545. DOI: 10.1007/s41062-025-02360-9.
6. Leopold, L. B. (1968). *Hydrology for Urban Land Planning: A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use* (Circular 554). US Geological Survey. DOI: 10.3133/cir554.
7. Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the Urban Landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 333–365. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040.
8. Bhaskar, A. S., Beesley, L., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Hamel, P., Oldham, C. E., & Roy, A. H. (2016). Will It Rise or Will It Fall? Managing the Complex Effects of Urbanization on Base Flow. *Freshwater Science*, 35(1), 293–310. DOI: 10.1086/685084.
9. Safdar, S., Jefferson, A. J., Costello, D. M., & Blinn, A. (2024). Urbanization and Suspended Sediment Transport Dynamics: A Comparative Study of Watersheds with Varying Degree of Urbanization Using Concentration-Discharge Hysteresis. *ACS ES&T Water*, 4(9), 3904–3917. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00214.
10. Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The Urban Stream Syndrome: Current Knowledge and the Search for a Cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706–723. DOI: 10.1899/04-028.1.
11. Nagy, R. C., Lockaby, B. G., Kalin, L., & Anderson, C. (2012). Effects of urbanization on stream hydrology and water quality: the Florida Gulf Coast. *Hydrological Processes*, 26(13), 2019–2030. DOI: 10.1002/hyp.8336.
12. Linders, T., et al. (2018). Particle sources and transport in stratified Nordic coastal seas in the Anthropocene. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 29. DOI: 10.1525/elementa.149.
13. Lomakin, P. D., Chepyzhenko, A. A., & Chepyzhenko, A. I. (2025). Colored Dissolved Organic Matter and Total Suspended Matter as the Indicators of Water Pollution in the Kerch Strait. *Physical Oceanography*, (4), 492–507. Retrieved from: <https://mhi-ras.editorum.ru/en/nauka/article/106277/view> (date of application: 05.03.2026).
14. Kurochkina, V. A., Bogomolova, T. G., & Kirov, B. L. (2016). [Anthropogenic load on rivers of urbanized territories]. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*, (8), 100–109. (In Russian).

15. Zaripova, K. M., & Tikhonova, E. A. (2025). [Distribution of suspended matter in coastal waters of the Kamchatka Peninsula]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kamchatka State Technical University*, (71), 108–119. DOI: 10.17217/2079-0333-2025-71-108-119. (In Russian).
16. Kirichenko, V. E., & Chernyagina, O. A. (2006). [Integral map of anthropogenic impact on natural complexes of Kamchatka]. In: *Far Eastern Regional Conference dedicated to the memory of A. P. Vaskovsky (95th anniversary)*, Magadan, November 28–29, 2006. (In Russian).
17. Marlow, B. N., & Griffen, B. D. (2025). Urbanization indices development and use in the coastal ecological realm: a review. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 13, 1607614. <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1607614>
18. Howell, E. T., Chomicki, K. M., & Kaltenecker, G. (2012). Patterns in water quality on Canadian shores of Lake Ontario: Correspondence with proximity to land and level of urbanization. *Journal of Great Lakes Research*, 38, 32–46.
19. Fan, X., Li, L., Yuan, Y., et al. (2022). Urbanization and water quality dynamics and their spatial correlation in coastal margins of mainland China. *Ecological Indicators*, 138, 108812. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108812>
20. Prikaz Federal'nogo agentstva po rybolovstvu ot 26 maya 2025 g. № 296 "Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya...". (2025). [Order of the Federal Agency for Fisheries No. 296 of May 26, 2025 "On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance..."]. *ConsultantPlus*. Retrieved from: <https://www.consultant.ru> (date of application: 16.12.2025). (In Russian).
21. Ministerstvo prirodnikh resursov i ekologii Kamchatskogo kraia. (2025). [Report on the state of the environment in the Kamchatka Territory in 2024]. Petropavlovsk-Kamchatsky. 397 p. (In Russian).
22. Gomes, P. I. A., & Wai, O. W. H. (2020). Investigation of Long-Term River Water Quality Trends in Hong Kong to Identify Role of Urbanization, Seasons and Pollution Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, 378. DOI: 10.1007/s11270-020-04753-1.
23. Gomes, P. I. A., & Karunatilaka, P. D. (2023). Investigation of long-term river water quality variations using different urbanization indices and assessment of common scientific perspectives of urbanization on water quality. *Environmental Quality Management*, 32(3), 239–249. DOI: 10.1002/tqem.21900.

*Поступила в редакцию 22.05.2026 г.*

***Зарипова Ксения Маратовна***

младший научный сотрудник,  
Лаборатория хемозологии отдела радиационной  
и химической биологии,  
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей  
имени А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, РФ.  
E-mail: zaripova\_km@ibss-ras.ru  
ORCID: 0009-0001-1160-4139;  
SPIN-код: 4535-0790;  
AuthorID: 1080936

***Zaripova Ksenia Maratovna***

Junior Researcher,  
Laboratory of Chemoecology, Department of  
Radiation and Chemical Biology,  
A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern  
Seas of RAS, Sevastopol, Russia.

***Тихонова Елена Андреевна***

кандидат биологических наук, ведущий научный  
сотрудник, Лаборатория хемозологии отдела  
радиационной и химической биологии,  
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей  
имени А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, РФ.  
E-mail: tikhonova\_ea@ibss-ras.ru  
ORCID: 0000-0002-9137-087X;  
SPIN-код: 3786-7334;  
AuthorID: 844103

***Tikhonova Elena Andreevna***

Candidate of Biological Sciences, Leading  
Researcher, Laboratory of Chemoecology,  
Department of Radiation and Chemical Biology,  
A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern  
Seas of RAS, Sevastopol, Russia.

**ПУТЕВОДИТЕЛЬ ПО ОСОБО ОХРАНЯЕМЫМ ПРИРОДНЫМ ТЕРРИТОРИЯМ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**© 2026. *Р. В. Кишкань, А. В. Шебалков*

Исторические регионы России начинают работу по восстановлению экономики и природной среды, пострадавших вследствие украинской вооруженной агрессии. Одними из возможных новых подходов к развитию территории могут стать познавательный и экологический туризм, опирающийся на возможности посещения особо охраняемых природных территорий (ООПТ) края. С целью повешения информированности и экологического сознания населения, осведомленности о ценности природных объектов, которые необходимо сберечь для будущих поколений, повышения низкой экологической культуры жителей, которая наносит иногда непоправимый ущерб природным объектам при неорганизованном посещении ООПТ, предлагается организовать системный подход для туристических посещений природных объектов, основой которого может послужить разработка путеводителя по ООПТ региона.

**Ключевые слова:** исторические регионы, особо охраняемые природные территории, заказник, редкие виды флоры и фауны.

**Введение.** Сегодня, когда Донбасс стал частью большой страны, крайне важно усилить его популяризацию как части южной России, имеющей своеобразные природные особенности. Как воспринимается наша донбасская земля в представлениях среднестатистического жителя России? В лучшем случае как «сердце России» начала 1920-х, как родина стахановского движения и индустриальных достижений первых пятилеток. А то, что это своеобразная природная зона, часть степного пространства от Венгрии до Алтая, мало кто вспоминает. Более того, на эти уникальные природные территории накладываются не менее удивительные исторические события, от времен геологической истории до времен казачьей вольницы Земель Войска Донского.

Сломать ложный стереотип перегруженного промышленностью региона, где можно увидеть только шахтные копры, терриконы да дымящие трубы – сегодня важная задача начинающей восстанавливаться после военных событий территории. Более того, мы живем во времена, когда патриотическое воспитание молодого поколения выходит на приоритетные рубежи государственной политики, а кто может представить себе патриота, не любящего и не ценящего природу родного края и ее историю?

Поднять значимость природно-исторического ландшафта ДНР, сделать доступной информацию о наиболее ценных природных территориях Республики, дополнить ее историческими событиями, происходившими на них, и прославившими эту землю личностями – такая задача стоит перед разработчиками Путеводителя по особо охраняемым территориям Донецкой Народной Республики, проекту, выполняемому в рамках полученного гранта Президентского фонда природы.

**Уникальные природные объекты.** История и география, археология и палеонтология, судьбы героев и художников, писателей и путешественников, красоты природы круто замешаны в Донбассе, делая этот край ярким и необычайным, притягивающим внимание и манящим своими загадками.

Совершенно очевидно, что одним из направлений развития экономики Республики может стать познавательный туризм. В Республике мы имеем почти 200 особо охраняемых природных территорий с уникальными ландшафтами, редкими и

эндемичными видами флоры и фауны, которые, в то же время, располагают удивительными историческими чертами и колоритными этнокультурными особенностями. Заповедник, природные парки и другие объекты особо охраняемых природных территорий Донбасса – отличная основа для создания и развития туристической сети, а формирование на их основе многофункциональных объектов, которые демонстрируют комплекс природных, краеведческих, этнографических, исторических и культурных аспектов, повлечет за собой интерес жителей и поспособствует появлению бизнес-инициатив и инвестиционных решений, связанных с необходимостью обеспечения питания, поселения туристических групп, а также поможет развитию местных ремесел и производству сувениров.

Приведем несколько примеров, доказывающих, что именно такой путь развития возможен для территории нашего региона и будем надеяться, что разрабатываемый путеводитель станет реальной помощью для организации интересных и познавательных туристических маршрутов.

Начнем с заповедного урочища «Васильевка», которое располагается у одноименного поселка на юг от Донецка (рис. 1). В данном случае, чтобы понять необычайность этого объекта, нужно вернуться на 360 миллионов лет назад в девонский период. В позднем девоне, фаменский ярус, материковая плита, которую мы сегодня называем Восточно-Европейской платформой, под действием тектонических сил раскололась. Образовавшуюся трещину в течение миллионов лет развело на несколько сотен километров, после чего мантийная конвекция ослабла и процесс замер. Если бы этого не произошло, то в районе современной Васильевки мог зародиться новый океан. Такой "неродившийся" океан геологи называют континентальным рифтом.



Рис. 1. Заповедное урочище «Васильевка»

Тем не менее, трещина тогда здесь была настолько глубокой, что на поверхность в больших количествах изливались вулканические лавы и выбрасывался вулканический пепел с образованием впоследствии базальтов и андезитов, которыми сегодня сложены скальные выходы заповедного урочища [4, 7].

Но не только этим славится заповедное урочище, на задернованных склонах вулканических пород произрастают редкие виды флоры. Здесь можно встретить краснокнижный тюльпан змеелистный, несколько видов ковылей, доледниковый реликт – эфедру двухколосковую и узкоареальный донецкий эндемик – аистник Бекетова [8]. У подножья базальтовых холмов вдоль реки Кальмиус видны следы проведенных здесь раскопок, результатами которых стали найденные учеными артефакты бронзового века и средневековья. На склоне холмов в сторону трассы на Новоазовск сохранились остатки фундаментов культового сооружения, которое простояло на этом месте до середины 1970-х годов, но было уничтожено в ходе богоборческих мероприятий людьми, не ценящими историю своего края. По разным версиям это был то ли купольный христианский храм, то ли караван-сарай на одной из веток шелкового пути – сегодня наверняка определить трудно. Нет сомнений, что все эти природные и исторические достопримечательности урочища мало знакомы не только жителям городов Донбасса, но и жителям близ расположенных поселков. А ведь их история тоже необычайна. К примеру, село Раздольное на противоположном берегу Кальмиуса появилось в конце XVIII столетия как одно из мест переселения греков из Крыма. До сегодняшнего времени в августе можно попасть на национальный праздник панаир и увидеть курэш – национальную греческую борьбу [7]. А совсем рядом расположена еще одна особо охраняемая территория – геологический заказник «Раздольненский», где можно отыскать окаменелое дерево возрастом 365 миллионов лет в яшмовидных туфах вулканогенного происхождения, которое вполне может оказаться сохранившимися в вулканическом пепле остатками первых на Земле (в современном понимании) деревьев – археоптерисов. Этот древний вид растений был впервые исследован и описан российским палеоботаником И.Ф. Шмальгаузенем в 1894 году в вулканогенно-осадочных отложениях Южного Донбасса именно в районе п. Раздольное (тогда Большая Каракуба). Шмальгаузен описал два вида Археоптерисов *Arhaeopteris archetypus Shmalh.* и *A. fissilis Shmalh.*, а также плауновидное растение, названное им *Lepidodendron karakubensis Shmalh.*

Позже здесь работал советский палеоботаник М. Д. Залесский, который исследовал и описал у п. Раздольное окаменевшую древесину Археоптериса, названную им *Callixylon*. Археоптерисы обладали свойствами, не присущими ни одному из ныне живущих деревьев. По сути, это было промежуточное звено между папоротниками и голосеменными (в частности, хвойными) растениями, которое навсегда исчезло с лица земли в самом начале каменноугольного периода [5]. Ну чем не объект для посещения любознательными туристами?

Природный заказник «Амвросиевский меловой изолят» является не менее интересным объектом и славится не только природными степными красотами, но и необычайной историей разных периодов существования (рис. 2). Это кластерный объект, расположенный на отложениях мелового периода в форме мелов и мергелей [3]. Поскольку Донбасс во все геологические периоды был материковой окраиной, которые периодически заливались водами трансгрессий, то не удивительно, что Амвросиевский район ДНР в течение 30 млн. лет являлся морским мелководьем, на дне которого и образовались заметные отложения кальций содержащих останков морской фауны, отпечатки которых и сегодня можно найти на склонах меловых холмов.



Рис. 2. Природный заказник «Амвросиевский меловой изолят»

Слово «изолят» в названии заказника неслучайно. Меловые отложения окружены осадочными породами других геологических периодов – каменноугольного и кайнозойского, в силу чего его флора имеет свои особенности, несколько отличные от флоры окружающей территории. Это, преимущественно, мелолюбивые растения, в том числе редкие, такие, как полынь беловойлочная, оноса донская, молочай мелолюбивый, эремурус представительный, тимьян меловой. На территории заказника и входящего в него памятника природы «Балка Горькая» и прилегающих обследованных территорий находятся 209 видов сосудистых растений. Среди них более 15 видов, включенных в Красную книгу. Данные участки являются местом обитания более 10 видов беспозвоночных животных, включенных в Красную книгу. Флористический состав урочища «Пристенское» – части заказника – и прилегающих обследованных территорий составляет более 400 видов сосудистых растений, из них более 40 включены в Красную книгу [8].

Природный заказник «Балка Казенная», входящий в систему кластера, является также уникальным археологическим объектом с обнаруженной стоянкой первобытного человека и местом загонной охоты на зубров. Здесь был обнаружен уникальный палеолитический артефакт – ашэльское рубило, свидетельство того, что земли донечины были заселены как минимум 100 тыс. лет назад. Не следует также забывать, что эта территория входила в состав земель Войска Донского.

«Помню себя в имении Ольгино в Амвросиевске, Области войска Донского. В комнате пахнет персиками, разложенными по всему полу большой комнаты с выходом в сад. Помню охрану из донских казаков» [9]. Это цитата из мемуаров автора гимна России Сергея Михалкова. Кстати, рядом с Казенной балкой располагался кирпичный

завод предков Михалковых и до сих пор стоят развалины усадебного дома Михалковых, который упоминается в мемуарах поэта.

По мнению автора, рассматривать особенности конкретного природного объекта в принципе не эффективно, не привязывая их к событиям прошлого, историческому контексту, ибо как говорил Николай Михайлович Карамзин – «Настоящее бывает следствием прошедшего. Чтобы судить о первом, надлежит вспомнить последнее; одно другим, так сказать, дополняется и в связи представляется мыслям яснее» [2].

Поселок Ольховатка известен с 1720 года, здесь в древние времена проходила Кальмиусская сакма – путь из Крыма в Московию, здесь до сих пор существует община старообрядцев, храм, построенный Ильей Дебальцовым (в честь него назван героический город Дебальцево, и там же расположен уникальный природный объект – балка Скелевая (рис. 3) с ландшафтом удивительной красоты, рощей вековой ольхи вдоль водотока и самой чистой в Республике ключевой водой.



Рис. 3. Ландшафтный заказник «Балка Скелевая»

Это место буквально пропитано историей родной земли, которую, конечно же, нужно знать. За усердие, проявленное в ходе подавления Пугачевского восстания, Екатерина Великая наделила ранговой дачей в 6 000 десятин коллежского асессора Илью Дебальцова. Так в 1782 году рядом с Ольховаткой появилась деревенька Ильинка. Между Ильинкой и Ольховаткой, в 20 км от Енакиево, бежит небольшая речушка Булавин, которая хранит память о Кондратии Булавине, атамане Войска Донского, поднявшего в 1707–1708 годах восстание против царского произвола Петра Первого. Мало кто знает, что Александр Куприн одно время работал на Енакиевском метзаводе. В этот период появился его рассказ «На реке», в котором описана наша

речка Булавин. Герой рассказа Емельян передает легенду о том, как в этих краях был пойман и казнен Кондратий Булавин, предводитель народного восстания в петровские времена. Чуть позже община старообрядцев, спасаясь от петровых церковных реформ, в начале XVIII столетия основала на свободных землях поселок Ольховатка. Остатки этой общины, старообрядческий Покровский храм сохранились до наших дней [6].

Если приближаться к Скелевой с севера, то степная равнина обрывается вдруг отвесной стеной вниз, где, следуя формам рельефа, течет малая речушка в низинах среди ольхи и ясеня. Это на крутом правом склоне балки обнажается отвесная стена из серо-желтого песчаника, сразу под которой стоят могучие и коренастые стволы дубов. Степь и байрачные леса господствуют вокруг.

Балка Скелевая является ландшафтным заказником (рис. 3), т.е. имеющим комплексное целевое назначение. Во флористическом списке содержится 571 вид, встречаются редкие растения, такие как шафран сетчатый, папоротник-костенец северный, ковыль Граффа, ковыль Лессинга, прострел чернеющий, тюльпан змеелистный, кизильник черноплодный. Десять видов растений, произрастающих в балке, занесены в Красную книгу, два вида растений занесены в международную Красную книгу [1].

**Заключение.** В 2025–2027 годах один из авторов статьи Р.В. Кишкань реализует проект на средства гранта Президентского фонда природы. Идея проекта заключается в создании путеводителя по особо охраняемым природным территориям (ООПТ) Донецкой Народной Республики с целью стимулирования экологического туризма (как индивидуального, так и группового с экскурсоводом), информирования и просвещения жителей Республики и гостей Донбасса о природных богатствах края, уникальных ландшафтах и редких видах флоры и фауны, экскурсионных туров для школьников, воспитания патриотов Отечества (патриот не может не любить свою землю, а любить ее можно только, если хорошо узнаешь). Будут рассмотрены как региональные объекты ООПТ, так и те, которые перешли на федеральный уровень. В подготовленных материалах информация о природных красотах будет совмещена с русскими историческими корнями рассматриваемых объектов, ролью донского казачества в освоении территорий, их геологической историей, этнокультурными особенностями края.

В ходе реализации проекта будет разработан и запущен специальный сайт со своим доменным именем и гарантированным хостингом на платформе Word Press, на котором будут представлены фото и видеоматериалы, смысловая текстовая часть об объектах ООПТ, рекомендуемых к посещению, а также информацию о том, как добраться до конкретного объекта. На сайте будут размещены как уже имеющиеся в коллекции авторов фото и видеоматериалы, так и новые, полученные в ходе реализации проекта).

В дополнение к электронной версии путеводителя будет разработан и опубликован бумажный вариант в виде книги.

Проект направлен на повышение информированности и экологического сознания населения, осведомленности о ценности природных объектов, которые необходимо сберечь для будущих поколений. Проблемой является низкая экологическая культура жителей, которая наносит иногда непоправимый ущерб природным объектам при неорганизованном посещении ООПТ. Решением проблемы является распространение информационных материалов и упорядочение режима посещения объектов через организацию в перспективе привлекательных туристических маршрутов. Существенную помощь в этом может оказать Министерство природных ресурсов и экологии ДНР, координирующая работу ООПТ регионального и местного значения.

Территория, на которой будет реализован проект, представляет собой участки степной экосистемы с байрачными лесами вдоль рек и водотоков, окруженные

многочисленными населенными пунктами и подвергающиеся значительной антропогенной нагрузке, которая оказывает неблагоприятное влияние на биоразнообразие региона. На сегодня рассматривается вопрос о включении в Красную книгу ДНР 715 видов флоры и фауны для сохранения природного наследия. Известны также примеры исчезновения некоторых редких видов с территории ДНР, например, сурок или ушастый ёж.

Существует также устойчивый ложный стереотип восприятия территории Донбасса внешними наблюдателями как грязной, избыточно индустриализованной и неинтересной для посещения территории, где кроме труб заводов и терриконов увидеть ничего не возможно. Наш проект направлен на разрушение этого стереотипа.

*Работа выполнена в рамках средств гранта Президентского фонда природы, проект ЭКО-25-2-001367.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донбасс заповедный: научно-информационный справочник-атлас. – Донецк, 2003. – 160 с.
2. Карамзин Н.М. Записка о древней и новой России в ее политическом и гражданском отношениях. – Москва: Наука, 1991. – 125 с.
3. Кишкань Р.В. Амвросиевский меловой изолят [Электронный ресурс]. – URL: <https://dongeosociety.ru/melovoy-isolyat/> (дата обращения: 08.01.2026).
4. Кишкань Р.В. и др. Странствующие земли. Очень древняя история Донбасса. – Донецк, 2008. – 69 с.
5. Кишкань Р.В. Мокрая Волноваха хранит древние тайны [Электронный ресурс]. – URL: <https://dongeosociety.ru/mokraya-volnovakha/> (дата обращения: 08.01.2026).
6. Кишкань Р.В. Ольховатский сценарий [Электронный ресурс]. – URL: <https://dongeosociety.ru/olkhovatskiy-scenariy/> (дата обращения: 08.01.2026).
7. Неизведанный Донбасс – Земля предков / Иллюстрированный альбом под ред. Р.В. Кишканя. – Ростов-на-Дону: «Альтаир», 2023. – 148 с.
8. Природно-заповедный фонд ДНР / Интерактивная карта [Электронный ресурс]. – URL: <https://gkecopoldnr.ru/nrf-dpr> (дата обращения: 08.01.2026).
9. Михалков С.. Я был советским писателем. Приметы времени [Электронный ресурс]. – URL: [https://militera.lib.ru/memo/russian/mihalkovy\\_sv\\_mv/01.html](https://militera.lib.ru/memo/russian/mihalkovy_sv_mv/01.html) (дата обращения: 08.01.2026).

### REFERENCES

1. Donbass Nature Reserve: Scientific and Informational Handbook-Atlas. – Donetsk, 2003. – 160 p.
2. Karamzin N.M. A Note on Ancient and Modern Russia in Its Political and Civil Relations. – Moscow: Nauka, 1991. – 125 p.
3. Kishkan R.V. Amvrosievsky Chalk Isolate [Electronic resource]. – URL: <https://dongeosociety.ru/melovoy-isolyat/> (accessed on 08.01.2026).
4. Kishkan R.V. et al. - Wandering Lands. The Very Ancient History of Donbas. Donetsk, 2008, 69 p.
5. Kishkan R.V. Wet Volnovakha Keeps Ancient Secrets [Electronic resource]. – URL: <https://dongeosociety.ru/mokraya-volnovakha/> (accessed on 08.01.2026).
6. Kishkan R.V. Olkhovatsky Scenario [Electronic resource]. – URL: <https://dongeosociety.ru/olkhovatskiy-scenariy/> (accessed on 08.01.2026).
7. The Unexplored Donbass: The Land of Our Ancestors / Illustrated Album edited by R.V. Kishkan. – Rostov-on-Don: «Altair», 2023. – 148 p.
8. Natural Reserve Fund of the DPR / Interactive Map [Electronic resource]. – URL: <https://gkecopoldnr.ru/nrf-dpr> (accessed on 08.01.2026).
9. Mikhalkov S. I Was a Soviet Writer. Signs of the Times [Electronic resource]. – URL: [https://militera.lib.ru/memo/russian/mihalkovy\\_sv\\_mv/01.html](https://militera.lib.ru/memo/russian/mihalkovy_sv_mv/01.html) (accessed on 08.01.2026).

**GUIDE TO THE SPECIALLY PROTECTED NATURAL AREAS  
OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC**

*R. V. Kishkan, A. V. Shebalkov*

The historical regions of Russia are beginning work to restore the economy and the natural environment affected by the Ukrainian armed aggression. One of the possible new approaches to the development of the territory may be educational and ecological tourism, based on the possibility of visiting specially protected natural areas (protected areas) of the region. In order to raise public awareness and environmental consciousness, to make people aware of the value of natural objects that need to be preserved for future generations, and to improve the low level of environmental culture among residents, which sometimes causes irreparable damage to natural objects during unorganized visits to protected areas, it is proposed to organize a systematic approach for tourist visits to natural objects, which can be based on the development of a guidebook for the region's protected areas.

**Keywords:** historical regions, specially protected natural areas, nature reserves, rare species of flora and fauna.

*Поступила в редакцию 17.04.2026 г.*

***Кишкань Роман Владимирович***

директор филиала «Южный» Всероссийского научно-исследовательского института охраны окружающей среды (ВНИИ «Экология»), г. Донецк, РФ.

E-mail: r.kishkan@vniiecolology.ru

ORCID: 0009-0000-2255-5531

SPIN-код: 3050-3564

***Kishkan Roman V.***

Director of the Southern Branch of the All-Russian Research Institute of Environmental Protection (VNI Ecology), Donetsk, RF.

***Шебалков Алексей Викторович***

Министр природных ресурсов и экологии Донецкой Народной Республики,

г. Донецк, ДНР, РФ.

E-mail: aleksei.shebalkov78@yandex.ru

***Shebalkov Alexey V.***

Minister of Natural Resources and Ecology of the Donetsk People's Republic, Donetsk, RF.

**КОНЦЕНТРАЦИЯ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЧЕРНОЕ МОРЕ) В ДОАВАРИЙНЫЙ ПЕРИОД**

© 2026. *О. А. Миронов, Е. А. Тихонова*

В статье приведена оценка уровней нефтяного загрязнения прибрежной акватории Крымского полуострова в 129 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (осень 2023 г), полученная до аварии танкеров «Волгонефть – 212 и 239» в декабре 2024 г, что позволяет обозначить имевшийся «углеводородный фон», учитывать который необходимо для достоверных оценок последствий техногенной катастрофы. Для анализа применялся метод инфракрасной спектроскопии, являющийся арбитражным при оценке нефтяного загрязнения. Отмечено, что в пробах морской воды, отобранных с поверхностного горизонта, наблюдался существенный разброс концентрации НУ: от 0,002 до 0,159 мг/л (ПДК – 0,05 мг/л). Установлено, что акватория Южного берега Крыма, за исключением некоторых районов являлась на момент исследования достаточно чистой.

**Ключевые слова:** поверхностные воды, нефтяные углеводороды, прибрежная акватория, Черное море, Крымский полуостров.

**Введение.** Проблема загрязнения морских акваторий нефтью и нефтепродуктами остаётся крайне актуальной, особенно для побережья Крыма. За последнее десятилетие экономическая активность в приморских регионах привела к значительному увеличению уровня загрязнения вод Чёрного и Азовского морей, однако меры по охране окружающей среды не претерпели существенных улучшений. Особенно остро этот вопрос стоит на Южном берегу Крыма, где расположены заповедники и заказники, и ведётся постоянная работа по сохранению их экологического состояния.

В последние годы наблюдается изменение источников загрязнения: на первое место выходят хозяйственно-бытовые стоки, которые часто не проходят должной очистки и сбрасываются в прибрежные воды. Это связано с большим количеством городов и посёлков на побережье, где старые системы водопровода и канализации часто становятся причиной аварий. Например, в Ялте были зафиксированы случаи аварийных сбросов сточных вод [1].

По последним данным, с очистных сооружений от Алушты до мыса Сарыч в морскую воду ежегодно сбрасывается около 43 миллионов кубометров очищенных сточных вод, что приводит к выносу в среднем 2,4 тонн нефтепродуктов в год [2]. Это создаёт серьёзную угрозу для экосистемы и санитарно-биологического состояния прибрежных вод.

Однако для Чёрного моря основными источниками загрязнения являются транспортировка нефти танкерами и добыча углеводородов. Например, через Чёрное море ежегодно транспортируется более 100 миллионов тонн нефти, и эта цифра продолжает расти, что увеличивает риск аварийных разливов [3]. Примером такой катастрофы стал разлив мазута в ноябре 2007 года, когда произошло крушение судна «Волгонефть-139» в Керченском проливе. К сожалению, в декабре 2024 произошла еще одна крупная авария в этом же районе с танкерами «Волгонефть-239 и 212», отдаленные последствия которой еще предстоит оценить. Для этой оценки необходимо учитывать доаварийные уровни нефтяных углеводородов в исследуемых акваториях, чтобы учесть так называемый «углеводородный фон», который присутствует в морской воде в обычных (безаварийных условиях).

Таким образом, необходимо проводить мониторинг концентраций загрязняющих веществ и определять фоновые характеристики экосистем для сохранения биоразнообразия. Однако в последние годы исследования в этой области либо отсутствуют, либо носят локальный характер. Более ранние оценки загрязнения относятся к 1995 [4] и 2016 [5, 6] годам, что подчеркивает актуальность новых исследований.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы была оценка современных уровней нефтяного загрязнения морской воды прибрежной акватории Крыма, имеющей важное хозяйственное и рекреационное значение, а также провести сравнение полученных данных с более ранними результатами для выявления изменений в экологической обстановке исследуемого полигона и рассматривать полученные значения как «доаварийный фон» в связи с катастрофой танкеров «Волгонепфть» в Керченском проливе в декабре 2024 г.

Отбор проб морской воды проводился в рамках 129-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (ЦКП «НИС «Профессор Водяницкий») в осенний период 2023 г. батометром с поверхностного горизонта (рис. 1).

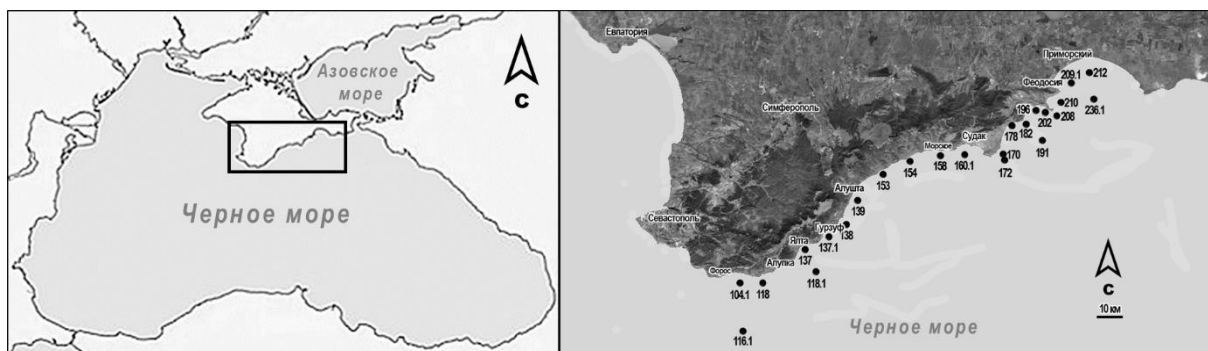


Рис. 1. Карта-схема отбора проб морской воды в прибрежной черноморской акватории Крымского полуострова (129-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», осень 2023 г.

**Методика исследований.** Предварительную пробоподготовку проводили непосредственно на борту судна согласно общепринятой методике [7]. Пробы морской воды с поверхностного горизонта отбирались батометром. В судовой лаборатории проводили трехкратную экстракцию нефтяных углеводородов из 2 л морской воды четыреххлористым углеродом ( $CCl_4$ ), экстракты обезвоживались сернокислым натрием ( $Na_2SO_4$ ), объединялись и пропускались через стеклянную колонку, заполненную окисью алюминия ( $Al_2O_3$ ) для отделения полярных соединений. Экстракты хранились в пробирках с притертыми пробками при температуре  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Измерение содержания нефтяных углеводородов (НУ) проводили в береговых условиях методом ИК-спектрии на фурье-спектрофотометре ФСМ-1201 в области спектра  $2700\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ . Использование спектрофотометра ФСМ-1201 позволяет достичь высокой чувствительности (предел обнаружения —  $0,01\text{ мг/дм}^3$ ) благодаря высокому соотношению сигнал/шум. Расчёт концентрации при выходе за границы калибровки выполняется программным обеспечением прибора. Визуализация полученных результатов проводилась в программном пакете Golden Software Surfer 11.

**Анализ результатов.** В пробах морской воды, отобранных с поверхностного горизонта, отмечен существенный разброс концентрации НУ: от  $0,002$  до  $0,159\text{ мг/л}$  (табл. 1). Однако если нижний предел меньше предельно допустимой концентрации (ПДК =  $0,05\text{ мг/л}$ ) [8] в 25 раз и соответствует показателям для практически чистой

воды (акватория Южного берега Крыма (ЮБК), вблизи Ласточкиного гнезда), то верхний показатель относится к загрязненным нефтепродуктами водам на уровне 3,2 ПДК.

Таблица 1

Концентрации нефтяных углеводородов (мг/л) в морской воде прибрежной черноморской акватории Крыма, осень 2023 г.

| № станции | Дата отбора | Концентрация НУ, мг/л | Район исследования (акватория) |
|-----------|-------------|-----------------------|--------------------------------|
| 104.1     | 05.10.2023  | 0,009                 | г. Алушка                      |
| 116.1     | 05.10.2023  | 0,014                 | пгт Симеиз                     |
| 118       | 06.10.2023  | 0,012                 | пгт Гаспра                     |
| 118.1     | 06.10.2023  | 0,002                 | Ласточкино гнездо              |
| 137       | 07.10.2023  | 0,040                 | Ялтинский залив                |
| 137.1     | 08.10.2023  | 0,008                 | пгт Гурзуф                     |
| 138       | 09.10.2023  | 0,012                 | пгт Партенит                   |
| 139       | 09.10.2023  | 0,006                 | с. Лазурное                    |
| 153       | 10.10.2023  | 0,010                 | г. Алушта                      |
| 154       | 10.10.2023  | 0,042                 | с. Рыбачье                     |
| 158       | 11.10.2023  | 0,008                 | с. Морское                     |
| 160.1     | 11.10.2023  | 0,051                 | г. Судак                       |
| 170       | 12.10.2023  | 0,006                 | м. Меганом                     |
| 172       | 12.10.2023  | 0,012                 | б. Бугаз                       |
| 178       | 13.10.2023  | 0,004                 | с. Прибрежное                  |
| 182       | 13.10.2023  | 0,159                 | пгт Курортное                  |
| 191       | 13.10.2023  | 0,123                 | пгт Курортное                  |
| 196       | 14.10.2023  | 0,121                 | Коктебельский залив            |
| 202       | 14.10.2023  | 0,059                 | Коктебельский залив            |
| 208       | 14.10.2023  | 0,087                 | Коктебельский залив            |
| 209.1     | 15.10.2023  | 0,040                 | Феодосийский залив             |
| 210       | 16.10.2023  | 0,058                 | б. Двужорная                   |
| 212       | 17.10.2023  | 0,058                 | Феодосийский залив             |
| 236.1     | 17.10.2023  | 0,060                 | Феодосийский залив             |

Концентрация НУ на уровне ПДК (0,51 мг/л) на ЮБК выявлена в районе небольшого курортного г. Судак, а содержание НУ близкое к ПДК (0,04 мг/л) отмечено в двух акваториях: Ялтинского залива, на побережье которого находится город-курорт Ялта и ялтинский порт и вблизи курортного посёлка Рыбачье между г. Алуштой и г. Судаком. На остальных станциях этого побережья их концентрации были минимальными и указывали на отсутствие нефтяного загрязнения.

По сравнению с результатами 1995 г. (53-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») [4] в настоящее время отмечено снижение концентрации НУ. По данным авторов показатели в поверхностном горизонте составляли от 0 до 0,20 мг/л, в 2016 г. (83-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») не превышали 0,131 мг/л [5], тогда как в настоящее время максимальные показатели составили 0,159 мг/л (акватория пгт. Курортное).

Максимальные концентрации НУ отмечены в следующих акваториях: пгт. Курортное (превышение ПДК в 2,5–3,2 раза); Коктебельский залив (в 1,2–2,4 раза); Феодосийский залив (в 1,2 раза, за исключением ст. 209.1) и Двужорная бухта в п. Орджоникидзе (в 1,2 раза) (рис. 2).

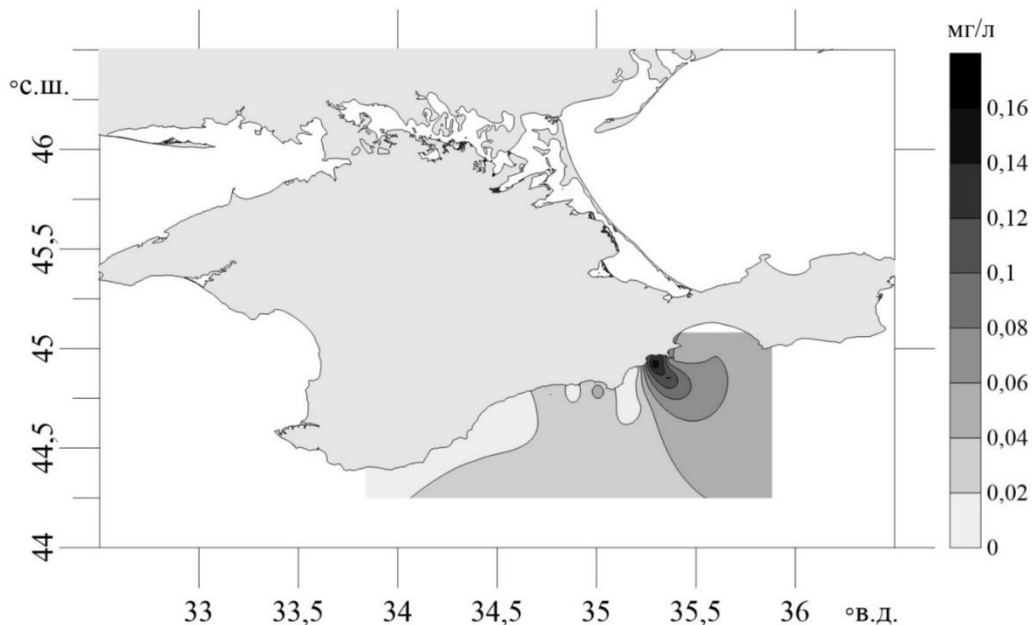


Рис. 2. Содержание нефтяных углеводородов (мг/л) в прибрежной акватории Крымского полуострова (129 рейс НИС «Профессор Водяницкий», осень 2023 г.)

Как видно из представленных данных, основное количество нефтяных углеводородов обнаруживалось в районе Коктебельского залива, превышения санитарных нормативов также обнаруживались и в Феодосийском заливе, при этом большая часть прибрежных акваторий южного берега Крыма была достаточно чистой.

**Выводы.** Таким образом, полученные результаты показали неоднородность распределения нефтяного загрязнения на различных участках прибрежной черноморской акватории. Концентрации НУ в морской воде соответствовали санитарным требованиям на большинстве станций (63 %). При этом превышение ПДК на некоторых станциях соответствовало портовым районам, а также связано с черноморскими течениями, перераспределяющими загрязняющие вещества по акватории. По сравнению с данными 1995 г. отмечено снижение уровня нефтяного загрязнения побережья Крыма, а с данными 2016 г. – небольшое увеличение показателей. Поскольку на отдельных участках исследуемой акватории концентрации НУ в настоящее время превышают ПДК, то увеличение рекреационной нагрузки на побережье может вызвать дополнительное загрязнение поверхностных вод. Поэтому контроль содержания НУ в прибрежных акваториях необходимо проводить регулярно. Представленные результаты можно использовать в качестве «фоновых» для Крымского побережья при оценке последствий разлива нефтепродуктов в результате аварии танкеров «Волгонепть» в Керченском проливе в декабре 2024 г.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ФИЦ ИнБЮМ № 124030100127-7 «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Риа Новости Крым». На южном берегу Крыма запрещено купание из-за аварии на коллекторе [Электронный ресурс]. – URL: <https://crimea.ria.ru/20240623/na-yuzhnom-beregu-kryma-zapreshcheno-kupanie-iz-za-avarii-na-kollektore-1138315321.html> (дата обращения: 29.05.2026).
2. Дёмина, А.П., Водопотребление и водоотведение в муниципальных образованиях республики Крым и г. Севастополе: современное состояние и проблемы / А.П. Дёмина, А.В. Зайцева, М.А. Харламова // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 4. – С. 395–406.
3. Заграничный, К.А. К вопросу об источниках и объемах поступления нефтяных компонентов в акваторию Черного моря / К.А. Заграничный // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 28 (1). – С. 80–92.
4. Щекатурина, Т.Л. Фоновые уровни загрязнения нефтепродуктами и бенз(а)пиреном шельфовой зоны Крыма (Черное море) / Т.Л. Щекатурина, Т.С. Осадчая, Л.В. Кривошеева // Экология моря. – 2002. – Вып. 59. – С. 80–84.
5. Соловьева, О.В. Загрязнение вод крымского побережья Черного и Азовского морей нефтяными углеводородами зимой 2016 года // О.В. Соловьева, Е.А. Тихонова, О.А. Миронов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2019. – № 1. – С. 13–18.
6. Мониторинг концентрации нефтяных углеводородов в прибрежных водах Крыма / О.В. Соловьева, Е.А. Тихонова, О.А. Миронов, Д.А. Захарченко // Вода: химия и экология. – 2018. – № 4(6). – С. 19–24.
7. Руководство по методам химического анализа морских вод / под ред. С.Г. Орадовского. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 208 с.
8. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 25.06.2025 № 296 «Об утверждении нормативов качества водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

## REFERENCES

1. Ria-News (2024) *Swimming is prohibited on the southern coast of Crimea due to an accident at the collector*. Retrieved from: <https://crimea.ria.ru/20240623/na-yuzhnom-beregu-kryma-zapreshcheno-kupanie-iz-za-avarii-na-kollektore-1138315321.html> (date of application: 29.05.2026). (In Russian).
2. Dyomina A., et al. (2022) Water consumption and sanitation in the municipalities of the Republic of Crimea and Sevastopol: current state and problems. *Water Resources*. 49(4), 395–406.
3. Zagranichnyi K. (2014) [On the issue of the sources and volumes of oil components entering the Black Sea]. *Inzhenernyi Vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*. 28 (1), 80–92. (In Russian).
4. Shekaturina T. et al. (2002) [Background levels of pollution by petroleum products and benz(a)pyrene in the Crimean shelf zone (Black Sea)]. *Ekologiya morya – Sea Ecology*. 59, 80–84. (In Russian).
5. Soloveva O. et al. (2019) [Pollution of the waters of the Crimean coast of the Black and Azov Seas by petroleum hydrocarbons in the winter of 2016]. *Izvesiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1, 13–18. (In Russian).
6. Soloveva O. et al. (2018) [Monitoring of the concentration of petroleum hydrocarbons in the coastal waters of Crimea] *Voda: khimiya i ekologiya – Water: chemistry and ecology*, 4(6), 19–24. (In Russian).
7. Oradovskiy S. (1977) *Guidelines on methods of chemical analysis of marine waters*. Leningrad: Gidrometeizdat, 208 p. (In Russian).
8. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 296 dated 06/25/2025 “On Approval of Quality Standards for water bodies of fisheries Significance, including standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the waters of water bodies of fisheries significance” (In Russian).

**OIL HYDROCARBONS CONCENTRATION IN THE COASTAL WATERS  
OF THE CRIMEAN PENINSULA (BLACK SEA) PRE-ACCIDENT PERIOD**

*O. A. Mironov, E. A. Tikhonova*

This article presents an assessment of oil pollution levels in the coastal waters of the Crimean Peninsula during 129th cruise of the research vessel “Professor Vodyanitsky” (autumn 2023), obtained prior to the accident involving the tankers “Volgoneft-212” and “Volgoneft- 239” in December 2024. This allows us to identify the existing hydrocarbon background, which must be taken into account for a reliable assessment of the consequences of the man-made disaster. Infrared spectrometry, a method of choice for assessing oil pollution,

was used for the analysis. Seawater samples collected from the surface horizon showed significant variations in hydrocarbon concentrations: from 0,002 to 0,159 mg/l (maximum permissible concentration is 0.05 mg/l). It was established that the waters of the southern coast of Crimea, with the exception of some areas, were relatively clean at the time of the study.

**Keywords:** surface water, oil hydrocarbons, coastal waters, Black Sea, Crimean Peninsula.

*Поступила в редакцию 11.05.2026 г.*

***Миронов Олег Андреевич***

кандидат биологических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории  
хемозологии, ФИЦ «Институт биологии южных  
морей им. А. О. Ковалевского РАН»,  
г. Севастополь, РФ.  
E-mail: mironov\_oa@ibss-ras.ru  
ORCID: 0000-0003-2083-3221  
SPIN-code: 6010-2682

***Mironov Oleg Andreevich***

Candidate of Biological Sciences,  
senior researcher, chemo-ecology laboratory,  
FRC “A. O. Kovalevsky Institute of  
Biology of the Southern Seas”,  
Sevastopol, Russia.

***Тихонова Елена Андреевна***

кандидат биологических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
хемозологии, ФИЦ «Институт биологии южных  
морей им. А. О. Ковалевского РАН»,  
г. Севастополь, РФ.  
E-mail: tikhonova\_ea@ibss-ras.ru  
ORCID 0000-0002-9137-087X  
SPIN-code: 3786-7334

***Tikhonova Elena Andreevna***

Candidate of Biological Sciences,  
leading researcher, chemo-ecology laboratory,  
FRC “A. O. Kovalevsky Institute of  
Biology of the Southern Seas”,  
Sevastopol, Russia.

## ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ ПОСЛЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

© 2026. Д. Д. Мороз, Т. И. Станишевская

Статья посвящена исследованию изменений показателей микроциркуляции крови у студентов 17–19 лет под влиянием физических нагрузок. Экспериментальное исследование включало изучение функционального состояния микроциркуляции крови с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). При интенсивных физических нагрузках наблюдалось значительное увеличение показателей состояния микроциркуляции крови. Динамика показателей микроциркуляции крови показывает, что под влиянием физических нагрузок у человека создаются значительные функциональные резервы для перераспределения тока крови и для улучшения внутриорганного капиллярного кровотока. Морфо-функциональные перестройки сердечно-сосудистой системы человека формируются несколькими компонентами микроциркуляции крови: кровотоком в транспортном направлении, регулирующим кровоснабжение в соответствии с потребностями тканей и обменным компонентом гистохимического барьера.

**Ключевые слова:** сердечно-сосудистая система; микроциркуляция крови; лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ); физические нагрузки.

**Введение.** Многочисленные научные работы, опубликованные в последнее десятилетие [1, 2], неопровержимо доказывают, что периферическое кровоснабжение является ключевым фактором, обеспечивающим полноценную работу внутренних органов и систем, а также нормальное функционирование клеток и тканей организма. В связи с этим, изучение реактивности различных отделов системы микроциркуляции крови остается важной задачей. Однако, количество исследований в данной области пока недостаточно для формирования полного представления о динамике микроциркуляции крови у человека в различных физиологических состояниях, как в норме, так и при патологиях. В то же время, полученные результаты [3, 4] позволяют рассматривать микроваскулатуру как неотъемлемую часть сердечно-сосудистой системы, где происходят наиболее значимые процессы адаптации организма к различным воздействиям.

Особый интерес представляет изучение изменений микроциркуляции крови при мышечной активности и целенаправленных физических упражнениях [5, 6]. Микроциркуляция крови играет важную роль в эффективной адаптации организма к мышечным нагрузкам, обеспечивая транспорт кислорода, углекислого газа, молекул-субстратов окисления, гормонов и иммунных клеток. В процессе адаптации к физическим нагрузкам происходит перераспределение кровотока, как на уровне центральной гемодинамики, так и в микроциркуляторном русле, с характерным увеличением кровоснабжения скелетных мышц. При этом кровоток в органах пищеварения существенно снижается, в то время как кровоток в коже, как принято считать [7], остается практически неизменным. Однако выполнение интенсивных физических упражнений с участием больших мышечных групп приводит к повышению температуры тела, что, в свою очередь, требует увеличения микроциркуляции в коже для обеспечения терморегуляции. Можно предположить, что усиление микроциркуляторной перфузии в коже происходит пропорционально интенсивности нагрузки, и, следовательно, механизмы изменения микроциркуляции здесь

соответствуют общей стратегии мобилизации адаптивных возможностей организма при мышечной деятельности.

Таким образом, исследование микроциркуляции крови в коже представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет выявить тонкие механизмы, лежащие в основе адаптивных реакций организма на физические нагрузки различной интенсивности, и является актуальной задачей биологических исследований.

Анализируя мировые исследования особенностей микроциркуляции крови, можно отметить, что большинство работ посвящено изучению процессов кровотока при патологических состояниях. Такие ученые, как J. Duranteau, D. De Backer, K. Donadello, N. I. Shapiro, S. D. Hutchings, A. Rovas, M. Legrand, A. Harrois, C. Ince [8] рассматривают генетические особенности параметров микроциркуляторного русла для разработки эффективных методов лечения. Maurizio Cutolo и Vanessa Smith [9] проводят исследования по выявлению микрососудистых изменений при склерозе и других ревматических заболеваний. Среди зарубежных исследователей значительный вклад в изучение коронарной микроциркуляции внес William M. Chilian [10], в работах которого анализируются механизмы ишемии при отсутствии обструктивных заболеваний эпикардиальных артерий, а также разрабатываются подходы к диагностике коронарной микроваскулярной дисфункции. В лаборатории David X. Zhang [11] проводятся исследования механизмов регуляции сосудистой реактивности в норме и при заболеваниях.

В российской науке большой вклад в изучение физиологической микроциркуляции вносит коллектив под руководством П.В. Михайлова, А.В. Замышляева, Ю.Ю. Артеменко и А.В. Муравьева [2]. Их исследования направлены на изучение реактивной гиперемии у здоровых людей и лиц с артериальной гипертензией с помощью портативных лазерных анализаторов, что позволяет разрабатывать новые подходы к ранней диагностике сосудистых нарушений. Работы В.И. Козлова, Ф.Б. Литвина, О.А. Гуровой [12] посвящены обзору онтогенетических особенностей микроциркуляции крови. В работах этих ученых приведены индивидуально-типологические особенности капиллярного кровотока у детей, подростков и юношей, рассматривается динамика микроциркуляторного русла в процессе онтогенеза, изучаются резервные возможности кровотока при различных функциональных пробах.

Значительный интерес представляют работы Т.И. Власовой и Т.Д. Власовой [13] по обобщению современных методов исследования микрососудистого кровотока, позволяющие систематизировать подходы и техники, используемые в фундаментальной и клинической науке. А.А. Федорович [14] анализирует новые тренды в неинвазивной диагностике кожной микроциркуляции, что актуально для создания скрининговых методов оценки здоровья человека. Экспериментальные исследования О.В. Злобиной, С.С. Пахомий, А.Н. Иванова и соавторов [4] посвящены влиянию внешних факторов на регуляторные механизмы микроциркуляторного русла кожи с использованием метода лазерной доплеровской флоуметрии.

Отдельное направление представляют работы, изучающие особенности микроциркуляции в специальных и возрастных аспектах. В исследованиях Г.А. Просекина и В.Н. Ким [15] рассматриваются вопросы эндотелиальной дисфункции и расстройств микроциркуляции у юных спортсменов как проявления синдрома перенапряжения, что имеет важное значение для спортивной медицины. Н.Л. Цапаева и В.Г. Цапаев [1] акцентируют внимание на роли микроциркуляции как терминального компартмента сердечно-сосудистой системы, подчеркивая значение эндотелия и гликокаликса в регуляции тканевого обмена.

Таким образом, стоит подчеркнуть, что, несмотря на широкое применение исследований сердечно-сосудистой системы в клинической практике, особенно при изучении микроциркуляторного русла у людей с различными заболеваниями, существует существенный недостаток исследований, посвященных нормальным параметрам микроциркуляции крови у здоровых людей, особенно с учетом возрастных и половых различий, при проведении различных функциональных проб, а также для создания статистических данных об изменениях микроциркуляции крови у лиц, регулярно занимающихся интенсивными видами спорта.

Поэтому, цель нашего исследования – выявить индивидуально-типологические особенности микроциркуляции крови у молодых людей после физических нагрузок.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Выявить с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) основные типы ЛДФ-грамм и ритмичные составляющие колебаний тканевого кровотока у обследованных лиц.

2. Проследить динамику показателей микроциркуляции крови после физических нагрузок у студентов-добровольцев.

**Материалы и методы исследования.** Оценка микроциркуляции осуществлялась с применением лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Технология ЛДФ базируется на измерении перфузии тканей кровью путем анализа доплеровского сдвига частоты, с последующей регистрацией излучения, отраженного от движущихся элементов (эритроцитов). Изменчивая фракция отраженного сигнала детерминируется концентрацией эритроцитов в исследуемой зоне и их скоростью. В рамках настоящего исследования использовался высокоточный компьютерный лазерный доплеровский аппарат LAKK-0.1 (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва).

В эксперименте участвовали студенты-добровольцы факультета естественных наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мелитопольский государственный университет», юноши и девушки в возрасте от 17 до 19 лет. На момент обследования все участники были без признаков неврологических нарушений или соматических заболеваний. Все процедуры проводились в соответствии с нормами и принципами биомедицинской этики. Перед началом исследования каждый участник предоставил добровольное письменное согласие на участие и обработку персональных данных.

Разделение испытуемых по гендерному признаку не производилось. При этом при анализе различий в показателях микроциркуляции крови в данной возрастной группе существенных отклонений не обнаружено. Измерения проводились в сидячем положении. Специальный датчик помещался на ладонную сторону дистальной фаланги четвертого пальца на протяжении четырех минут. Регистрация ЛДФ-грамм осуществлялась в первой половине дня с 8 до 13 часов, в соответствии с методическими рекомендациями, изложенными в работе А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова «Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови» [16].

Одним из доступных и безопасных способов оценки реактивности микроциркуляторного русла является использование дозированной физической нагрузки. В ходе теста испытуемых просили выполнить 30 приседаний в удобном для них темпе. Регистрация показателей микроциркуляции крови выполнялась до начала пробы с физической нагрузкой и сразу после её завершения. Оценка функционального резерва и реактивности микроциркуляторной системы крови проводили на основе анализа интенсивности изменений тканевого кровотока в сравнении с исходными значениями.

Полученные результаты подвергались математической и статистической обработке с помощью программы Biostat 5.0. Для определения нормальности распределения данных применялся критерий Шапиро-Уилка и парный t-критерий Стьюдента. Первичная обработка таблиц и предварительные вычисления выполнялись при помощи стандартного программного обеспечения Microsoft Excel, которое также использовалось для анализа «нормальности выборки». Для количественных данных рассчитывались среднее арифметическое значение (M) и стандартная ошибка среднего (m), среднеквадратическое отклонение, а для качественных признаков – относительные частоты (в процентах).

**Анализ результатов.** У юношей и девушек в возрасте 17–19 лет, участвовавших в исследовании в качестве добровольцев, были зафиксированы три варианта ЛДФ-грамм, соотносимые с различными типами микроциркуляции (по классификации В.И. Козлова [12]).

Первый вариант – аperiodическая ЛДФ-грамма, отличительной чертой которой являются несистематичные колебания кровотока с заметной амплитудой и выраженными вазомоторными волнами. Данному варианту ЛДФ-граммы соответствовал мезоемический тип микроциркуляции, что указывает на уравновешенное состояние механизмов симпатической и парасимпатической регуляции тканевого кровообращения.

Второй вариант – монотонная ЛДФ-грамма характеризовалась значительной амплитудой показателя микроциркуляции. Этот тип соответствовал гиперемическому типу микроциркуляции, который проявлялся при усилении притока крови и был связан с расширением мелких сосудов, вызванным ослаблением симпатического влияния на регуляцию кровотока в тканях.

Третий вариант – монотонная ЛДФ-грамма с низким значением показателя микроциркуляции соответствовал гипоемическому типу микроциркуляции, отличительной чертой которого было уменьшение притока крови в микроциркуляторное русло и повышенный тонус мелких сосудов, возникающий из-за усиления симпатических нейрогенных воздействий.

В ходе проведения исследования было установлено, что до проведения физической нагрузки у студентов 17–19 лет параметр микроциркуляции крови (ПМ) в среднем составлял  $18,6 \pm 6,68$  перф. ед. (рис. 1, А).

После дозированной физической нагрузки (30 приседаний в произвольном темпе) параметр микроциркуляции крови увеличился на 6 % ( $p < 0,05$  согласно парного t-критерия Стьюдента) и составил  $19,8 \pm 6,83$  перф. ед. Увеличение показателя микроциркуляции после физической нагрузки объясняется увеличением скорости процесса микроциркуляции крови и вазомоторной активацией микрососудов (рис. 1, Б).

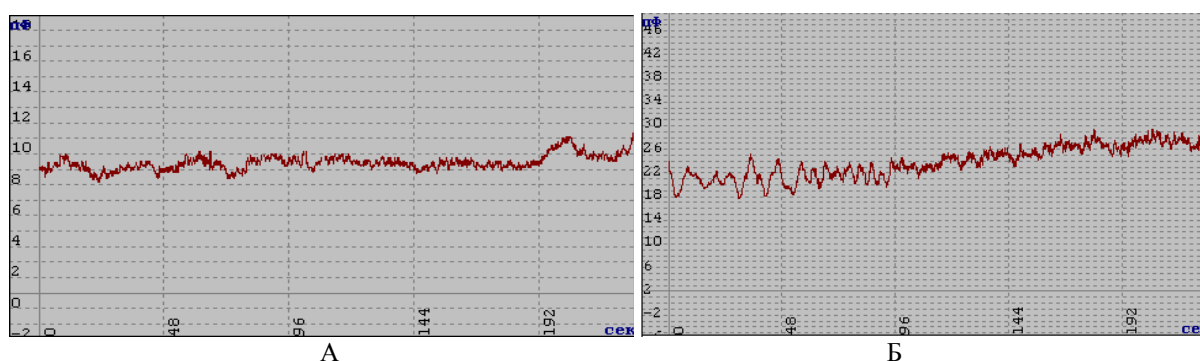


Рис. 1. ЛДФ-грамма исследуемого студента 18 лет: А – до физической нагрузки, Б – после физической нагрузки

Одним из ключевых параметров ЛДФ-граммы являлась величина среднеквадратичного отклонения (СКО), отражающая степень колебаний кровотока в тканях и, следовательно, функциональную вариативность микроциркуляторного русла. У студентов до выполнения физических упражнений СКО составляло  $1,8 \pm 0,85$  перф. ед., однако после приседаний отмечался значительный рост этого показателя до  $2,5 \pm 0,91$  перф. ед., что соответствует увеличению на 28% ( $p < 0,05$  согласно парного t-критерия Стьюдента). Подобное повышение обусловлено усилением активности регуляторных механизмов, контролирующих кровоснабжение тканей после физической активности. В процессе адаптации организма к нагрузке физические упражнения способствуют вовлечению резервных капилляров в кровоток, что влияет на вариабельность реакций микрососудов. Ряд исследователей [17, 18] связывают функциональную лабильность микроциркуляции при физических нагрузках с особенностями регуляции сердечно-сосудистой системы гипоталамусом.

Данные исследования свидетельствуют о значительном увеличении коэффициента вариации ( $\Delta f$ ) под воздействием физической нагрузки. Исходное значение  $\Delta f$  у студентов до нагрузки составляло  $7,2 \pm 2,83$ , а после выполнения приседаний показатель увеличился на 45 % ( $p < 0,05$  согласно парного t-критерия Стьюдента) и достиг  $13,2 \pm 5,53$ . Таким образом, установлено, что при физических нагрузках усиливается симпатическое влияние на микроциркуляцию крови.

Изменения параметров микроциркуляции в ответ на физическую нагрузку различались у обследованных студентов, имеющих разные типы микроциркуляции крови (табл. 1).

Таблица 1

Показатели микроциркуляции крови до и после физических нагрузок у студентов с разными типами микроциркуляции крови ( $M \pm m$ )

| Тип микроциркуляции крови              | ПМисх., перф. ед. | ПМфиз., перф. ед.  | СКО исх., перф. ед. | СКО физ., перф. ед. | $\Delta f$ исх., % | $\Delta f$ физ., % |
|--|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Мезоемический тип (I тип ЛДФ-граммы)   | $15,41 \pm 3,46$  | $18,87 \pm 0,39^*$ | $1,83 \pm 0,99$     | $3,21 \pm 1,11^*$   | $10,57 \pm 8,41$   | $16,88 \pm 4,11^*$ |
| Гиперемический тип (II тип ЛДФ-граммы) | $26,62 \pm 4,71$  | $30,47 \pm 0,48^*$ | $1,41 \pm 0,99$     | $2,23 \pm 1,63^*$   | $6,77 \pm 5,11$    | $11,97 \pm 2,41^*$ |
| Гипоемический тип (III тип ЛДФ-граммы) | $4,89 \pm 0,83$   | $7,82 \pm 0,29^*$  | $1,27 \pm 0,52$     | $2,11 \pm 0,85^*$   | $4,41 \pm 17,68$   | $10,59 \pm 1,22^*$ |

*Примечания: ПМисх. – исходное значение параметра микроциркуляции; ПМфиз. – значение показателя микроциркуляции крови после физической нагрузки; СКОисх. – исходное значение среднего квадратического отклонения, СКОфиз. – значение среднего квадратического отклонения после физической нагрузки;  $\Delta f$  исх. – исходное значение коэффициента вариации;  $\Delta f$  физ. – коэффициент вариации после физической нагрузки, \* - достоверно по сравнению с исходными данными,  $p < 0,05$  согласно парного t-критерия Стьюдента*

После выполнения упражнений наиболее заметные перемены происходят в спектральном анализе лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). У юношей и девушек в возрасте от 17 до 19 лет физическая активность приводит к подъему амплитуды низкочастотных VLF и LF-волн, а именно на 22 % и 24 % соответственно. Если до нагрузки средняя амплитуда VLF-колебаний составляла  $4,28 \pm 1,71$  перф. ед., то после нее –  $5,48 \pm 1,52$  перф. ед. Что касается LF-колебаний, то их амплитуда в среднем увеличилась с  $3,13 \pm 1,09$  перф. ед. до  $4,10 \pm 1,78$  перф. ед.

Также отмечается увеличение амплитуды высокочастотных HF и CF-колебаний, на 33 % и 29 % соответственно. В частности, амплитуда HF-колебаний увеличилась в среднем с  $1,03 \pm 0,34$  перф. ед. до  $1,53 \pm 0,48$  перф. ед., а амплитуда CF-колебаний – с  $0,37 \pm 0,15$  перф. ед. до  $0,52 \pm 0,14$  перф. ед.

Описанные изменения говорят об активации вазомоторных процессов, а также усилении пассивных дыхательных и пульсовых колебаний кровотока. Можно предположить, что реакция микроциркуляторного русла улучшается по мере формирования регуляторных механизмов как локального, так и центрального уровней.

В результате у исследуемых лиц при физических нагрузках наблюдается значительный подъем показателей микроциркуляции крови: увеличение параметра микроциркуляции на 6 %, среднего квадратического отклонения на 28 %, а также коэффициента вариации на 45 % относительно исходного значения. Подобная динамика параметров микроциркуляции демонстрирует, что под воздействием физических нагрузок в организме создаются существенные резервы для перераспределения кровотока и оптимизации внутриорганного капиллярного кровообращения. Данная реакция обусловлена несколькими компонентами микроциркуляции: кровотоком в направлении транспорта, регулирующим кровоснабжение в соответствии с потребностями тканей, и обменным компонентом гистогематического барьера.

Обнаруженные закономерности изменений в микроциркуляторном русле дают основания полагать, что физические нагрузки приводят не только к развитию «спортивного сердца», но и к формированию «спортивной сосудистой системы» [5, 6], которая наиболее ярко проявляется в типологических особенностях реакции микрососудов.

#### **Выводы.**

1. В результате анализа данных лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) у молодых людей выявлено три типа микроциркуляции крови: мезоемический тип, отличающийся комплексным наложением ритмических колебаний, что свидетельствует о сбалансированности процессов, регулирующих кровообращение в микроциркуляторном русле; гиперемический тип, характеризующийся равномерной осциллограммой ЛДФ с повышенным уровнем перфузии, что указывает на доминирующую роль метаболических факторов в регуляции микроциркуляции; гипоемический тип, отличающийся однородной осциллограммой ЛДФ с пониженным параметром перфузии, что отражает ослабление вазомоторных механизмов в регуляции микроциркуляции. У значительной части обследованных студентов чаще всего наблюдалась монотонная высокоамплитудная ЛДФ-грамма второго типа (48 %), идентифицированная как гиперемический тип микроциркуляции крови.

2. Согласно результатам ЛДФ-метрии, у обследованных студентов при выполнении интенсивных физических упражнений отмечается выраженное увеличение показателей микроциркуляции: параметр микроциркуляции возрастает на 6 %, среднее квадратическое отклонение увеличивается на 28 %, а коэффициент вариации увеличивается на 45 % относительно начальных значений. Подобная динамика параметров микроциркуляции свидетельствует о том, что под воздействием физических нагрузок в организме человека формируются значительные резервы для оптимизации перераспределения кровотока и улучшения капиллярного кровоснабжения органов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Цапаева, Н. Л. Микроциркуляция (часть 1—главные действующие «лица» и их роль в системе кровообращения) / Цапаева Н. Л., Цапаев В. Г. // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные

- риски. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 1903-1910. – DOI: 10.51922/2616-633X.2023.7.2.1903. – EDN: CMJXOZ.
2. Постокклюзионная реактивная гиперемия у лиц с артериальной гипертензией по данным портативного двухканального лазерного анализатора микроциркуляции крови / П.В. Михайлов, А.В. Замышляев, Ю.Ю. Артеменко, А.В. Муравьев // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 24, № 4(96). – С. 32-39. – DOI: 10.24884/1682-6655-2025-24-4-32-39. – EDN: EXZYEC.
  3. Horban, D. Changes of capillary blood flow during the local hyperemia // International independent scientific journal. – 2021. – No. 29. – P. 9-12. – EDN: OQVIGO.
  4. Реактивность стресс-реализующей системы в условиях изменения светового режима в эксперименте / О.В. Злобина, С.С. Пахомий, И.О. Бугаева и др. // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130, № 6. – С. 890-893. – DOI: 10.21883/OS.2022.06.52631.35-22. – EDN: PCNPRF.
  5. Бочарин, И. В. Мониторинг состояния гемодинамики студентов медицинского вуза в условиях тестирования физической нагрузки минимальной мощности / И.В. Бочарин, А.К. Мартусевич, М.С. Гурьянов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3(68). – С. 32-36. – EDN: WGFFYK.
  6. Артеменко, Ю.Ю. Адаптация системы микроциркуляции к мышечным нагрузкам разной интенсивности и длительности // Естественное образование: исследования и обучение. – 2019. – С. 13-18. – EDN: KJSDBE.
  7. Козлов, В.И. Развитие системы микроциркуляции. – Москва: РУДН, 2012. – 314 с. – EDN: QKUPVH.
  8. Duranteau, J. The future of intensive care: the study of the microcirculation will help to guide our therapies / J. Duranteau, D. De Backer, K. Donadello // Critical Care. – 2023. – No 27. – P. 190. – DOI: 10.1186/s13054-023-04474-x. – EDN: MULDDO.
  9. Cutolo, M. Detection of microvascular changes in systemic sclerosis and other rheumatic diseases / M. Cutolo, V. Smith // Nature reviews rheumatology. – 2021. – No 17. – P. 665-677. – DOI: 10.1038/s41584-021-00685-0. – EDN: BKWWKZ.
  10. A chronology of basic and clinical research in the coronary microcirculation / W.M. Chilian, T. Ahmed, C.N.B. Merz, Cet al. // Journal of Molecular and Cellular Cardiology. – 2025. – Т. 203. – С. 59-66. – DOI: 10.1016/j.yjmcc.2025.04.004. – EDN: SEVXTU.
  11. Prolonged endothelial-dysfunction in human arterioles following infection with SARS-CoV-2 / D.X. Zhang, Y. Nishijima, S.N. Hader et al. // Cardiovascular research. – 2022. – Vol. 118, No. 1. – P. 18-19. – DOI: 10.1093/cvr/cvab339. – EDN: НМКСГИ.
  12. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови / В.И. Козлов, Г.А. Азизов, О.А. Гурова, Ф.Б. Литвин. – Москва: РУДН ГИЦ лазерной медицины, 2012. – 32 с. – URL: <http://angiologia.ru/specialist/cathedra/recommendations/2012/001.pdf>.
  13. Власова, Т.И. Современные методы оценки микроциркуляции / Власова Т.И., Власов Т.Д. // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2024. – Т. 23, №. 4. – С. 5-21. – DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-5-21. – EDN: OFFBFB.
  14. Федорович, А.А. Новые тренды развития направления по неинвазивному исследованию микроциркуляции в коже человека. Описательный обзор // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2025. – Т. 24, №. 6. – С. 95-105. – EDN: XFFGNI.
  15. Просекин, Г.А. Дисфункция эндотелия и нарушение микроциркуляции у юных спортсменов как проявление синдрома перенапряжения: методы оценки и коррекция специализированными продуктами на основе апикомпонентов / Г.А. Просекин, В.Н. Ким // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 14-23. – DOI: 10.24884/1682-6655-2025-24-1-14-23. – EDN: AGECCN.
  16. Крупаткин, А.И. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – Москва: Изд-во «Медицина», 2005. – 254 с. – EDN: QLLPIZ.
  17. Мавлиев, Ф.А. Особенности микроциркуляции и факторы, её обуславливающие, у спортсменов, тренирующихся на выносливость // Наука и спорт: современные тенденции. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 100-107. – DOI: 10.36028/2308-8826-2019-7-3-100-107. – EDN: WQWOIY.
  18. Двурекова, Е.А. Влияние занятий фитнесом на функциональное состояние системы микроциркуляции // Медико-биологические и педагогические основы адаптации, спортивной деятельности и здорового образа жизни. – 2020. – С. 325-328. – EDN: TEWKDF.

## REFERENCES

1. Tsapaeva, N. L., & Tsapaev, V. G. (2023). Microcirculation (Part 1 – the main active «players» and their role in the circulatory system). *Emergency Cardiology and Cardiovascular Risks*, 7(2), 1903–1910. (In Russian).

2. Mikhailov, P. V., Zamyshlyayev, A. V., Artemenko, Yu. Yu., & Muravyev, A. V. (2025). Post-occlusive reactive hyperemia in patients with arterial hypertension according to a portable two-channel laser analyzer of blood microcirculation. *Regional Hemodynamics and Microcirculation*, 24(4), 32–39. (In Russian).
3. Horban, D. (2021). Changes of capillary blood flow during the local hyperemia. *International Independent Scientific Journal*, (29), 9–12.
4. Zlobina, O. V., Pakhomiya, S. S., Bugaeva, I. O., Ivanov, A. N., Moskvina, A. O., & Kostromina, E. M. (2022). Reactivity of the stress-realizing system under conditions of changing light regime in the experiment. *Optics and Spectroscopy*, 130(6), 890–893. (In Russian).
5. Bocharin, I. V., Martusevich, A. K., & Guryanov, M. S. (2021). Monitoring of hemodynamic status of medical university students under minimal power physical load testing. *Medical Almanac*, (3(68)), 32–36. (In Russian)
6. Artemenko, Yu. Yu. (2019). Adaptation of the microcirculation system to muscular loads of different intensity and duration. In *Natural Science: Research and Education* (pp. 13–18). (In Russian)
7. Kozlov, V. I. (2012). *Development of the microcirculation system*. Moscow: RUDN University. (In Russian)
8. Duranteau, J., De Backer, D., & Donadello, K. (2023). The future of intensive care: the study of the microcirculation will help to guide our therapies. *Critical Care*, 27(190). <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04474-x>
9. Cutolo, M., & Smith, V. (2021). Detection of microvascular changes in systemic sclerosis and other rheumatic diseases. *Nature Reviews Rheumatology*, 17, 665–677. <https://doi.org/10.1038/s41584-021-00685-0>
10. Chilian, W. M., Ahmed, T., Merz, C. N. B., Pepine, C. J., Domingo, C. N., & Mehta, P. K. (2025). A chronology of basic and clinical research in the coronary microcirculation. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 203, 59–66.
11. Zhang, D. X., Nishijima, Y., Hader, S. N., Hanson, A. J., Sparapani, R., Gutterman, D. D., & Beyer, A. M. (2022). Prolonged endothelial dysfunction in human arterioles following infection with SARS-CoV-2. *Cardiovascular Research*, 118(1), 18–19.
12. Kozlov, V. I., Azizov, G. A., Gurova, O. A., & Litvin, F. B. (2012). *Laser Doppler flowmetry in assessment of blood microcirculation state and disorders*. Moscow: RUDN University / State Research Center for Laser Medicine. (In Russian)
13. Vlasova, T. I., & Vlasov, T. D. (2024). Modern methods for evaluating microcirculation. *Regional Hemodynamics and Microcirculation*, 23(4), 5–21. (In Russian)
14. Fedorovich, A. A. (2025). New trends in the development of non-invasive skin microcirculation research: a descriptive review. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 24(6), 95–105. (In Russian)
15. Prosekin, G. A., & Kim, V. N. (2025). Endothelial dysfunction and microcirculation disorders in young athletes as a manifestation of overtraining syndrome: assessment methods and correction with special apicomponent-based products. *Regional Hemodynamics and Microcirculation*, 24(1), 14–23. (In Russian)
16. Krupatkin, A. I., & Sidorov, V. V. (2005). *Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation*. Moscow: Meditsina. (In Russian)
17. Mavliev, F. A. (2019). Features of microcirculation and its determinants in endurance-trained athletes. *Science and Sport: Current Trends*, 24(3), 100–107. <https://doi.org/10.36028/2308-8826-2019-7-3-100-107> (In Russian)
18. Dvurekova, E. A. (2020). Influence of fitness training on the functional state of the microcirculation system. In *Medical-biological and pedagogical foundations of adaptation, sports activity and healthy lifestyle* (pp. 325–328). (In Russian)

## DYNAMICS OF BLOOD MICROCIRCULATION INDICES FOLLOWING PHYSICAL EXERCISE

*D. D. Moroz, T. I. Stanishevskaya*

The article is devoted to the study of changes in blood microcirculation indices in 17–19-year-old students under the influence of physical exercise. The experimental study included assessment of the functional state of blood microcirculation using laser Doppler flowmetry (LDF). Under intense physical exercise, a significant increase in blood microcirculation indices was observed. The dynamics of blood microcirculation indices indicate that physical exercise creates significant functional reserves for the redistribution of blood flow and for the improvement of intra-organ capillary blood flow. Morphofunctional rearrangements of the human cardiovascular system are formed by several components of blood microcirculation: directed (conductive) blood

flow, which regulates blood supply according to tissue demands, and the exchange component of the histochemical barrier.

**Keywords:** cardiovascular system; blood microcirculation; laser Doppler flowmetry (LDF); physical exercise.

*Поступила в редакцию 04.05.2026 г.*

***Мороз Дарья Дмитриевна***

кандидат биологических наук, доцент кафедры  
здравоохранения и общественного здоровья,  
ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный  
университет», г. Мелитополь, Запорожская обл., РФ.  
E-mail: [d.moroz@melsu.ru](mailto:d.moroz@melsu.ru)  
ORCID: 0000-0002-3921-9232  
SPIN-код: 2090-6749

***Moroz Daria D.***

Candidate of Biological Sciences; Associate Professor  
of the Department of Health Care and Public Health,  
Melitopol State University», Melitopol, RF.

***Станишевская Татьяна Ивановна***

доктор биологических наук, профессор;  
профессор кафедры здравоохранения и  
общественного здоровья,  
ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный  
университет», г. Мелитополь, Запорожская обл., РФ;  
E-mail: [t.stanishevskaya@melsu.ru](mailto:t.stanishevskaya@melsu.ru)  
ORCID: 0000-0002-4012-7335  
SPIN-код: 2601-6177

***Stanishevskaya Tatiana I.***

Doctor of Biological Sciences, Professor;  
Professor of the Department of Health Care and Public  
Health, Melitopol State University, Melitopol, RF.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ТЕХНОГЕННО-ЗАСОЛЁННЫХ ПОЧВ  
СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ:  
ОБЗОР МЕТОДОВ И СОБСТВЕННЫЙ ОПЫТ**

© 2026. *М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбунник*

В статье представлена разработка и успешная реализация комплексной системы рекультивации техногенно-засоленных почв, основанной на тщательном анализе существующих методов рекультивации, а также отечественного и зарубежного опыта в области восстановления почв. Рекультивация была организована в три этапа: подготовительный, технический и биологический, каждый из которых включал определенные мероприятия для эффективного устранения засоления. На подготовительном этапе (2010–2011 гг.) была проведена установка системы дренажных канав, что способствовало вымыванию солей из почвы. Для дополнительного промывания использовалась методика формирования снежных валов, что позволило значительно снизить концентрацию хлорид-ионов к 2015 году. На техническом этапе (2011–2013 гг.) применялись гипсовые удобрения, а также механизированная обработка почвы, что способствовало улучшению ее структуры. Биологический этап (2013–2015 гг.) включал внесение семян солетолерантных растений, что способствовало восстановлению растительности на участке ЗУ–1 на уровне 90 %. Однако на участке ЗУ–2 восстановление растительности не произошло, что подчеркивает необходимость дальнейшей адаптации и доработки методов рекультивации для сильно загрязненных территорий. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенной системы рекультивации, что открывает перспективы для ее применения на других техногенно-засоленных участках.

**Ключевые слова:** загрязнение почв, рекультивация, техногенно-засоленные почвы, дренаж, гипсовые удобрения, солетолерантные растения.

**Введение.** Техногенное засоление почв является одной из самых актуальных и масштабных экологических проблем, затрагивающих большое количество территорий в России. Проблема засоления почв обусловлена воздействием различных антропогенных факторов, в первую очередь, загрязнением почвы нефтяными продуктами, химическими веществами, а также неправильным использованием природных ресурсов. В частности, в среднетаёжной подзоне Западной Сибири техногенные процессы, связанные с деятельностью нефтедобывающих компаний, приводят к накоплению солей в верхних горизонтах почвы, что существенно снижает её плодородие и ухудшает экологическое состояние территории.

Масштаб проблемы техногенного засоления почв в Западной Сибири требует комплексного подхода к исследованию и разработке методов восстановления. В настоящее время, существует дефицит нормативных актов и комплексных методик, направленных на решение проблемы засоления почв. Существующие государственные и региональные программы в основном ориентированы на регулирование водных экосистем и их защиты, тогда как вопрос засоления почв остаётся недостаточно проработанным на уровне законодательных актов и природоохранных мероприятий.

В исследовательской практике есть работы, которые рассматривают техногенное загрязнение почв и его последствия для экосистем Западной Сибири. Например, исследование Носовой М. В. [1] описывает влияние нефтесолевого загрязнения на почвы поймы реки Оби, где в результате воздействия нефтепродуктов и минерализованных вод произошло существенное ухудшение качества почв, что

потребовало применения комплексных методов рекультивации. Также работа Геннадиева А. Н. [2] подчеркивают важность мониторинга и разработки новых технологий очистки почв, чтобы предотвратить их деградацию, особенно в условиях техногенных загрязнений.

Одним из ключевых аспектов в решении проблемы является понимание процессов техногенного галогенеза – накопления хлоридов и других растворимых солей в почвах, что приводит к ухудшению их структуры. Работа Серединой В. П. и её коллег [3] показывает, что применение комплексных методов, включая внесение гипса и органических веществ, помогает существенно снизить концентрацию солей и восстановить почву.

Цель исследования – изучить особенности техногенного галогенеза в почвах среднетаёжной подзоны Западной Сибири и оценить эффективность различных методов рекультивации техногенно-засоленных почв, с акцентом на изменения концентрации хлорид-ионов в процессе восстановления.

**Материал и методы исследований.** Отбор почвенных проб для химического анализа является важнейшей процедурой при оценке степени техногенного засоления, а также для мониторинга эффективности рекультивационных мероприятий. Для получения объективных данных, пробы почвы на загрязнённом участке отбирались в несколько этапов: как во время проведения восстановительных работ, так и в процессе длительного мониторинга. Это позволяло отслеживать динамику изменения состояния почвы и оценить долгосрочную эффективность применённых мер.

Одним из ключевых этапов было использование метода объединённой пробы, которая состояла из 30 точечных проб (ГОСТ 17.4.3.01-2017 и ГОСТ 17.4.4.02-2017) Точечные пробы отбирались равномерно по всему исследуемому участку. Глубина отбора составляла 30 см, что охватывает корнеобитаемый слой почвы и является оптимальным для оценки состояния зоны, где протекает наиболее интенсивная биологическая активность.

Для подготовки проб и проведения анализа содержания легкорастворимых солей в водной вытяжке использовался ГОСТ 26423-85. Определение концентрации хлорид-ионов проводилось по ГОСТ 26425-85. Помимо хлорид-ионов в почве определялись нефтепродукты флуориметрическим методом (ПНД Ф 16.1:2.21–98).

Объектом исследования являлись почвы, загрязнённые минерализованными сеноманскими водами. Загрязнение произошло в результате аварийного отказа водовода высокого давления на водораздельной равнине левобережья реки Оби. Площадь загрязнённого участка составила 0,6 га (ЗУ–1). Возникновение очага загрязнения привело к накоплению солей в почве, что повлияло на её агрохимические свойства, снизив плодородие и нарушив экологическое равновесие. В дальнейшем данный участок послужил опытной площадкой, где были проведены рекультивационные работы. Рекультивационные мероприятия, реализованные на исследуемой площадке, включали совокупность приёмов, направленных на снижение засоленности, улучшение структуры почвы и восстановление растительного покрова. При этом использовались известные решения, адаптированные под локальные условия, включая регулирование поверхностного стока, внесение минеральных компонентов и использование солеустойчивых растений. Изучение этого участка позволило получить данные о процессе восстановления почвы после воздействия техногенных факторов (аварийных ситуация на водоводе) и выявить возможные пути её реабилитации. Контрольным объектом исследования послужил соседний участок (ЗУ–2) площадью 0,2 га, загрязнённый минерализованными жидкостями, где мероприятия по восстановлению почв не проводились (табл. 1).

## Объекты исследования

| Горизонт   | Глубина (см) | Описание горизонта   | Растительный покров   | Количество проб                |
|--|--------------|--|---|--------------------------------|
| ЗУ-1: Хемоземы техногенно-засоленные по подзолистой почве [4] ( <i>Chloridictechnic Salicotechnic Gleyic Podzol</i> [5]) |              |  |   |                                |
| OT <sub>s,x</sub>  | 0–7          | Тёмно-серый, структура – органо-минеральная, в основном аморфная, с наличием разложившихся растительных остатков. На поверхности почвы присутствуют белые кристаллы солей. | Берёза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth, 1788), осина обыкновенная ( <i>Populus tremula</i> L., 1753), ива белая ( <i>Salix alba</i> L., 1753), хвощ полевой ( <i>Equisetum arvense</i> L., 1753), мятлик луговой ( <i>Poa pratensis</i> L., 1753) | 510 точечных / 17 объединённых |
| EL <sub>s,x</sub>  | 7–30         | Светло-серый. Горизонт уплотнен, присутствуют белые выцветы солей.   | –   |                                |
| ЗУ-2: Хемоземы техногенно-засоленные по подзолистой почве [4] ( <i>Chloridictechnic Salicotechnic Gleyic Podzol</i> [5]) |              |  |   |                                |
| OT <sub>s,x</sub>  | 0–7          | Тёмно-серый, структура – органо-минеральная, в основном аморфная, с наличием разложившихся растительных остатков. На поверхности почвы присутствуют белые кристаллы солей. | Берёза повислая ( <i>B. pendula</i> ), осина обыкновенная ( <i>P. tremula</i> ), ива белая ( <i>S. alba</i> ), хвощ полевой ( <i>E. arvense</i> ), мятлик луговой ( <i>P. pratensis</i> )   | 330 точечных / 11 объединённых |
| EL <sub>s,x</sub>  | 7–30         | Светло-серый. Горизонт уплотнен, присутствуют белые выцветы солей.   | –   |                                |

Почвы обоих участков характеризуются высокой засоленностью, однако почва под номером 2 имеет более выраженную степень загрязненности минерализованными солями, что сказывается на растительном покрове и общем состоянии почвы. В условиях этих почв растительность ограничена в основном солеустойчивыми видами, и типичный для таких территорий растительный комплекс значительно изменён по сравнению с природными экосистемами региона.

С целью мониторинга динамики изменений почвы и оценки состояния экосистемы в постзагрязнённой зоне проводились регулярные химические (содержание хлорид-ионов и нефтепродуктов) и биологические анализы (восстановление проективного покрытия). Результаты этих исследований стали основой для разработки рекомендаций по улучшению состояния почвы и предотвращению дальнейшего ухудшения её качества.

**Результаты и обсуждение.** Рекультивация техногенно-засоленных почв является одной из важнейших задач в экологическом восстановлении земель, пострадавших от антропогенной деятельности. Засоление почв возникает в результате избыточного поступления солей, что приводит к ухудшению их физико-химических свойств и снижению плодородия. Для эффективной борьбы с этим явлением разработано множество методов, как традиционных, так и современных, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения. Перед разработкой собственной методики рекультивации почв был выполнен анализ существующих способов восстановления техногенно-засоленных почв. Далее кратко рассмотрим их.

Одним из самых распространённых методов является использование гипсования почвы. Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) вносится в почву с целью снижения концентрации натрия, который является одним из основных виновников засоления. Гипс помогает обменивать ионы натрия на кальций, что способствует улучшению структуры почвы и увеличению её водопроницаемости. Этот метод активно используется в странах с засушливыми климатическими условиями, например, в Австралии и США, где большие площади почв подверглись засолению в результате ирригации [6].

Другим популярным способом является применение различных сорбентов. К таким сорбентам относятся природные и искусственные цеолиты. Они имеют уникальную способность удерживать ионы, что способствует снижению концентрации солей в почве. На практике в ряде стран, таких как Турция и Египет, успешно применяют натрий цеолитовые препараты для восстановления почв, подвергшихся засолению в результате использования воды с высоким содержанием солей [7].

Биологический метод рекультивации также набирает популярность. Один из вариантов заключается в использовании различных видов растений, устойчивых к солям, таких как солеросы или астрагалы. Эти растения не только выживают в условиях засоления, но и могут способствовать снижению концентрации солей через корневую систему. Существуют примеры успешного восстановления засоленных земель в Израиле и в Казахстане, где активно используют такие растения для восстановления почв. Также применяются методы, связанные с улучшением почвенной микробиоты, например, с использованием микроорганизмов, способных расщеплять соли и уменьшать их содержание. Микробиологические препараты на основе штаммов *Azotobacter* или *Pseudomonas*, нашли широкое применение в сельском хозяйстве, например, в Индии и Южной Африке [8].

Физические методы рекультивации, такие как промывка почвы, включают в себя процессы вымывания солей с помощью воды. Однако такой метод требует значительных объёмов водных ресурсов и может быть экономически нецелесообразен в условиях ограниченных водных ресурсов, как это наблюдается в странах Ближнего Востока. Для снижения негативных последствий такого способа можно применять ультразвуковое воздействие, которое помогает улучшить структуру почвы и ускорить процесс вымывания солей, что подтверждается исследованиями в лабораториях и на полевых участках в Японии [9].

В последние десятилетия появились более высокотехнологичные методы, такие как электрофорез и электролиз, которые предполагают использование электрического поля для перемещения ионов солей в почве. Электрофорез активно исследуется в России, где применяются электрофилтраты для улучшения структуры почвы, что приводит к снижению её засоленности. Этот метод особенно перспективен для малых и средних участков, где традиционные методы оказываются неэффективными.

Применение органических веществ, таких как компосты или гуматы, улучшает водоудерживающую способность почвы, способствует развитию полезной микрофлоры и уменьшает негативное воздействие солей. Например, в Казахстане активно используются органические добавки в рамках комплексной программы по рекультивации засоленных земель, что дало положительные результаты для восстановления сельскохозяйственного потенциала [10].

Порой для рекультивации техногенно-засоленных почв применяют метод биоремедиации, заключающийся в использовании микроорганизмов для восстановления почвы. Некоторые виды бактерий, например *Bacillus* и *Pseudomonas*, способны переводить токсичные соли в менее токсичные формы, что приводит к

улучшению состояния почвы. Этот метод активно используется в Европе, где на базе университетов и научных лабораторий разработаны биопрепараты для восстановления засоленных земель [11].

Кроме того, для долгосрочной рекультивации почв важно соблюдение грамотного агротехнического подхода. Одним из таких методов является агролесоводство, когда на засоленных участках высаживаются многолетние культуры и лесные растения, которые помогают снижать уровень соли в почве и стабилизируют её структуру. В Казахстане и в Средней Азии такой подход активно используется для восстановления земель, пострадавших от орошения.

Современные методы рекультивации включают также использование новых наноматериалов и нанотехнологий. Например, наноразмерные порошки, обладающие высокой сорбционной способностью, могут быть использованы для удаления солей и других токсичных веществ из почвы. Это инновационное направление активно исследуется в России и Китае [12].

Восстановление почв, подвергшихся техногенному засолению, требует применения многоуровневого подхода, учитывающего специфику ландшафта, климат и характер загрязнения. Анализ литературных источников показал, что наиболее устойчивыми результатами характеризуются мероприятия, в которых сочетаются гидромелиоративные, агрохимические и биологические методы. При этом важно не столько использование новейших технологий, сколько адаптация проверенных решений под конкретные почвенно-климатические условия.

В рамках работы была реализована последовательность мероприятий, направленных на стабилизацию водного режима, снижение концентрации растворимых солей и запуск процессов восстановления растительного покрова. Ключевыми этапами выступали: организация отвода избыточной влаги с засоленных участков; регулирование ионного баланса почвы с помощью известных химических приёмов; применение устойчивых к солям форм растительности в биологическом контуре рекультивации. Данные были частично опубликованы в более ранних работах авторов [13] (табл. 2).

Таблица 2  
Результаты эксперимента по восстановлению техногенно-засоленных почв в объединённой пробе

| Этап             | Временной промежуток | Содержание загрязняющих веществ |       |                                     |         | Восстановление растительного покрова, % |             |
|------------------|----------------------|---------------------------------|-------|-------------------------------------|---------|---|-------------|
|                  |                      | НП, г/100 г почвы               |       | Хлорид-ионы, ммоль(экв)/100 г почвы |         | ЗУ-1                                    | ЗУ-2        |
|                  |                      | ЗУ-1                            | ЗУ-2  | ЗУ-1                                | ЗУ-2    |   |             |
| 1                | 2                    | 3                               | 4     | 5                                   | 6       | 7                                       | 8           |
| начало ОПИ       | Сентябрь 2009        | ≤ 2,5                           | ≤ 2,5 | 66 870                              | 100 530 | отсутствует                             |             |
| подготовительный | Сентябрь 2010        | ≤ 2,5                           | –     | 30 260                              | –       |   |             |
|                  | Июнь 2011            | ≤ 2,5                           | –     | 8 600                               | –       |   |             |
| технический      | Сентябрь 2011        | ≤ 2,5                           | –     | 8 840                               | –       |   |             |
|                  | Сентябрь 2011        | ≤ 2,5                           | –     | 6 220                               | –       |   |             |
|                  | Май 2012             | ≤ 2,5                           | –     | 7 000                               | –       |   |             |
| биологический    | Июнь 2013            | ≤ 2,5                           | –     | 1 590                               | –       |   |             |
| мониторинг       | Август 2014          | ≤ 2,5                           | ≤ 2,5 | 2 810                               | 51 260  | 35–40 %                                 | отсутствует |
|                  | Сентябрь 2015        | ≤ 2,5                           | ≤ 2,5 | 1 300                               | –       |   |             |

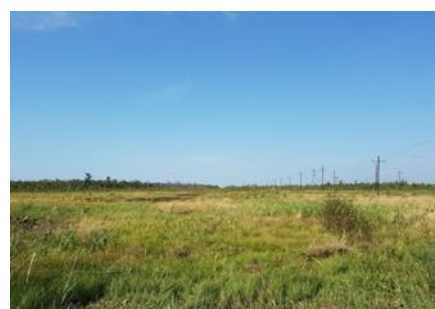
Продолжение табл. 2

| 1 | 2           | 3     | 4     | 5   | 6      | 7       | 8           |
|---|-------------|-------|-------|-----|--------|---------|-------------|
|   | Август 2016 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 440 | –      |         | отсутствует |
|   | Август 2017 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 280 | –      | 40–70 % |             |
|   | Август 2018 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 110 | –      |         |             |
|   | Август 2019 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 80  | –      |         |             |
|   | Август 2020 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 50  | –      | 70–85 % |             |
|   | Август 2021 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 30  | –      |         |             |
|   | Август 2022 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 20  | 40 060 | 85 %    |             |
|   | Август 2023 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | 10  | 39 850 | 90 %    |             |

Комплекс мероприятий по восстановлению почвенного покрова был реализован поэтапно (рис. 1) с использованием адаптированного набора подходов, соответствующих условиям среднетаёжной подзоны. На первом этапе, в 2010–2011 гг., основное внимание было уделено регулированию водного режима участка ЗУ–1. Были применены дренажные решения, обеспечившие локальное снижение засоленности за счёт естественного промывания почвенных горизонтов.



Сентябрь 2009 г.



Сентябрь 2016 г.



Сентябрь 2019 г.



Сентябрь 2023 г.

Рис. 1. Изменения участка ЗУ–1 в ходе проведения рекультивационных мероприятий

К осени 2011 года на фоне проводимых мероприятий отмечено существенное снижение концентрации хлорид-ионов. После стабилизации показателей на участке проведено выравнивание рельефа и закрытие дренажной сети.

В 2011–2013 гг. реализация технического этапа включала внесение агрохимических компонентов, традиционно применяемых в мелиорации засоленных почв, а также механическую обработку для улучшения структуры грунта. Эти действия способствовали повышению водопроницаемости и снижению плотности почвы.

Биологический этап (2013–2015 гг.) был направлен на восстановление растительного покрова. Мониторинг показал, что в 2015 году наблюдалось кратковременное повышение солености, связанное с вертикальной миграцией солей.

Это подтвердило важность продолжения биологических и мелиоративных мероприятий. К 2023 году концентрация хлорид-ионов в верхнем горизонте почвы на участке ЗУ–1 снизилась до минимальных значений, а степень зарастания местной растительностью приблизилась к 90 %. В то же время на контрольном участке ЗУ–2 сохранялась высокая степень засоления и отсутствие растительного покрова, что подчёркивает необходимость применения комплекса восстановительных мер. Кроме того, реализация описанного комплекса мероприятий имеет значительный эколого-экономический эффект, который подтверждается проведенными расчетами [14, 15].

**Выводы.** В результате реализации разработанной системы рекультивации техногенно-засоленных почв удалось значительно снизить концентрацию хлорид-ионов и восстановить естественное биоразнообразие на рекультивируемых участках. Комплекс мероприятий, включающий дренажные работы, внесение гипсовых и минеральных удобрений, а также использование солетолерантных растений, позволил эффективно справиться с проблемой почвенного засоления. На участке ЗУ–1 к 2023 году концентрация хлорид-ионов снизилась до минимального уровня, а степень зарастания местной растительностью достигла 90 %. В то же время, на участке ЗУ–2, не наблюдается восстановление растительности.

Результаты демонстрируют, что мероприятия, ориентированные на стабилизацию водного режима, коррекцию солевого состава и биологическое восстановление, могут быть успешно использованы при рекультивации загрязнённых участков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носова М.В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук. – Томск., 2024. – 213 с.
2. Геннадиев А.Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2016. – № 6. – С. 30–39.
3. Середина В.П., Андреева Т.А., Алексеева Т.П., Бурмистрова Т.И., Терещенко Н.Н. Нефтезагрязнённые почвы: свойства и рекультивация. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – 270 с.
4. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: ООО Ойкумена, 2004. – 342 с.
5. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). – Vienna, Austria, 2022. – 236 p.
6. Корольков В.И. Гипсование почв как метод борьбы с засолением // Почвоведение. – 2012. – № 10. – С. 55–62.
7. Öztürk M. The use of zeolites and other sorbents for soil reclamation / M. Öztürk, I. Çelik, C. Kaya // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2018. – Vol. 18, N 4. – P. 1000–1010.
8. Singh S. Microbial approaches for the reclamation of saline soils / S. Singh, A. Choudhury, P. Sharma // Environmental Sustainability. – 2020. – Vol. 2, N 2. – P. 119–132.
9. Kobayashi Y. Electrophoresis and electrolysis as advanced methods for soil salinity management / Y. Kobayashi, Y. Tanaka, M. Saito // Soil Science and Plant Nutrition. – 2015. – Vol. 61, N 6. – P. 523–530.
10. Яковлева А.Н. Использование органических удобрений при рекультивации засоленных почв Казахстана // Технологии сельского хозяйства. – 2019. – № 11. – С. 134–142.
11. Pivato A. Bioremediation of saline soils using bacteria and fungi / A. Pivato, A. Turrini, E. Bellini // International Journal of Phytoremediation. – 2016. – Vol. 18, N 7. – P. 665–673.
12. Chen X. Nanomaterials for the reclamation of saline-alkaline soils: Recent advances and future prospects / X. Chen, Z. Zhang, H. Liu // Environmental Pollution. – 2020. – Vol. 259. – P. 113775.
13. Носова М.В. Опыт проведения локальных рекультивационных мероприятий по восстановлению техногенно-засоленных почв / М.В. Носова, В.П. Середина, С.А. Стовбунник // Принципы экологии. 2024. – № 3. – С. 64–73.
14. Носова М. В. Сравнительная характеристика свойств нефтезагрязнённых и техногенно-засоленных почв в условиях Западной Сибири / М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбунник // Вестник

Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2025. – № 1. – С. 127–137. – DOI: 10.5281/zenodo.14923475.

15. Носова М. В. Эколого-экономическая оценка эффективности внедрения мероприятий по рекультивации техногенно-засоленных почв / М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбуник // Вестник национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2025. – № 4. – С. 130–137. – DOI: 10.5281/zenodo.17200022.

## REFERENCES

1. Nosova, M.V. (2024) *Vliyanie neftesolevogo zagryazneniya na ekologicheskoe sostoyanie pochv pojmy reki Obi v usloviyakh srednetazhnoj podzony Zapadnoj Sibiri*. PhD (Biological Sciences) thesis. Tomsk. 213 p. (In Russian).
2. Gennadiev, A.N. (2016) Neft i okruzhayushchaya sreda. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. Seriya 5. Geografiya. 6, 30–39. (In Russian).
3. Seredina, V.P., Andreeva, T.A., Alekseeva, T.P., Burmistrova, T.I. & Tereshchenko, N.N. (2006) *Neftezagryaznennye pochvy: svoystva i rekultivatsiya*. Tomsk, TPU Publishing House. 270 p. (In Russian).
4. Shishov, L.L., Tonkonogov, V.D., Lebedeva, I.I. & Gerasimova, M.I. (2004) *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii*. Smolensk, Oikumena LLC. 342 p. (In Russian).
5. IUSS Working Group WRB (2022) *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th ed. Vienna, Austria, International Union of Soil Sciences (IUSS). 236 p.
6. Korolkov, V.I. (2012) Gipsovanie pochv kak metod borby s zasoleniem. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 10, 55–62. (In Russian).
7. Öztürk, M., Çelik, I. & Kaya, C. (2018) The use of zeolites and other sorbents for soil reclamation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 18 (4), 1000–1010.
8. Singh, S., Choudhury, A. & Sharma, P. (2020) Microbial approaches for the reclamation of saline soils. *Environmental Sustainability*. 2 (2), 119–132.
9. Kobayashi, Y., Tanaka, Y. & Saito, M. (2015) Electrophoresis and electrolysis as advanced methods for soil salinity management. *Soil Science and Plant Nutrition*. 61 (6), 523–530.
10. Yakovleva, A.N. (2019) Ispolzovanie organicheskikh udobrenij pri rekultivatsii zasolyonnykh pochv Kazakhstana. *Tekhnologii selskokhozyajstva*. 11, 134–142. (In Russian).
11. Pivato, A., Turrini, A. & Bellini, E. (2016) Bioremediation of saline soils using bacteria and fungi. *International Journal of Phytoremediation*. 18 (7), 665–673.
12. Chen, X., Zhang, Z. & Liu, H. (2020) Nanomaterials for the reclamation of saline-alkaline soils: Recent advances and future prospects. *Environmental Pollution*. 259, 113775.
13. Nosova, M.V., Seredina, V.P. & Stovbunik, S.A. (2024) [Experience in conducting local reclamation measures for the restoration of technogenically saline soils]. *Principles of Ecology*. 3, 61–71, doi: 10.15393/j1.art.2024.14964. (In Russian).
14. Nosova, M.V., Seredina, V.P. & Stovbunik, S.A. (2025) Comparative characteristics of the properties of oil-contaminated and technogenically saline soils in the middle taiga subzone of Western Siberia. *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural sciences*. 1, 127–137, doi: 10.5281/zenodo.14923475. (In Russian).
15. Nosova, M.V., Seredina, V.P. & Stovbunik, S.A. (2025) Ecological and economic efficiency of reclamation of technogenically saline soils. *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural sciences*. 4, 130–137, doi: 10.5281/zenodo.17200022. (In Russian).

## EFFECTIVENESS OF RECULTIVATION MEASURES FOR RESTORATION OF TECHNOGENIC-SALINATED SOILS IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF WESTERN SIBERIA: REVIEW OF METHODS AND OWN EXPERIENCE

*M. V. Nosova, V. P. Seredina, S. A. Stovbunik*

The article presents the development and successful implementation of a comprehensive system for the reclamation of technogenically saline soils based on a thorough analysis of existing reclamation methods, as well as domestic and foreign experience in the field of soil restoration. The reclamation was organized in three stages: preparatory, technical and biological, each of which included certain measures to effectively eliminate salinization. At the preparatory stage (2010–2011), a drainage canal system was installed, which contributed to

the leaching of salts from the soil. For additional leaching, a snow bank formation technique was used, which made it possible to significantly reduce the concentration of chloride ions by 2015. At the technical stage (2011–2013), gypsum fertilizers were used, as well as mechanized soil cultivation, which contributed to the improvement of its structure. The biological stage (2013–2015) included the introduction of salt-tolerant plant seeds, which contributed to the restoration of vegetation in the ZU-1 area at a level of 90%. However, in the ZU-2 area, despite the high level of salinity, vegetation restoration did not occur, which emphasizes the need for further adaptation and refinement of reclamation methods for heavily contaminated areas. The results obtained indicate the high efficiency of the proposed reclamation system, which opens up prospects for its application in other man-made saline areas.

**Keywords:** soil pollution, reclamation, technogenically saline soils, drainage, gypsum fertilizers, salt-tolerant plants.

*Поступила в редакцию 07.05.2026 г.*

***Носова Мария Владимировна***

кандидат биологических наук,  
специалист по экологической безопасности,  
ООО «Сахалинская Энергия», г. Южно-Сахалинск, РФ.  
E-mail: [nsmvsh@mail.ru](mailto:nsmvsh@mail.ru)  
ORCID: 0000-0001-7985-6474  
AuthorID: 1043987

***Nosova Maria Vladimirovna***

Candidate of Biological Sciences;  
environmental protection specialist,  
Sakhalin Energy LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, RF.

***Середина Валентина Петровна***

доктор биологических наук,  
профессор кафедры почвоведения и экологии почв,  
Национальный исследовательский Томский  
государственный университет, г. Томск, РФ.  
E-mail: [seredina\\_v@mail.ru](mailto:seredina_v@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-7432-1726  
SPIN-код: 3383-2731  
AuthorID: 434107

***Seredina Valentina Petrovna***

Doctor of Biological Sciences;  
Professor of the Department of Soil Science and  
Soil Ecology of the National Research Tomsk State  
University, Tomsk, RF.

***Стовбуник Сергей Анатольевич***

главный специалист Управления экологии,  
ООО «РН-Проектирование Добыча», г. Томск, РФ.  
E-mail: [StovbunikSA@rn-pd.rosneft.ru](mailto:StovbunikSA@rn-pd.rosneft.ru)

***Stovbunik Sergey Anatolievich***

Chief Specialist of the Ecology Department of RN-  
Design Extraction LLC, Tomsk, RF.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СТАНДАРТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА У ЛИЦ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ОБЩЕЙ НЕСПЕЦИФИЧЕСКОЙ РЕАКТИВНОСТИ ОРГАНИЗМА (ПОИСКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)**

© 2026. *И. В. Улесикова, Н. А. Щукина, В. В. Воронов, С. С. Гринчук, А. Б. Мулик*

В статье рассматривается возможность использования функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (fNIRS) как неинвазивной экспрессной методики мониторинга уровня оксигенации тканей коры головного мозга для нейровизуализации в режиме реального времени. Методику применяли для оценки корреляций стандартных показателей fNIRS с индивидуальным уровнем общей неспецифической реактивности организма. В работе приняли участие 37 клинически здоровых мужчин 21–27 лет, подписавших добровольное согласие на проведение исследовательских работ. Каждый обследуемый с 09:00 до 13:00 проходил оценку оксигенации коры головного мозга с помощью fNIRS и оценку порога болевой чувствительности (ПБЧ). Статистический анализ данных осуществляли с применением ранговой корреляции  $\rho$ -Спирмена. Было установлено, что содержание кислорода в кровеносных сосудах головного мозга коррелирует с выраженностью индивидуальной чувствительности и реактивностью организма. Выявлены взаимосвязи между ПБЧ и фоновым уровнем оксигенации коры мозга в третьем, четвертом, шестом, восьмом каналах у добровольцев, обладающих высоким уровнем общей неспецифической реактивности организма (УОНРО). У добровольцев со средними значениями ПБЧ выявлены связи между ПБЧ и фоновым уровнем оксигенации коры в первом канале, в третьем, в четвертом канале. У них же имела место перестройка взаимосвязей между уровнями оксигенации обследуемых областей коры головного мозга по сравнению со среднестатистическим вариантом. Полученные результаты могут свидетельствовать о индивидуальной, генетически детерминированной картине функционирования головного мозга, способствующей поддержанию гомеостаза. Результаты проведенного исследования свидетельствуют об актуальности и целесообразности дальнейшего изучения взаимосвязей fNIRS и порога болевой чувствительности.

**Ключевые слова:** порог болевой чувствительности, уровень общей неспецифической реактивности организма, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия

**Введение.** Функциональная спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне (fNIRS) – неинвазивный метод оценки уровня оксигенации тканей коры головного мозга. Принцип работы прибора, основан на измерении уровня оксигенации крови сосудов головного мозга (до 3 см). Чем выше активность того или иного участка коры, тем больше кислорода доставляется к нему, чтобы обеспечить его потребности. С помощью церебральной fNIRS можно оценить, какие участки мозга активнее других в данный момент времени. Оптоды размещаются по международной системе 10-20 в лобных, теменных, височных и затылочных регионах в правом и левом полушарии. Поскольку гемоглобин является хорошим абсорбентом света в диапазоне волн от 650 до 1000 нм, инфракрасный свет может проникать в кожу головы, кости черепа, верхние слои коры головного мозга и в отраженном виде принимается детектором, характеризуя концентрацию трех показателей: оксигенированного гемоглобина (HbO), дезоксигенированного гемоглобина (HbR) и общего гемоглобина (Hbt) мозговых капилляров [1]. В настоящее время данная методика в основном применяется в научных исследованиях для оценки изменений в функциональном состоянии организма человека при воздействии факторов среды обитания, тяжести физической и умственной работы [2]. В клинической практике может использоваться для оценки эффективности лечебных, реабилитационных мероприятий (инсульты, контузии, посттравматический

стресс) [3; 4]. Преимущества прибора по сравнению с другими методиками нейровизуализации следующие: безопасность – fNIRS не использует никакого вредного излучения, метод можно использовать у детей; малоинвазивная методика – для fNIRS не требуется дополнительного контрастного вещества, как для фМРТ; функциональный метод визуализации – контраст изображения достигается благодаря функционированию ткани; доступность – fNIRS относительно недорогая и простая в обращении технология (в сравнении с функциональной магнитно-резонансной томографией (фМРТ)); временное разрешение у fNIRS выше, чем у фМРТ; пространственное разрешение у fNIRS выше, чем у ЭЭГ.

При проведении исследований медико-биологического профиля предпринимаются попытки учитывать индивидуальные особенности функционирования организма. Сила ответной реакции при экзогенном воздействии всегда строго специфична и генетически детерминирована. При использовании современных методик нейровизуализации функционирования коры головного мозга требуется сравнительная оценка показателей оксигенации в группах индивидов с различным уровнем общей неспецифической реактивности организма, являющегося показателем индивидуальной реактивности человека. Установлено, что порог боли отражает общую неспецифическую чувствительность организма и является показателем индивидуальной реактивности [5–7]. Уровень общей неспецифической реактивности организма как интегративный критерий, количественно и качественно отражающий индивидуальную организацию гомеостаза организма, оценивается с помощью порога болевой чувствительности (ПБЧ) [8]. Поскольку ПБЧ является генетически детерминированным, то предположительно и специфические особенности функционирования организма должны быть отражены в специфике оксигенации коры головного мозга.

Уровень оксигенации коры количественно и качественно можно оценить с помощью функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS), являющейся неинвазивной, простой в использовании методикой нейровизуализации уровня оксигенации кортикальных отделов мозга, позволяющей изучать нормальное функционирование и нарастающие патологические изменения в условиях реальной жизнедеятельности.

В последние годы резко возросло количество исследований в области нейровизуализации параллельно с ростом доступности систем fNIRS. В связи с этим появляются многочисленные попытки соотнесения результатов fNIRS, полученных в результате исследований различных авторов и на различных приборах.

Однако, при проведении исследований и последующем нормировании показателей fNIRS необходимо учитывать индивидуальный функциональный статус обследуемых добровольцев. Наиболее актуальным является изучение выраженности стандартных показателей fNIRS в зависимости от уровня общей неспецифической реактивности организма, измеряемой с помощью порога болевой чувствительности.

**Цель.** Охарактеризовать проявление стандартных показателей fNIRS у индивидов с различным уровнем общей неспецифической реактивности организма.

**Материалы и методы.** Было проведено обследование 37 добровольцев мужского пола от 21 до 27 лет, в одно и то же время с 09:00 до 13:00, предварительно подписавших письменное информированное согласие на проведение исследования. По порогу болевой чувствительности (ПБЧ) с помощью прибора алгезиметр (Ugo Basile, Италия) обследуемых разделили на три группы меньше 10 с, лица с порогом болевой чувствительности от 10 с до 31 с и третья группа, лица с порогом чувствительности от 32 с и выше, одновременно оценивая уровень оксигенации коры головного мозга в

зависимости от индивидуального генетически детерминированного статуса организма человека, используя функциональную ближнюю инфракрасную спектроскопию (fNIRS). В приборе алгезиметр источник излучения создавал концентрированный световой луч, направленный на середину тыльной поверхности дистальной фаланги среднего пальца. Палец располагался на рабочей площадке, закрывая фотоэлементы. При этом один фотоэлемент включал вспомогательную лампу, обозначающую границу рабочего луча, что позволяло тщательно зафиксировать палец в нужном положении на площадке. Основная лампа включалась в ручном режиме. Второй фотоэлемент отключал рабочий луч после отстранения пальца и фиксировал время выдержки в секундах, принимаемое за ПБЧ. Определение ПБЧ производилось в состоянии покоя, при полном соматическом и психологическом равновесии обследуемого.

Гемодинамическую реакцию коры головного мозга оценивали в фоновом режиме с помощью прибора функциональной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона Cortivision Poton Cap C20 (Cortivision, Польша). Прибор сертифицирован и соответствует требованиям технического регламента Евразийского экономического союза (ЕАЭС N RU Д-PL.PA03.B.20841/21 от 03.12.2021, срок действия – до 02.12.2026). Спектроскоп Cortivision Poton Cap C20 укомплектован 20 оптодами (10 источников и 10 детекторов) с частотой дискретизации 7,8125 Гц. Оптоды неинвазивно фиксировались на голове обследуемого путём размещения в гнезда эластичной шапочки «Easusar». При этом 8 пар оптодов размещались по международной системе 10-20 в лобных, теменных, височных и затылочных областях в правом и левом полушарии. Используемые детекторы и излучатели, образуют каналы инфракрасного света двух длин волн – 760 нм и 850 нм. Свет в инфракрасном диапазоне, излучаемый источником, частично рассеивался, отражался и поглощался. В результате суммарно оценили концентрацию оксигенированного (HbO) и восстановленного гемоглобина (HbR), определяя гемодинамическую реакцию коры с помощью модифицированного закона Бера – Ламберта. Было определено, что чем интенсивнее излучаемый свет и чем больше расстояние между фотоисточником и фотодетектором, тем больше глубина проникновения в ткань. Прямое измерение гемодинамической реакции коры головного мозга позволило оценить уровень оксигенации обследуемых областей мозга в режиме реального времени. Методика fNIRS обладает высокой устойчивостью к артефактам движения и изучает естественное функциональное состояние обследуемых добровольцев, с учетом их индивидуального уровня реактивности организма, не ограничивая их в свободном передвижении. Статистический анализ данных проводили с использованием ранговой корреляции  $\rho$ -Спирмена. В исследовании был принят уровень значимости  $\alpha = 0,05$ . Расчеты выполнены в программном пакете SPSS для двустороннего критерия с опцией «метить значимые корреляции» (корреляционные матрицы содержат метки «\*» и «\*\*»). Схема расположения оптодов в эластичной шапочке fNIRS (источников и детекторов инфракрасного света) и соотношение датчика отведениям ЭЭГ отражена в таблице 1.

**Результаты и их обсуждение.** В ходе проведенного экспериментального исследования изучались взаимосвязи между показателями оксигемоглобина/ дезоксигемоглобина и уровнем общей неспецифической реактивности организма у добровольцев. Эта возможность обеспечивалась различиями в порогах болевой чувствительности у обследуемых. Учитывая малый объем выборки тестирование взаимосвязей осуществляли с помощью непараметрической корреляции  $\rho$ -Спирмена (безотносительно к закону распределения данных).

Таблица 1

Схема отведения оптодов fNIRS

| Номер канала | Тип датчика | Соотношение датчика отведениям ЭЭГ | Место съема            |
|--------------|-------------|------------------------------------|------------------------|
| 1            | Источник    | F4                                 | Правая лобная кора     |
|              | Детектор    | F6                                 |                        |
| 2            | Источник    | F3                                 | Левая лобная кора      |
|              | Детектор    | F5                                 |                        |
| 3            | Источник    | AF4                                | Правая лобная кора     |
|              | Детектор    | AFp2                               |                        |
| 4            | Источник    | AF3                                | Левая лобная кора      |
|              | Детектор    | AFp1                               |                        |
| 5            | Источник    | FTT8h                              | Правая височная кора   |
|              | Детектор    | T8                                 |                        |
| 6            | Источник    | FTT7h                              | Левая височная кора    |
|              | Детектор    | T7                                 |                        |
| 7            | Источник    | P3                                 | Левая теменная кора    |
|              | Детектор    | CPP5h                              |                        |
| 8            | Источник    | P4                                 | Правая теменная кора   |
|              | Детектор    | CPP6h                              |                        |
| 9            | Источник    | O2                                 | Левая затылочная кора  |
|              | Детектор    | OL2h                               |                        |
| 10           | Источник    | O1                                 | Правая затылочная кора |
|              | Детектор    | OL1h                               |                        |

В таблицах 2–5 выборочно приведены результаты оценивания взаимосвязей между уровнем общей неспецифической реактивности организма и стандартными показателями оксигенации коры головного мозга у обследуемых добровольцев.

Таблица 2

Характеристика взаимосвязей между показателями спектроскопии по выборочным данным в целом (корреляция  $\rho$ -Спирмена)

| Все         | ПБЧ    | S1_D1_760 | S1_D1_850 | S2_D2_760 | S2_D2_850 | S3_D3_760 | S4_D4_760 | S6_D6_760 | S7_D7_760 |
|-------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S1_D1_760   | -0,065 |           |           |           |           |           |           |           |           |
| S1_D1_850   | -0,144 | ,988**    |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_760   | 0,144  | ,773**    | ,739**    |           |           |           |           |           |           |
| S4_D4_760   | 0,026  | ,633**    | ,624**    | ,635**    | ,594**    | ,909**    |           |           |           |
| S7_D7_760   | 0,133  | ,561**    | ,579**    | ,596**    | ,582**    | ,530**    | ,618**    | ,586**    |           |
| S8_D8_760   | 0,035  | ,566**    | ,580**    | ,608**    | ,592**    | ,567**    | ,658**    | ,584**    | ,936**    |
| S9_D9_760   | -0,025 | ,470**    | ,484**    | ,488**    | ,461**    | ,407*     | ,574**    | ,611**    | ,758**    |
| S10_D10_850 | 0,037  | ,600**    | ,612**    | ,591**    | ,567**    | ,444**    | ,563**    | ,569**    | ,835**    |

Примечание: Наличие хотя бы одного знака «\*» является признаком статистической значимости коэффициента корреляции на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

По полученным результатам в целом (см. табл. 2) можно было бы сделать поспешный вывод об отсутствии эффекта корреляции между уровнем ПБЧ и показателями оксигенации коры головного мозга у среднестатистического обследуемого индивида. Причем значения коэффициентов  $\rho$ -Спирмена настолько малы,

что даже при условном наличии их статистической значимости обосновать практическую ценность выявленных связей было бы весьма затруднительно. К тому же уровни оксигенации обследуемых областей коры головного мозга у среднестатистического обследуемого по силе взаимосвязей варьировались в широком диапазоне: от слабо умеренных ( $\rho=0,3..*$ ) до очень тесных ( $\rho=0,9..*$ ). Одновременно среди всех экспериментальных каналов особо выделялись 5-ый и 6-ой каналы: они демонстрировали отдельные результаты оксигенации, которые не связаны с прочими каналами.

Таким образом, возникает вопрос о целесообразности изучения проблемы не на среднестатистическом обследуемом индивиде, а на выделении групп лиц с характерно низким, средним и высоким уровнем порога болевой чувствительности. Но для этого необходимо иметь критерий квантования всевозможных значений ПБЧ на отдельные области (участки, кванты) низкого, среднего и высокого уровней. В связи с отсутствием в настоящее время такого критерия, было принято решение выполнить пробную принудительную стратификацию экспериментальной выборки добровольцев на три группы: группа № 1 – лица с ПБЧ меньше 10 с; группа № 2 – лица с ПБЧ от 10 до 31 с; группа № 3 – лица с ПБЧ от 32 с и выше. Результаты пробного исследования приведены в таблицах 3–5 [9–13].

Таблица 3

Характеристика взаимосвязей между показателями спектроскопии по выборочным данным в гр. № 1 (корреляция  $\rho$ -Спирмена)

| гр. № 1     | ПБЧ    | S1_D1_760 | S3_D3_850 | S7_D7_760 | S7_D7_850 | S8_D8_760 | S8_D8_850 | S9_D9_760 | S9_D9_850 |
|-------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S1_D1_760   | ,436   |           |           |           |           |           |           |           |           |
| S1_D1_850   | ,436   | 1,000**   |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_760   | ,636   | ,893**    |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_850   | ,455   | ,893**    |           |           |           |           |           |           |           |
| S3_D3_760   | ,837*  | ,571      |           |           |           |           |           |           |           |
| S3_D3_850   | ,855*  | ,464      |           |           |           |           |           |           |           |
| S4_D4_760   | ,837*  | ,571      | ,857*     |           |           |           |           |           |           |
| S4_D4_850   | ,909** | ,607      | ,750      |           |           |           |           |           |           |
| S5_D5_760   | ,618   | -,179     | ,214      |           |           |           |           |           |           |
| S5_D5_850   | ,400   | -,321     | ,179      |           |           |           |           |           |           |
| S6_D6_760   | ,764*  | ,214      | ,536      |           |           |           |           |           |           |
| S6_D6_850   | ,236   | -,464     | ,000      |           |           |           |           |           |           |
| S7_D7_760   | ,709   | ,286      | ,679      |           |           |           |           |           |           |
| S7_D7_850   | ,709   | ,286      | ,679      | 1,000**   |           |           |           |           |           |
| S8_D8_760   | ,837*  | ,286      | ,857*     | ,893**    | ,893**    |           |           |           |           |
| S8_D8_850   | ,837*  | ,286      | ,857*     | ,893**    | ,893**    | 1,000**   |           |           |           |
| S9_D9_760   | ,709   | ,321      | ,571      | ,964**    | ,964**    | ,857*     | ,857*     |           |           |
| S9_D9_850   | ,709   | ,286      | ,679      | 1,000**   | 1,000**   | ,893**    | ,893**    | ,964**    |           |
| S10_D10_760 | ,709   | ,321      | ,571      | ,964**    | ,964**    | ,857*     | ,857*     | 1,000**   | ,964**    |
| S10_D10_850 | ,709   | ,286      | ,679      | 1,000**   | 1,000**   | ,893**    | ,893**    | ,964**    | 1,000**   |

Примечание: Наличие хотя бы одного знака «\*» является признаком статистической значимости коэффициента корреляции на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Предпринятая стратификация экспериментальной выборки добровольцев способствовала выявлению статистически значимых корреляций между отдельными показателями оксигенации коры головного мозга и уровнем общей неспецифической реактивности организма у добровольцев в группах № 1, 2. Это позволяет отследить специфический характер взаимосвязей между уровнями оксигенации обследуемых областей коры человеческого мозга в этих группах (табл. 3–5).

Так, у добровольцев гр. № 1, обладающих низкими значениями порога болевой чувствительности (см. табл. 3) и, следовательно, высоким уровнем общей неспецифической реактивности организма, были выявлены взаимосвязи между порогом болевой чувствительности и фоновым уровнем оксигенации коры головного мозга в третьем (S3\_D3\_760,  $\rho=0,837^*$ ; S3\_D3\_850,  $\rho=0,855^*$ ), четвертом (S4\_D4\_760,  $\rho=0,837^*$ ; S4\_D4\_850,  $\rho=0,909^*$ ), шестом (S6\_D6\_760,  $\rho=0,764^*$ ), восьмом каналах (S8\_D8\_760,  $\rho=0,837^*$ ; S8\_D8\_850,  $\rho=0,837^*$ ).

Отдельно нужно отметить, что по силе взаимосвязей уровни оксигенации обследуемых областей коры головного мозга у добровольцев гр. №1 принципиально отличались от среднестатистического варианта, представленного в табл. 2. Данный факт требует отдельного анализа и в рамках данной статьи не рассматривался.

Таблица 4

Характеристика взаимосвязей между показателями спектроскопии по выборочным данным в гр. № 2  
(корреляция  $\rho$ -Спирмена)

| гр. № 2     | ИБЧ    | S1_D1_760 | S1_D1_850 | S2_D2_760 | S3_D3_760 | S4_D4_760 | S6_D6_760 | S6_D6_850 | S7_D7_760 | S8_D8_850 |
|-------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S1_D1_760   | ,971** |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| S1_D1_850   | ,912** | ,967**    |           |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_760   | 0,43   | 0,53      | 0,62      |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_850   | 0,32   | 0,43      | 0,53      | ,950**    |           |           |           |           |           |           |
| S3_D3_760   | ,895** | ,817**    | ,767*     | 0,18      |           |           |           |           |           |           |
| S3_D3_850   | ,929** | ,850**    | ,783*     | 0,17      | ,983**    |           |           |           |           |           |
| S4_D4_760   | ,745*  | ,667*     | 0,63      | 0,52      | ,817**    |           |           |           |           |           |
| S4_D4_850   | ,745*  | ,667*     | 0,63      | 0,52      | ,817**    | 1,000**   |           |           |           |           |
| S5_D5_760   | 0,21   | 0,12      | 0,07      | 0,03      | 0,52      | ,667*     |           |           |           |           |
| S5_D5_850   | -0,3   | -0,4      | -0,5      | -0,4      | 0         | 0,07      |           |           |           |           |
| S6_D6_760   | 0,01   | -0,1      | -0        | 0,33      | 0,08      | 0,52      |           |           |           |           |
| S6_D6_850   | -0,1   | -0,2      | -0,2      | 0,03      | -0,1      | 0,1       | ,733*     |           |           |           |
| S7_D7_760   | 0,39   | 0,3       | 0,37      | 0,48      | 0,4       | ,700*     | ,867**    | 0,65      |           |           |
| S7_D7_850   | 0,35   | 0,28      | 0,38      | 0,5       | 0,37      | 0,65      | ,833**    | 0,6       | ,983**    |           |
| S8_D8_760   | 0,41   | 0,37      | 0,45      | 0,52      | 0,38      | 0,65      | ,800**    | 0,62      | ,933**    |           |
| S8_D8_850   | 0,33   | 0,27      | 0,37      | 0,48      | 0,32      | 0,6       | ,850**    | ,667*     | ,967**    |           |
| S9_D9_760   | -0,3   | -0,4      | -0,3      | 0,32      | -0,2      | 0,28      | ,917**    | ,667*     | 0,65      | 0,65      |
| S9_D9_850   | 0,03   | -0        | 0,12      | 0,45      | 0,05      | 0,43      | ,917**    | ,667*     | ,867**    | ,933**    |
| S10_D10_760 | 0,18   | 0,22      | 0,27      | ,867**    | 0         | 0,5       | 0,58      | 0,32      | 0,6       | 0,53      |
| S10_D10_850 | 0,26   | 0,3       | 0,37      | ,900**    | 0,07      | 0,53      | 0,6       | 0,33      | ,683*     | 0,63      |

Примечание: Наличие хотя бы одного знака «\*» является признаком статистической значимости коэффициента корреляции на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

У добровольцев гр. № 2, обладающих средними значениями порога болевой чувствительности (см. табл. 4) и, следовательно, средним уровнем общей неспецифической реактивности организма, выявлены связи между порогом болевой чувствительности и фоновым уровнем оксигенации коры головного мозга в первом канале (S1\_D1\_760,  $\rho=0,971^*$ ; S1\_D1\_850,  $\rho=0,912^*$ ), в третьем (S3\_D3\_760,  $\rho=0,895^*$ ; S3\_D3\_850,  $\rho=0,929^*$ ) и четвертом канале (S4\_D4\_760,  $\rho=0,745^*$ ; S4\_D4\_850,  $\rho=0,745^*$ ).

И у этих добровольцев также имела место перестройка взаимосвязей между уровнями оксигенации обследуемых областей коры головного мозга по сравнению со среднестатистическим вариантом (см. табл. 2 и табл. 4).

Наконец, у лиц с низким уровнем общей неспецифической реактивности организма статистической значимости связей между стандартными показателями оксигенации и порогом болевой чувствительности выявлено не было (см. табл. 5). Тем не менее, картина взаимосвязей между уровнями оксигенации обследуемых областей коры головного мозга и в этом случае обладала системностью и упорядоченностью исследуемых показателей. Стоит отметить ключевой момент – наличие исключительно положительной корреляции между порогом болевой чувствительности и уровнем оксигенации различных участков коры головного мозга у представителей первой и второй группы.

Таблица 5

Характеристика взаимосвязей между показателями спектроскопии по выборочным данным в гр. № 3 (корреляция  $\rho$ -Спирмена)

| гр. № 3     | ПБЧ    | S1_D1_760 | S1_D1_850 | S2_D2_760 | S3_D3_760 | S3_D3_850 | S4_D4_850 | S6_D6_760 | S7_D7_760 |
|-------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S1_D1_760   | 0,076  |           |           |           |           |           |           |           |           |
| S1_D1_850   | -0,008 | ,979**    |           |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_760   | -0,084 | ,767*     | ,778*     |           |           |           |           |           |           |
| S2_D2_850   | 0,000  | ,750*     | ,762*     | ,983**    |           |           |           |           |           |
| S3_D3_760   | 0,017  | ,800**    | ,828**    | ,750*     |           |           |           |           |           |
| S3_D3_850   | -0,384 | ,711*     | ,811**    | ,736*     | ,803**    |           |           |           |           |
| S4_D4_760   | 0,202  | ,833**    | ,812**    | ,767*     | ,933**    | ,669*     |           |           |           |
| S4_D4_850   | 0,118  | ,850**    | ,845**    | 0,65      | ,733*     | 0,644     |           |           |           |
| S5_D5_760   | 0,084  | 0,383     | 0,502     | 0,317     | 0,417     | 0,653     | 0,383     |           |           |
| S5_D5_850   | 0,294  | 0         | 0,109     | 0,067     | -0,07     | 0,176     | 0,017     |           |           |
| S6_D6_760   | -0,059 | 0,167     | 0,285     | -0,03     | 0,3       | 0,544     | 0,367     |           |           |
| S6_D6_850   | -0,034 | -0,05     | 0,075     | -0,32     | 0,1       | 0,326     | 0,067     | ,900**    |           |
| S7_D7_760   | -0,185 | ,667*     | ,762*     | 0,433     | 0,517     | ,787*     | ,750*     | ,717*     |           |
| S7_D7_850   | -0,126 | ,683*     | ,787*     | 0,533     | 0,567     | ,820**    | ,767*     | ,700*     | ,983**    |
| S8_D8_760   | 0,000  | ,689*     | ,726*     | 0,395     | 0,538     | 0,608     | ,916**    | 0,588     | ,891**    |
| S8_D8_850   | -0,134 | ,733*     | ,770*     | 0,417     | 0,567     | ,711*     | ,850**    | 0,617     | ,933**    |
| S9_D9_760   | -0,169 | 0,544     | 0,605     | 0,109     | 0,46      | 0,588     | ,711*     | ,745*     | ,862**    |
| S9_D9_850   | -0,127 | 0,561     | 0,622     | 0,159     | 0,51      | 0,622     | ,745*     | ,770*     | ,879**    |
| S10_D10_760 | -0,197 | 0,61      | 0,655     | 0,153     | 0,509     | 0,621     | ,712*     | ,695*     | ,848**    |
| S10_D10_850 | -0,218 | ,683*     | ,711*     | 0,25      | 0,6       | ,678*     | ,733*     | 0,633     | ,817**    |

Примечание: Наличие хотя бы одного знака «\*» является признаком статистической значимости коэффициента корреляции на уровне значимости  $\rho = 0,05$ .

**Выводы.** В результате проведенного исследования между фоновыми показателями концентрации оксигенированного и восстановленного гемоглобина и порогом болевой чувствительности выявлены взаимосвязи, которые невозможно отнести к случайному совпадению. А именно: содержание кислорода в кровеносных сосудах головного мозга коррелирует с выраженностью индивидуальной чувствительности и реактивностью организма человека.

Отмечено наличие связи между уровнем общей неспецифической реактивности организма и функциональным состоянием головного мозга, в частности, уровнем оксигенации отдельных областей коры.

Можно предположить, что для каждого индивида в зависимости от его индивидуальных генетически детерминированных особенностей проявляется своя, специфическая картина снабжения кислородом коры головного мозга, способствующая поддержанию нормального функционирования. Эти данные необходимо учитывать при выполнении исследований медико-биологического профиля, способствуя повышению надёжности и воспроизводимости результатов исследований, выполняемых с использованием технологии fNIRS. Результаты исследования определяют актуальность и целесообразность дальнейшего изучения особенностей оксигенации коры головного мозга в зависимости от индивидуального функционального статуса организма человека.

**Потенциальный конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации НИР-1 «Детерминанта».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrari, M., Quaresima, V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application // *Neuroimage*. – 2012. – Vol. 63, № 2. – P. 921-935. – DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049
2. McKendrick, R., Mehta, R., Ayaz, H., Scheldrup, M., Parasuraman R. Prefrontal Hemodynamics of Physical Activity and Environmental Complexity During Cognitive Work // *Hum Factors*. – 2017. – Vol. 59. – No 1. – P. 147-162. – DOI: 10.1177/0018720816675053.
3. Zhang, J., Huang, W., Chen, Z., Jiang, H., Su, M., Wang, C. Effect of auricular acupuncture on neuroplasticity of stroke patients with motor dysfunction: A fNIRS study // *Randomized Controlled Trial Neurosci Lett*. – 2023. – Vol. 24, No 12. – P. 137398. – DOI: 10.1016/j.neulet.2023.137398.
4. Lanning, B., Smith, C., Ugale, C., Nazarenko, E., Marchand, W. Using Functional Near-Infrared Spectroscopy to Elucidate Neurophysiological Mechanism of Action of Equine-Assisted Services // *Proof-of-Concept Study. Int J Environ Res Public Health*. – 2025. – Vol. 22, No 8. – P. 12-94. – DOI: 10.3390/ijerph22081294.
5. Калужный, Л.В. Физиологические механизмы регуляции болевой чувствительности / Л.В. Калужный. – М.: Медицина, 1984. – 216 с.
6. Мулик, А.Б. Универсальный метод оценки уровня общей неспецифической реактивности организма человека и традиционных видов лабораторных животных / А.Б. Мулик // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11. Естественные. Науки*. – 2012. – № 2(4). – С. 11-15.
7. Мулик, А.Б. Биометрическая характеристика болевой чувствительности организма / А.Б. Мулик, Ю.А. Шатыр, М.В. Постнова // *Сенсорные системы*. – 2013. – Т. 27, № 1. – С. 60-67.
8. Мулик, А.Б. Уровень общей неспецифической реактивности организма: монография / А.Б. Мулик, М.В. Постнова, Ю.А. Мулик. – Волгоград: Волгоградское научное издательство. – 2009. – 224 с.
9. Шатыр, Ю.А. Типологизация системной адаптации организма человека / Ю.А. Шатыр, С.В. Булагецкий, И.В. Улесикова // *Российский медико-биологический вестник им. Академика И.П. Павлова*. – 2017. – Т. 25, № 3. – С. 362-372. – DOI: 10.23888/Pavlovj20173362-372
10. Chen, L., Li, Q., Song, H. Classification of schizophrenia using general linear model and support vector machine via fNIRS Affiliations Expand // *Phys Eng Sci Med*. – 2020. – Vol. 43, No 4. – P. 1151-1160. – DOI: 10.1007/s13246-020-00920-0.
11. Медведев, В.И. Адаптация человека / В.И. Медведев. – СПб: Институт мозга человека. – 2003. – 551 с.

12. Кандрор, И.С. Очерки по физиологии и гигиене человека на Крайнем Севере / И.С. Кандрор. – М.: Медицина, 1968. – 280 с.
13. Матвеев, Л.М. Работоспособность и гемодинамика у мужчин в условиях проживания в средних и высоких широтах / Л.М. Матвеев // Физиология человека. – 1985. – Т. 11, № 1. – С. 113-120.

#### REFERENCES

1. Ferrari, M., Quaresima, V. (2012) A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*. 63 (2), 921-935, doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049
2. McKendrick, R., Mehta, R., Ayaz, H., Scheldrup, M., Parasuraman R. (2017) Prefrontal Hemodynamics of Physical Activity and Environmental Complexity During Cognitive Work. *Hum Factors*. 59 (1), 147-162, doi: 10.1177/0018720816675053.
3. Zhang, J., Huang, W., Chen, Z., Jiang, H., Su, M., Wang, C. (2023) Effect of auricular acupuncture on neuroplasticity of stroke patients with motor dysfunction: A fNIRS study // *Randomized Controlled Trial Neurosci Lett*. 24 (12), 137-398, doi: 10.1016/j.neulet.2023.137398.
4. Lanning, B., Smith, C., Ugale, C., Nazarenko, E. & Marchand, W. Using Functional Near-Infrared Spectroscopy to Elucidate Neurophysiological Mechanism of Action of Equine-Assisted Services (2025) // *Proof-of-Concept Study. Int J Environ Res Public Health*. 22 (8), 12-94, doi: 10.3390/ijerph22081294.
5. Kalyuzhny, L.V. (1984) *Physiological Mechanisms of Pain Sensitivity Regulation*. Moscow: Medicine, 216 p. (In Russian).
6. Mulik, A.B. (2012) [A universal method for assessing the level of general nonspecific reactivity of the human body and traditional types of laboratory animals]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11. Estestvenny'e. Nauki. = Bulletin of the Volgograd State University. Episode 11. Natural ones. Science*. 2 (4), 11-15. (In Russian).
7. Mulik, A.B., Shatyr, Yu.A. & Postnova, M.V. (2013) [Biometric Characteristics of the Body's Pain Sensitivity]. *Sensorny'e sistemy` = Sensory Systems*. 27 (1), 60-67. (In Russian).
8. Mulik, A.B., Postnova, M.V. & Mulik, Yu.A. (2009). *The level of general nonspecific reactivity of the body: monograph*. Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House. 224 p. (In Russian).
9. Shatyr, Yu.A., Bulatetsky, S.V. & Ulesikova, I.V. (2017) [Typologization of the Systemic Adaptation of the Human Body]. *Rossiiskij mediko-biologicheskij vestnik im. Akademika I.P. Pavlova = Russian Medical and Biological Bulletin named after Academician I.P. Pavlov*. 25 (3), 362-372, doi:10.23888/Pavlovj20173362-372. (In Russian).
10. Chen, L., Li, Q., Song, H. (2020) Classification of schizophrenia using general linear model and support vector machine via fNIRS Affiliations Expand. *Phys Eng Sci Med*. 43 (4), 1151-1160, doi: 10.1007/s13246-020-00920-0.
11. Medvedev, V.I. (2003) *Human Adaptation*. St. Petersburg: Institute of the Human Brain. 551 p. (In Russian).
12. Kandrор, I.S. (1968) *Essays on Human Physiology and Hygiene in the Far North*. Moscow: Meditsina, 280 p. (In Russian).
13. Matveev, L.M. (1985) [Performance and Hemodynamics in Men Living in Middle and High Latitudes]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 11 (1), 113-120. (In Russian).

#### RESULTS OF ASSESSMENT OF STANDARD INDICATORS OF FUNCTIONAL SPECTROSCOPY OF THE NEAR-INFRARED DIAPASON IN PERSONS WITH DIFFERENT LEVELS OF GENERAL NONSPECIFIC REACTIVITY OF THE BODY (SEARCH RESEARCH)

*I. V. Ulesikova, N. A. Shchukina, V. V. Voronov, S. S. Gringuk, A. B. Mulik*

The article discusses the possibility of using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a non-invasive express method for monitoring the level of cortical tissue oxygenation for real-time neuroimaging. The method was used to assess the correlations between standard fNIRS indicators and the individual level of general nonspecific reactivity of the body. The study involved 37 clinically healthy men aged 21–27 who signed a voluntary consent form for research purposes. Each subject underwent fNIRS assessment of cortical oxygenation and pain threshold assessment (PTA) from 09:00 to 13:00. Statistical analysis of the data was performed using Spearman's rank correlation. It was found that the oxygen content in the blood vessels of the brain correlates with the severity of individual sensitivity and the body's reactivity. The relationships between PTA and the background level of oxygenation were identified.

**Keywords:** pain threshold, level of general nonspecific reactivity of the body, functional near-infrared spectroscopy

Поступила в редакцию 12.05.2026 г.

**Улесикова Ирина Владимировна**

кандидат биологических наук,  
научный сотрудник научно-исследовательского  
отдела обитаемости Научно-исследовательского  
центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская  
академия имени С. М. Кирова» МО РФ,  
г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: ulesikovairina@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-9284-3280  
SPIN-код: 9859-6036  
Author ID: 884475

**Щукина Нэлла Алексеевна**

научный сотрудник научно-исследовательского  
отдела обитаемости Научно-исследовательского  
центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская  
академия имени С. М. Кирова» МО РФ,  
г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: tshukina.nella@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-6479-5971  
SPIN-код: 8582-5461  
Author ID: 878776

**Воронов Виктор Витальевич**

кандидат медицинских наук, начальник  
лаборатории обитаемости объектов Научно-  
исследовательского центра, ФГБВОУ ВО «Военно-  
медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ,  
г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: voronov\_viktor@mail.ru  
ORCID: 0009-0005-2430-891X  
SPIN-код: 1628-6134  
Author ID: 848816

**Гринчук Светлана Сергеевна**

научный сотрудник научно-исследовательского  
отдела обитаемости Научно-исследовательского  
центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская  
академия имени С. М. Кирова» МО РФ,  
г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: fotinasvs53@gmail.com  
ORCID: 0009-0006-3323-9781  
SPIN-код: 8459-1211  
Author ID: 878322

**Мулик Александр Борисович**

доктор биологических наук, профессор, старший  
научный сотрудник научно-исследовательского  
отдела медико-психологического сопровождения  
Научно-исследовательского центра,  
ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия  
имени С. М. Кирова» МО РФ, г. Санкт-Петербург, РФ.  
E-mail: mulikab@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-6472-839X  
SPIN-код: 8079-9698  
Author ID: 389323

**Ulesikova Irina Vladimirovna**

Candidate of Biological Sciences, Researcher of the  
Research Department of Habitability of the Research  
Center ,  
S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, RF.

**Shchukina Nella Alekseevna**

Researcher of the Research Department of Habitability  
of the Research Center,  
S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, RF.

**Voronov Viktor Vitalievich**

Candidate of Medical Sciences, Head of the  
Habitability Laboratory of the Research Center,  
S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, RF.

**Grinchuk Svetlana Sergeevna**

Researcher of the Research Department of Habitability  
of the Research Center ,  
S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, RF.

**Mulik Alexander Borisovich**

Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior  
Researcher of the Research Department of Medical  
and Psychological Support of the Research Center ,  
S.M. Kirov Military Medical Academy of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg, RF.

## ВЛИЯНИЕ ИОНОВ МЕДИ НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ДЕКОРАТИВНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ

© 2026. О. В. Фрунзе, А. С. Гриб

Исследовали морфометрические показатели и накопление биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. в условиях загрязнения среды произрастания ионами меди при различных уровнях концентрации, с оценкой влияния токсиканта на рост вегетативных органов и накопление биомассы, а также выявлением видов устойчивых к медному стрессу.

**Ключевые слова:** ростовые процессы, тяжёлые металлы, медь.

**Введение.** Медь является одним из самых распространённых металлов в природе. Человечеству она известна уже более десяти тысяч лет и использовалась разными народами: египтяне, греки, римляне, ацтеки, и китайские культуры [1]. На сегодняшний день медь находит применение в промышленности, энергетике, транспорте, сельском хозяйстве, а также электронике. Более 90 % запасов тяжелого металла сосредоточено в сульфидных рудах, а её содержание в земной коре составляет приблизительно 0,0028 % [2].

Основными источниками загрязнения почв медью являются промышленная деятельность, транспорт, сельское хозяйство (применение удобрений и пестицидов, содержащих медь), сточные воды и атмосферные выбросы [3]. Растения поглощают медь преимущественно в форме ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , которые накапливаются в корневой системе. Поглощение и транспорт меди регулируется специализированными белками-переносчиками (CTR/COPT, ZIP, NRAMP, HMA), обеспечивающими её поступление, распределение и включение в метаболизм [4–7].

Фитодоступность меди определяется физико-химическими свойствами почвы, в первую очередь, pH и содержанием органического вещества: при низком pH доступность меди возрастает, тогда как органические соединения способны её связывать и снижать подвижность [8]. В поддержании клеточного гомеостаза меди важную роль играют восстановительный глутатион и металлошапероны, которые участвуют в детоксикации и внутриклеточном транспорте ионов [4; 9].

Для растений в умеренных концентрациях медь (Cu) является одним из важных микроэлементов, наряду с Fe, Mn, Zn. Однако, избыток меди токсичен для растительного организма и может привести к нарушению метаболизма, фотосинтетических процессов, а также замедлению ростовых показателей [4; 8]. Избыток меди нарушает избирательное поглощение ионов, угнетает фотосинтез и дыхание, индуцирует окислительный стресс за счёт образования активных форм кислорода, что приводит к повреждению клеточных мембран белков и ДНК. В морфологическом плане это проявляется хлорозом, некрозом, угнетением роста корней и побегов, а также снижением биомассы растений [5; 10].

Ионы меди поступают в растения преимущественно в двухвалентной форме ( $\text{Cu}^{2+}$ ), однако перед поглощением они подвергаются восстановлению до одновалентной формы ( $\text{Cu}^+$ ). Данный этап является необходимым условием для их транспорта через клеточные мембраны и дальнейшего включения в метаболические процессы. Восстановление  $\text{Cu}^{2+}$  до  $\text{Cu}^+$  осуществляется с участием специфических ферментов – медных редуктаз [11; 12].

Актуальность работы связана с растущим техногенным загрязнением почв Донецкой Народной Республики тяжелыми металлами, особенно в результате военных действий за последние десять лет, и потребностью в поиске недорогих, экологически безопасных способов очистки, среди которых особое место занимает технология фиторемедиации, целью которой является подбор видов растений, устойчивых к металлопрессингу и обладающих высокой способностью к накоплению биомассы. К основным механизмам фиторемедиации относятся фитоэкстракция, фитостабилизация и ризофильтрация. Эффективность этих процессов оценивается по показателям толерантности и биоконцентрации. Известно, что более 400 видов растений обладают способностью к накоплению тяжёлых металлов, но лишь ограниченное число видов около 10–15 разновидностей способно аккумулировать Cu в концентрациях свыше 1000 мг/кг сухой массы [13], что определяет необходимость поиска и изучения устойчивых видов растений, которые были бы перспективными для применения в технологиях очистки загрязнённых почв.

Целью работы являлось изучение изменения морфометрических показателей и биомассы проростков *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами меди.

**Материал и методика исследования.** В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы декоративные травянистые растения: *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. Исследования влияния ионов меди на растения проводилось по схеме однофакторного пятиуровневого эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Схема эксперимента влияния загрязнения почвы ионами меди на некоторые виды декоративных травянистых растений

| Вариант загрязнения | Концентрации загрязнителя                                      |
|---------------------|--|
|                     | CuSO <sub>4</sub> , мг/кг (в перерасчете на Cu <sup>2+</sup> ) |
| 1                   | 0 (контроль)   |
| 2                   | 0,5 ПДК  |
| 3                   | 1 ПДК  |
| 4                   | 1,5 ПДК  |
| 5                   | 2 ПДК  |

В качестве поллютанта применяли сульфат меди в стехиометрическом соотношении. Уровни концентрации составляли 0 (контроль), 0,5 ПДК, 1 ПДК, 1,5 ПДК, 2 ПДК. Выращивание продолжалось в течение 30 дней в условиях 14-часового светового дня, при температуре 20–22 °С.

В каждый контейнер помещалось 350 г почвы, просеянной через сито с ячейками 3 мм, в которую предварительно вносился сульфат меди «сухим» способом согласно схеме эксперимента.

По завершению эксперимента измерялась длина надземной части и корней проростков.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью специального программного обеспечения по методу Даннета [14].

**Анализ результатов.** Исследования показали, что реакция различных видов растений на загрязнение почвы ионами меди неоднозначна. При низких концентрациях в почве ионы меди не оказывают токсичного воздействия на биоту почвы и растения, тогда как при высоких концентрациях металла проявляется его токсический эффект.

Влияние меди на рост корней проростков значительно различалось между изучаемыми видами. Для *Ageratum houstonianum* Mill. при внесении меди в концентрации 0,5 ПДК наблюдалось увеличение длины корня на 22 % по сравнению с контролем (рис. 1).

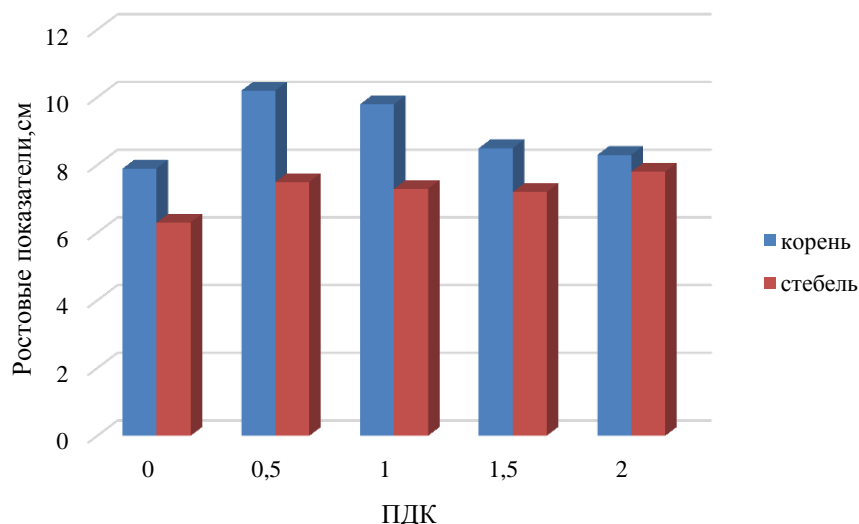


Рис. 1. Влияние загрязнения почвы ионами меди на ростовые показатели проростков *Ageratum houstonianum* Mill.

При концентрации 1 ПДК длина корня увеличивалась на 24 %, а при дальнейшем повышении концентрации до 1,5–2 ПДК рост корня превышал контрольный показатель на 7–8 %, что свидетельствует о стимулирующем действии меди на корневую систему данного вида при умеренных концентрациях и лишь незначительном снижении ростовых показателей при высоких концентрациях.

В свою очередь, у *Calendula officinalis* L. даже при самой низкой концентрации поллютанта 0,5 ПДК наблюдалось уменьшение длины корней на 6 % относительно контроля (рис. 2).

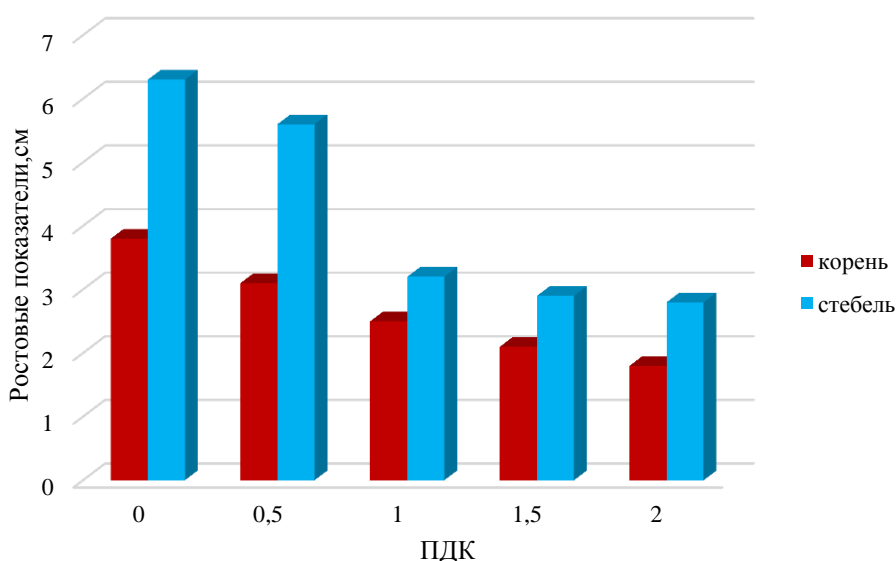


Рис. 2. Влияние загрязнения почвы ионами меди на ростовые показатели проростков *Calendulae officinalis* L.

При 1 ПДК уменьшилась практически в два раза, а при 1,5–2 ПДК – практически в три раза, что сопровождалось фиксацией визуальных признаков угнетения роста (рис. 3).



Рис. 3. Реакция ответа проростков *Calendulae officinalis* L. на избыток в почве ионов меди

Полученные данные свидетельствует о том, что корневая система *Calendula officinalis* L. проявляет высокую чувствительность даже к умеренным концентрациям меди.

Изменение длины стебля у исследуемых видов имеет значительные различия. У *Ageratum houstonianum* Mill при 0,5 ПДК длина стебля увеличилась на 19 % относительно контрольных показателей, при 1–1,5 ПДК – на 14–15%, а при 2 ПДК – на 24 %. Во всех исследуемых вариантах загрязнения прослеживалось тенденция к стимулирующему воздействию меди на надземную часть проростков, что показывает на определённую устойчивость данного вида к токсиканту.

У *Calendulae officinalis* L. наблюдалась обратная тенденция. Уже при 0,5 ПДК длина стебля снижалась на 7 %, при 1 ПДК – на 29 %, а при 1,5–2 ПДК – на 25–38 % (рис. 2). Визуально угнетение проявлялось в замедлении роста, уменьшении площади листовой пластины и появлении некротических участков.

В табл. 2 представлено накопление сырой и сухой биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill при различной концентрации загрязнения почвы ионами меди (0; 0,5; 1; 1,5; 2 ПДК). Установлено, что внесение ионов меди не оказывало выраженного отрицательного влияния на процессы накопления биомассы данного вида, а наблюдалось увеличение данного показателя. Максимальное повышение накопления сырой биомассы отмечено при 0,5 ПДК и составлял 4 % относительно контроля, при 1 ПДК прирост составлял 3 %. При повышении концентрации до 1,5 ПДК наблюдалось незначительное снижение показателя на 2 %, тогда как при 2 ПДК вновь фиксировалось увеличение сырой массы на 1 %. Аккумуляция сухой биомассы оставалась стабильной и варьировала в пределах от 2 до 4 %, не демонстрируя существенных отклонений от контрольных значений, что свидетельствует об устойчивости *Ageratum houstonianum* Mill. к загрязнению почвы медью.

В отличие от этого, у *Calendulae officinalis* L. воздействие ионов меди приводило к выраженному угнетению процессов накопления биомассы. Причём отрицательный эффект проявлялся уже при минимальной концентрации поллютанта (табл. 3).

Таблица 2

Накопление биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill.

| № варианта | Масса 1 проростка, г |        |                |             |       |                |
|------------|----------------------|--------|----------------|-------------|-------|----------------|
|            | Сырая                |        |                | Сухая       |       |                |
|            | M ± m                | D      | D <sup>%</sup> | M ± m       | D     | D <sup>D</sup> |
| 1          | 0,365±0,023          | –      | –              | 0,022±0,024 | –     | –              |
| 2          | 0,398±0,02           | 0,033  | 109,04         | 0,029±0,023 | 0,007 | 131,82         |
| 3          | 0,389±0,023          | 0,024  | 106,58         | 0,029±0,023 | 0,007 | 131,82         |
| 4          | 0,36±0,024           | -0,005 | 98,63          | 0,027±0,023 | 0,005 | 122,73         |
| 5          | 0,367±0,024          | 0,002  | 100,55         | 0,025±0,024 | 0,003 | 113,64         |

Примечание: D – разница между средними; D<sup>%</sup> – % от контроля

Таблица 3

Накопление биомассы проростками *Calendulae officinalis* L.

| № варианта | Масса 1 проростка, г |        |                |            |        |                |
|------------|----------------------|--------|----------------|------------|--------|----------------|
|            | Сырая                |        |                | Сухая      |        |                |
|            | M ± m                | D      | D <sup>%</sup> | M ± m      | D      | D <sup>D</sup> |
| 1          | 0,702±0,10           | –      | –              | 0,042±0,07 | –      | –              |
| 2          | 0,655±0,09           | -0,047 | 93,30          | 0,035±0,07 | -0,007 | 83,33          |
| 3          | 0,552±0,09           | -0,15  | 78,63          | 0,032±0,06 | -0,01  | 76,19          |
| 4          | 0,232±0,07           | -0,47  | 33,05          | 0,021±0,05 | -0,021 | 50             |
| 5          | 0,122±0,07           | -0,58  | 17,38          | 0,022±0,05 | -0,02  | 52,38          |

Примечание: D – разница между средними; D<sup>%</sup> – % от контроля

Так при внесении 0,5 ПДК отмечалось снижение сухой биомассы на 2 % по сравнению с контролем, что свидетельствует о высокой чувствительности данного вида к меди. С увеличением концентрации до 1 ПДК угнетающее действие усиливалось и снижение показателей достигало 3 %. Максимальный токсический эффект фиксировался при 2 ПДК, сухая биомасса уменьшалась на 5 %.

**Выводы.** Загрязнение среды произрастания ионами меди оказывает неоднозначное влияние на ростовые процессы и накопление биомассы проростков декоративных травянистых растений, что определяется видоспецифическими и физиологическими особенностями, а также уровнем и характером загрязнения.

Установлено, что *Ageratum houstonianum* Mill. характеризуется относительной устойчивостью к повышенным концентрациям меди, что проявляется в отсутствии угнетения ростовых процессов и сохранении стимулирования морфометрических показателей, а также стабильности накопления биомассы при разных концентрациях меди. Выявленная устойчивость свидетельствует о потенциальной пригодности данного вида для внедрения в технологии фиторемедиации при восстановлении почв, загрязнённых медью.

*Calendulae officinalis* L., напротив, демонстрирует высокую чувствительность к ионам меди, что выражается в угнетении ростовых процессов, снижении биомассы и развитии негативных морфологических изменений по мере увеличения концентрации токсиканта. Указанные особенности позволяют рассматривать данный вид в качестве биоиндикатора загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Диагностика и оптимизация беллигеративных экотопов Донбасса методами биомониторинга и фиторемедиации» (№ FRRE-2026-0030, регистрационный номер ПТНИ 1025073000026-6-1.6.19).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alloway, B.J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In: alloway, B. (eds) heavy metals in soils / B.J. Alloway // *Environmental pollution*. – 2013. – Vol. 22. – P. 11-50.
2. Алтынбекова, М.О. Исследование содержания меди в почве и растениях / М.О. Алтынбекова, Д.К. Сулайманова // Студенческий научный форум – 2018 : Материалы X Международной студенческой научной конференции. – Москва, 2018. – 3 с.
3. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова г. Северодвинска / Ю. С. Коробицина, Л. Ф. Попова, А. И. Васильева, Т. В. Усачева // *Научный диалог*. – 2013. – № 3(15): Естествознание. Экология. Науки о земле. – С. 75–93.
4. Елизарьева, Е.Н. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов. / Е.Н. Елизарьева, Ю.А. Янбаев, А.Ю.Кулагин // *Вестник Удмуртского университета: Биология. Науки о земле*.– 2016. – Т. 26, № 3. – С. 7-19.
5. Кушина, И.В. Календула – популярное лекарственное и декоративное растение / И.В. Кушина, М. Ю. Карпукhin // *Аграрное образование и наука*. – 2019. – № 3 – 5 с.
6. Phytotechnologies: importance in remediation of heavy metal-contaminated Soils / M. Khan, A. Zaidi, R. Goel, J. Musarrat // *Iomanagement of metal-contaminated soils. Environmental pollution*. – 2011. – Vol. 20. – P. 277-295
7. Puig, S. Function and regulation of the plant COPT family of high-Affinity copper transport proteins / S. Puig // *Advances in Botany*. – 2014. – 9 p.
8. Иванищев, В.В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях / В.В. Иванищев // *Известия ТулГУ. Естественные науки*. – 2020. – № 1. – С. 33-41.
9. Бочарников, В.С. Способ биологической очистки почвы, загрязненной тяжелыми металлами / В.С. Бочарников // *Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2022. –Т. 2 (66). – С. 347-353. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-43
10. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil / A. Miotto, C.A. Ceretta, G. Brunetto, F.T. Nicoloso // *Plant Soil*. – 2014. – Vol. 374 – P. 593–610
11. Copper is absorbed by plants in form. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.toppr.com/ask/question/copper-is-absorbed-by-plants-in-form/> (дата обращения: 06.11.2023)
12. Nutrient and toxin all at once: How plants absorb the perfect quantity of minerals. *ScienceDaily*. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120412105428.htm> (дата обращения: 06.11.2023)
13. Елисеева, Т. Календула (Ноготки, лат. *Caléndula*) / Т. Елисеева // *Журнал здорового питания и диетологии*. – 2018. – № 4. – С 1-11
14. Williams, L.E. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants/ L.E. Williams, J.K. Pittman, J.L. Hall // *Biochimica et Biophysica Acta Biomembrane*.– 2000. – P. 104-126

## REFERENCES

1. Alloway, B.J. (2013) Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Environmental Pollution*. 22, 11-50
2. Altynbekova, M.O. & Sulaimanova D.K. (2018) Research on the Content of Copper in Soil and Plants / M.O. Altynbekova, D.K. Sulaimanova // *Materials of the X International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum»*. 1-4. (In Russian)
3. Korobitsina, Yu.S., Popova, L.F., Vasilieva, A.I. & Usacheva, T.V. (2013) [Ecological assessment of heavy metal contamination of soils in Severodvinsk]. *Nauchnyj dialog = Scientific Dialogue*. 3(15), 75-93. (In Russian)
4. Elizarijeva, E.N., Yanbaev, Yu.A. & Kulagin, A.Yu. (2016) [Features of selection of phytoremediation technologies for purification of soils and wastewater from heavy metal ions]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. 26 (3), 7-19. (In Russian)
5. Kushina, I.V. & Karpukhin, M.Yu. (2019) [Calendula – a popular medicinal and ornamental plant]. *Agrarnoe obrazovanie i nauka = Agrarian Education and Science*. 3, 5. (In Russian)
6. Khan, M., Zaidi, A., Goel, R. & Musarrat, J. (2011) Phytotechnologies: importance in remediation of heavy metal-contaminated soils. *Iomanagement of Metal-Contaminated Soils. Environmental Pollution*. 20, 277-295.
7. Puig, S. (2014) *Function and regulation of the plant COPT family of high-affinity copper transport proteins*. In: *Advances in Botany*. 9 p.

8. Ivanishchev, V.V. (2020) [Bioaccumulation, homeostasis and toxicity of copper in plants]. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki = Proceedings of Tula State University. Natural Sciences.* 1, 33-41. (In Russian)
9. Bocharnikov, V.S. (2022) [Method of biological remediation of soil contaminated with heavy metals]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education.* 2 (66), 347–353. DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-43 (In Russian)
10. Miotto, A., Ceretta, C.A., Brunetto, G. & Nicoloso, F.T. (2014) Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. *Plant and Soil.* 374, 593–610.
11. Toppr (2023). Copper is absorbed by plants in form. Retrieved from: <https://www.toppr.com/ask/question/copper-is-absorbed-by-plants-in-form/>
12. Nutrient and toxin all at once: How plants absorb the perfect quantity of minerals. Retrieved from: <https://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120412105428.htm>
13. Eliseeva, T. (2018) [*Calendula* (Marigold, lat. *Calendula*)]. *Zhurnal zdorovogo pitaniya i dietologii = Journal of Healthy Nutrition and Dietetics.* 4, 1–11. (In Russian)
14. Williams, L.E., Pittman, J.K. & Hall, J.L. (2000) Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta Biomembrane,* 1465, 104-126

Поступила в редакцию 21.04.2026 г.

#### EFFECT OF COPPER IONS ON GROWTH PROCESSES OF SOME ORNAMENTAL HERBACEOUS PLANTS

*O. V. Frunze, A. S. Grib*

Morphometric indicators and biomass accumulation by *Ageratum houstonianum* Mill. and *Calendula officinalis* L. seedlings were studied under conditions of copper ions pollution of the growing medium at different levels of their concentration, with an assessment of the toxicant effect on the growth of the root system and the above-ground part of plants, as well as the identification of specific features of resistance to copper stress.

**Keywords:** growth processes, heavy metals, copper.

**Фрунзе Оксана Валентиновна**

Кандидат технических наук, доцент;  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: hromyh82@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-1082-7012  
Spin-код: 6993-6990

**Frunze Oksana**

Candidate of Technical Sciences, Docent;  
Donetsk State University,  
Donetsk, DPR, RF.

**Гриб Алина Сергеевна**

Студент 2 курса магистратуры;  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: alinagrib03@mail.ru

**Grib Alina Sergeevna**

2nd year Graduate student;  
Donetsk State University,  
Donetsk, DPR, RF.

**РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «КУЛЬТИВИРУЕМАЯ ДЕНДРОФЛОРА  
ЮГО-ВОСТОЧНОГО БЕРЕГА КРЫМА»**

© 2026. *О. С. Горецкий, В. О. Корниенко*

В 2025 году издательство «АЛЕФ» (г. Махачкала) выпустило монографию Клименко Н.И., Потапенко И.Л., Летуховой В.Ю., Клименко О.Е. «Культивируемая дендрофлора Юго-Восточного берега Крыма». Это фундаментальная работа по изучению и сохранению культурных древесных растений в специфических природно-климатических условиях Юго-Восточного берега Крыма (ЮВБК). Исследования, выполненные ведущими специалистами в области дендрологии, экологии и ландшафтной архитектуры, вносят существенный вклад в отечественную науку и практику озеленения и рекреационного освоения территорий. Монография содержит детальный анализ природно-климатических особенностей региона, обзор интродукции древесных растений и истории озеленения ЮВБК. Центральное место занимает всестороннее изучение культивируемой дендрофлоры: таксономический состав, биоморфологическая и флористическая характеристика, оценка экологической пластичности и интродукционного потенциала видов. Особое внимание уделено биоэкологической оценке растений, включая зимостойкость, засухоустойчивость и декоративность, что имеет практическое значение для создания устойчивых фитоценозов. В работе приведены научно обоснованные рекомендации по озеленению населенных пунктов ЮВБК и ассортимент перспективных древесных растений для региона. Монография будет ценным пособием для специалистов в области лесного хозяйства и зеленого строительства, а также работников декоративного садоводства.

**Ключевые слова:** дендрофлора; Юго-Восточный берег Крыма (ЮВБК); культивируемые растения; интродукция; озеленение; ландшафтная архитектура; биоэкологическая оценка растений; декоративные растения; экологические факторы; ассортимент растений.

В 2025 году издательством «АЛЕФ» (г. Махачкала) опубликована монография Клименко Н. И., Потапенко И. Л., Летухова В. Ю., Клименко О. Е. «Культивируемая дендрофлора Юго-Восточного берега Крыма» [1].

Монография представляет собой фундаментальный труд, посвященный значимой и актуальной проблеме – изучению и сохранению культурных древесных растений на Юго-Восточном берегу Крыма (далее – ЮВБК). Работа, выполненная коллективом авторитетных специалистов в области дендрологии, экологии и ландшафтной архитектуры, является ценным вкладом в отечественную науку и практическую деятельность по озеленению и рекреационному использованию территорий.

Монография построена логично и структурированно с подробным описанием природно-климатических условий региона, что является основополагающим фактором для успешного культивирования растений. Авторы детально анализируют рельеф, климат, растительность и почвы ЮВБК, создавая комплексное представление о среде, в которой осуществляется интродукция и последующее развитие древесных видов растений.

Особое внимание уделено объектам и методам исследований, научной обоснованности и достоверности полученных результатов. Важным разделом монографии является подробный обзор интродукции древесных растений и истории создания зеленых насаждений на ЮВБК. Проведенный исторический экскурс позволяет проследить динамику развития дендрофлоры региона, выявить успешные и менее удачные практики, что особенно ценно для будущих интродукционных проектов.

Центральное место в работе занимает обширный анализ культивируемой дендрофлоры, включающий таксономический состав, биоморфологическую и флористическую характеристику видов, их экологическую пластичность и особенности интродукции. Полученные результаты, представленные в виде таблиц, графиков и карт, наглядно демонстрируют видовое разнообразие, частоту встречаемости и декоративный потенциал древесных растений в условиях ЮВБК.

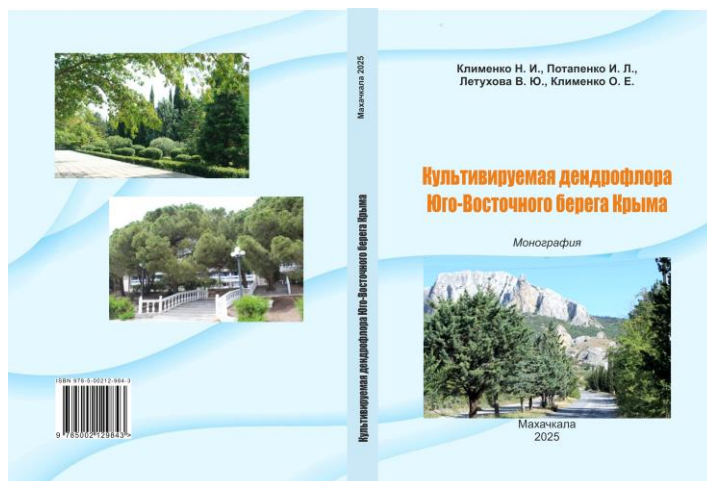


Рис. 1. Обложка монографии

Существенно проработаны вопросы биоэкологической оценки интродуцированных и аборигенных древесных растений. Исследование зимостойкости, засухоустойчивости, декоративности, фитонцидности и генеративной способности видов позволило комплексно оценить их потенциал для применения в различных типах зеленых насаждений. Результаты и выводы этих исследований, имеют важное практическое значение для специалистов, занимающихся интродукцией и формированием устойчивых и декоративных фитоценозов.

Раздел, посвященный озеленению населенных пунктов ЮВБК, отличается особой актуальностью. Проведенный детальный анализ существующих зеленых насаждений в различных населенных пунктах региона, позволил выявить их достоинства и недостатки. Результаты данного анализа легли в основу разработки научно обоснованных рекомендаций по формированию полноценных, функционально и эстетически разнообразных зеленых зон.

Завершающая глава монографии представляет собой практический результат многолетней работы авторов – рекомендуемый ассортимент перспективных древесных растений для ЮВБК, адаптированных к местным условиям и отвечающих современным требованиям ландшафтной архитектуры. Эта глава, несомненно, станет пособием для специалистов, проектирующих и создающих зеленые насаждения в Крыму и других регионах с аналогичными климатическими условиями.

Следует отметить качество иллюстративного материала, который дополняет и визуализирует представленные данные, облегчая их восприятие и осмысление. Авторы продемонстрировали высокий профессионализм, умело синтезировав большой объем информации и представили ее в доступной и убедительной форме.

Работа имеет как фундаментальное, так и прикладное значение, представляя значительный интерес для ученых, практиков, студентов и всех, кто занимается интродукцией, селекцией, озеленением и сохранением природного наследия.

Желаем авторам дальнейших успехов в их плодотворной деятельности на благо отечественной науки и природы!

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Н. И., Потапенко И. Л., Летухова В. Ю. Клименко О. Е. Культивируемая дендрофлора Юго-Восточного берега Крыма. – Махачкала: Издательство АЛЕФ, 2025. – 263 с.

## REFERENCES

1. Klimenko N. I., Potapenko I. L., Letukhova V. Yu. Klimenko O. E. Cultivated dendroflora of the South-Eastern coast of Crimea. Makhachkala: ALEF Publishing Hous, 2025. – 263 p. (in Russian).

## REVIEW OF THE MONOGRAPH "CULTIVATED DENDROFLORA OF THE SOUTH-EASTERN COAST OF CRIMEA"

*O. S. Goretsky, V. O. Kornienko*

In 2025, ALEF Publishing House (Makhachkala) published a monograph by N.I. Klimenko, I.L. Potapenko, V.Yu. Letukhova, and O.E. Klimenko, "Cultivated Dendroflora of the Southeastern Coast of Crimea." This fundamental work on the study and conservation of cultivated woody plants in the specific natural and climatic conditions of the Southeastern Coast of Crimea (SECC). The research, conducted by leading experts in dendrology, ecology, and landscape architecture, makes a significant contribution to domestic science and practice of landscaping and recreational development. The monograph contains a detailed analysis of the region's natural and climatic characteristics, an overview of woody plant introductions, and the history of landscaping in the SECC. The central focus is a comprehensive study of cultivated dendroflora: taxonomic composition, biomorphological and floristic characteristics, assessment of ecological flexibility, and species introduction potential. Particular attention is paid to the bioecological assessment of plants, including winter hardiness, drought tolerance, and ornamental value, which is of practical importance for the creation of sustainable phytocenoses. The work provides scientifically based recommendations for landscaping settlements in the Southeastern Bank of Crimea and a selection of promising woody plants for the region. This monograph will be a valuable resource for forestry and landscaping specialists, as well as ornamental gardeners.

**Keywords:** dendroflora; South-Eastern Coast of Crimea (SECC); cultivated plants; introduction; landscaping; landscape architecture; bioecological assessment of plants; ornamental plants; environmental factors; plant assortment.

*Поступила в редакцию 27.05.2026 г.*

### *Горецкий Олег Степанович*

доктор биологических наук, профессор;  
декан биологического факультета, профессор  
кафедры физиологии и биофизики;  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: fcl.bio.dean@mail.ru  
ORCID: 0009-0000-8259-0494  
SPIN-код: 5889-4356  
AuthorID: 1033968

### *Goretsky Oleg Stepanovich*

Doctor of Biological Sciences, Professor;  
Dean of the Faculty of Biology, Professor of the  
Department of Physiology and Biophysics;  
Donetsk State University,  
Donetsk, DPR, RF.

### *Корниенко Владимир Олегович*

кандидат биологических наук;  
заведующий научно-исследовательской частью,  
доцент кафедры физиологии и биофизики;  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.  
E-mail: kornienkovo@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-7728-8116  
SPIN-код: 9041-9620  
AuthorID: 958435

### *Kornienko Vladimir Olegovich*

candidate of biological sciences, head of Research  
Department, associate professor of Physiology and  
Biophysics Department;  
Donetsk State University,  
Donetsk, DPR, RF.

*Научное издание*

**Вестник Донецкого национального университета.  
Серия А: Естественные науки**

**2026. – № 2**

Технический редактор: *М.В. Фоменко*

Свидетельство о регистрации СМИ ДНР Серия ААА № 000077 от 21.11.2016 г.

---

Адрес редакции:  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
ул. Университетская, 24,  
283001, г. Донецк, ДНР, РФ.  
Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92.  
E-mail: [vestnikdonnu\\_a@mail.ru](mailto:vestnikdonnu_a@mail.ru)  
URL: <http://donnu.ru/vestnikA>, <http://dongu-vestnik01.ru/>

---