

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

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

3/2024

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

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

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

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

Члены редколлегии: д-р биол. наук, проф. *В.В. Акатов*, д-р хим. наук, проф. *А.С. Алемасова*; д-р биол. наук, проф. *В.Г. Артюхов*; канд. хим. наук, доц. *О.В. Баранова*; канд. хим. наук, доц. *С.Г. Бахтин*; д-р хим. наук, доц. *Н.И. Белая*; канд. хим. наук, доц. *А.В. Белый*; д-р философии, проф. *С.В. Белый*; д-р пед. наук, доц. *Т.В. Вардун*; д-р физ.-мат. наук, проф. *Вал.В. Волчков*; д-р физ.-мат. наук, проф. *Вит.В. Волчков*; д-р биол. наук, проф. *А.З. Глухов*; д-р физ.-мат. наук, проф. *А.С. Гольцев*; д-р биол. наук, доц. *С.Н. Горбов*; д-р физ.-мат. наук, проф. *Г.В. Горр*; д-р хим. наук, проф. *А.В. Гулевская*; д-р биол. наук, доц. *Т.В. Денисова*; д-р хим. наук, проф. *В.Д. Дяченко*; д-р физ.-мат. наук, проф. *В.П. Заставный*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А.В. Зыза*; д-р геогр. наук, проф. *К.Ш. Казеев*; д-р биол. наук, проф. *В.Н. Калаев*; канд. биол. наук, доц. *Е.А. Калаева*; д-р физ.-мат. наук, проф. *С.А. Калоеров*; д-р биол. наук, с.н.с. *О.Е. Клименко*; д-р с-х наук, проф. *С.И. Колесников*; д-р физ.-мат. наук, доц. *Б.И. 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 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*; канд. мед. наук, доц. *В.В. Труш*; д-р хим. наук *Т.Г. Тюрин*; д-р биол. наук, доц. *М.Г. Холявка*; д-р хим. наук, доц. *И.Н. Щербаков*.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Протокол № 10 от 13.09.2024 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2024

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А. Естественные науки

№ 3

Донецк 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Химические науки

- Будникова Е.А., Белая Н.И., Белый А.В., Кулик Е.В.* Хемилюминесцентное исследование антирадикальной активности композиций кофейной кислоты с моно- и дисахаридами 3
- Кравченко Е.М., Макурина О.В., Дорошкевич В.С.* Определение пероксидазной активности с использованием стоп-реагента 11
- Михальчук В.М., Лыга Р.И., Верескун А.Д., Мальцева Н.А., Николаева О.Ф.* Титаноксидный наполнитель в составе эпоксидных композитов, полученных золь-гель методом 19

Биологические науки

- Брук Т.М., Менькова Н.С., Баскаков И.С.* Влияние анаэробной физической нагрузки на уровень постоянных потенциалов коры головного мозга спортсменов 31
- Достовалова Д.А., Глухов А.З., Подгородецкий Н.С.* Пылеудерживающие свойства древесных растений на породных отвалах Донбасса 38
- Гайворонская А.А., Анищенко Л.Н.* Оценка состояния некоторых старинных усадебных парков Нечерноземья РФ по критериям биологической устойчивости лесных сообществ 44
- Губарев А.А., Павлов В.Н., Легенький Ю.А., Беспалова С.В.* Движение магнитомаркированных клеток над полосовой доменной структурой. Эксперимент и моделирование 57
- Пирко И.Ф., Корниенко В.О.* Ресурсы флоры юга Восточно-Европейской равнины. Аборигенные виды злаков для придорожного озеленения Донецко-Макеевской агломерации 65
- Потапенко И.Л., Клименко Н.И., Летухова В.Ю.* Биоморфологическая характеристика культивируемой дендрофлоры Юго-Восточного берега Крыма 79
- Сафонов А.И., Догадкин Д.Н., Неспирный В.Н.* Фитохимические особенности некоторых отвалов угольных шахт в Донбассе 86
- Царева И.А., Иванова Г.Т., Лобов Г.И.* Особенности функционального состояния сосудов микроциркуляторного русла и брыжеечных артерий у самцов крыс линии SHR и Wistar Kyoto при индуцировании метаболического синдрома фруктозной диетой на ранних этапах развития 100

CONTENTS

Chemical sciences

- Budnikova E.A., Belaya N.I., Bely A.V., Kulik E.V.* Chemiluminescent study of anti-radical activity of compositions of mono- and disaccharides with caffeic acid 3
- Kravchenko E.M., Makurina O.V., Doroshkevich V.S.* Determination of peroxidase activity using stop reagent 11
- Mikhal'chuk V.M., Lyga R.I., Vereskun A.D., Maltseva N.A., Nikolaeva O.F.* Titanium oxide filler in epoxy composites produced by sol-gel method 19

Biological sciences

- Brook T.M., Menkova N.S., Baskakov I.S.* The effect of anaerobic physical activity on the level of constant potentials of the cerebral cortex of athletes 31
- Dostovalova D.A., Glukhov A.Z., Podgorodetsky N.S.* Dust-retaining properties of woody plants on the rock dumps of Donbass 38
- Gaivoronskaya A.A., Anishchenko L.N.* On the assessment of the state of some old estate parks in the Non-Black Earth Region of the Russian Federation by the criteria of biological stability of forest communities 44
- Gubarev A.A., Pavlov V.N., Legenkiy Y.A., Bespalova S.V.* Movement of magnetic marked cells over the a strip domain structure. Experiment and simulation 57
- Pirko I.F., Kornienko V.O.* Plant resources of the south of the East European plain. Native types of cereals for landscaping of roadside territories of the Donetsk-Makeyevka agglomeration 65
- Potapenko I.L., Klimenko N.I., Letukhova V.Yu.* Biomorphological characteristics of cultivated dendroflora of the South-Eastern Coast of Crimea 79
- Safonov A.I., Dogadkin D.N., Nesporny V.N.* Phytogeochemical features of some coal mine dumps in the Donbass 86
- Tsareva I.A., Ivanova G.T., Lobov G.I.* Peculiarities of functional state of microcirculatory vessels and mesenteric arteries in male SHR and Wistar Kyoto rats when metabolic syndrome is induced by fructose diet at early stages of development 100

Х И М И Ч Е С К И Е Н А У К И

УДК 544.43:547.565

DOI: 10.5281/zenodo.13745927

EDN: BLYFAL

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИРАДИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ КОМПОЗИЦИЙ КОФЕЙНОЙ КИСЛОТЫ С МОНО- И ДИСАХАРИДАМИ

© 2024. *Е.А. Будникова, Н.И. Белая, А.В. Белый, Е.В. Кулик*

Методом активированной хемилюминесценции установлен антирадикальный синергический эффект бинарных композиций кофейной кислоты с моно- и дисахаридами в реакции с амидиноизопропанпероксидами, генерируемыми в процессе термолиза гидрофильного азоинициатора 2'-азобис(2-амидинопропан)дигидрохлорида в водных средах с рН 2–9 при температуре 323 ± 2 К. Максимальный эффект синергизма, равный 150 %, проявила смесь кофейной кислоты с лактозой в соотношении 50 : 50 в солянокислом буфере с рН 2. Установлено, что с уменьшением кислотности среды сверхаддитивный эффект фенольно-сахаридной композиции снижается. Возможный механизм синергизма заключается в образовании водородного комплекса между кофейной кислотой и углеводом.

Ключевые слова: кофейная кислота, сахарид, антирадикальная активность, синергизм, радикал.

Введение. Растительные фенольные соединения – это многочисленная группа веществ, обладающих выраженными антиоксидантными, антирадикальными, противовоспалительными, капилляроукрепляющими и иммуномодулирующими свойствами [1–3]. Считается [4–6], что дополнительное введение фенолов растительного происхождения в пищевые системы приводит к выраженному благоприятному воздействию на организм человека, однако это не всегда так. Использование фенольных соединений в качестве функциональных пищевых добавок часто ограничено из-за их низкой растворимости в воде, плохой проницаемости через мембраны клеток и низкой термостабильности. Кроме того, пищевые продукты представляют собой сложные химические системы, компоненты которых могут оказывать существенное влияние на активность фенолов, образуя с ними композиции как с синергическим, так и с антагонистическим эффектом. Понимание механизмов взаимодействия растительных фенолов с основными группами соединений, присутствующими в пищевых продуктах, такими как углеводы, белки и липиды, позволит регулировать спектр биологической активности фенольных соединений в их составе.

Природные фенолы образуют с компонентами пищевой системы преимущественно нековалентные конъюгаты, реже возможно формирование между ними ковалентных связей [7, 8]. Водородные связи образуются преимущественно между фенольными соединениями и белками. В основе фенольно-углеводных взаимодействий, как правило, также лежит образование слабых Н-связей, которые формируются между гидроксильными группами фенолов и атомами кислорода углеводов [9, 10]. Такого типа взаимодействия с компонентами пищи могут изменить как биодоступность фенольных соединений, так и их биоактивность, в частности антиоксидантную и антирадикальную активности.

Цель данной работы – исследование антирадикального синергического эффекта бинарных композиций кофейной кислоты (ArOH) с моно- и дисахаридами (Sacch) методом активированной хемилюминесценции в реакции с 2-амидинопропанпероксидами (APOO^{*}), генерируемыми в процессе термоллиза гидрофильного азоинициатора 2'-азобис(2-амидинопропан)дигидрохлорида (AAPH) в водных средах с pH 2–9 при температуре 323 ± 2 К.

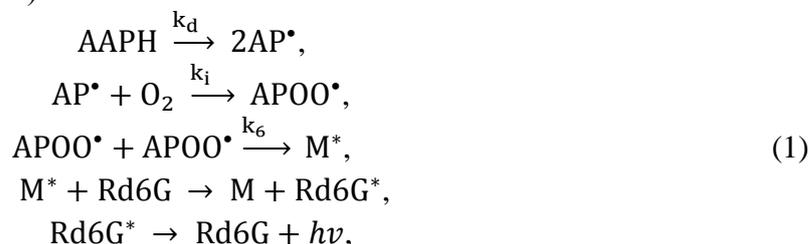
Методика эксперимента. Кофейную кислоту (Acros Organics; >99 %), относящуюся к группе растительных фенольных соединений, и углеводы – D(+)-глюкозу (Glu) (Sigma-Aldrich; ≥ 99.5 %), D(+)-маннозу (Man) (Acros Organics; 99 %), D(–)-фруктозу (Fru) (Alfa Aesar; 99 %), L(+)-рамнозу моногидрат (Acros Organics; 99 %), D(+)-мальтозу моногидрат (Acros Organics; 99 %), D(+)-лактозу моногидрат (Acros Organics; 98 %) использовали без предварительной очистки. В качестве активатора свечения применяли родамин 6Ж (Rd6G) (Merck; ≥ 98 %), гидрофильный генератор свободных радикалов – 2,2'-азобис(2-амидинопропан)дигидрохлорид (AAPH) (Sigma-Aldrich; 97 %). Диметилсульфоксид (ДМСО) (Panreac; 99,5 %) использовали для повышения растворимости фенолов в смеси с солянокислым (pH = 2), фосфатно-цитратным (pH = 7,35) и фосфатно-боратным (pH = 9) буферами.

Методом хемилюминесценции (ХЛ) определяли эффекты синергизма фенольно-сахаридных композиций ArOH–Sacch в реакции с пероксирадикалами APOO^{*}, генерируемыми при термическом распаде AAPH в буферном растворе с pH от 2 до 9 при $T = 323 \pm 2$ К. Кофейную кислоту, сахараиды и их смеси в разных соотношениях растворяли в 1 мл диметилсульфоксида и 4 мл буферного раствора, а затем аликвоту этого раствора (0,2 мл) вводили в смесь (4,8 мл), содержащую азоинициатор AAPH и активатор свечения Rd6G. Полученный раствор помещали в термостатируемую кювету хемилюминометра и барботировали воздухом для насыщения кислородом и перемешивания. Скорость подачи газа в реакционную смесь составляла $0,6–0,8$ мл·с⁻¹, что не влияло на интенсивность хемилюминесцентного свечения и соответствовало кинетической области протекания реакции. Температура проведения эксперимента, равная 323 ± 2 К, соответствовала температуре, при которой AAPH распадается на радикалы с постоянной скоростью. Кинетический эксперимент повторялся не менее 3 раз. Значения константы скорости реакции распада AAPH на радикалы ($k_d = 7,1 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹) и выхода радикала из клетки ($e = 0,48$) при pH = 7,4 и $T = 323$ К брали из работ [11, 12]. Скорость иницирования (генерирования) пероксирадикалов рассчитывали по формуле $v_i = 2ek_d[AAPH]$ [13, 14]. Измерения проводили с помощью хемилюминесцентной установки (фотоумножитель ФЭУ-38), принципиальная схема которой описана в работах [13, 15], с цифровой обработкой сигнала посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-305 с пакетом программного обеспечения «PowerGraph» производства «LCARD» (Россия). Активатор Rd6G усиливает ХЛ, но не влияет на кинетику ее затухания. Область свечения, определенная с помощью граничных светофильтров, совпадает с областью флуоресценции Rd6G $\lambda = 550–650$ нм [16]. Таким образом, электронно-возбужденный краситель является эмиттером наблюдаемой ХЛ. В спектрах поглощения Rd6G, снятых после реакции, не наблюдается заметных изменений. Это является косвенным аргументом в пользу того, что краситель не вовлекается в реакцию, а проявляет себя как физический активатор ХЛ.

Процесс комплексообразования кофейной кислоты с моно- и ди сахараидами исследовали методом УФ-спектроскопии при условии постоянной концентрации фенолокислоты ($3 \cdot 10^{-5}$ моль·л⁻¹) и переменной концентрации углевода ($3 \cdot 10^{-4}–1 \cdot 10^{-2}$ моль·л⁻¹) в композиции. Определяли изменение оптической плотности

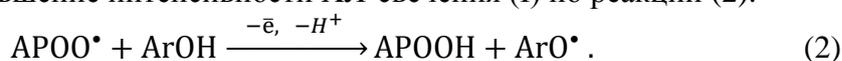
раствора ArOH в зависимости от концентрации сахара. Эксперимент проводили при температуре 293 ± 2 К в солянокислым буфере с $\text{pH} = 2$.

Анализ результатов. В реакции (1) рекомбинации APOO^\bullet , генерируемых при распаде ААРН, может возникать ХЛ (I_0) [13], которая усиливается активатором свечения родамином бЖ (Rd6G):



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

При добавлении в систему антиоксиданта (АО) – кофейной кислоты наблюдается (рис. 1) уменьшение интенсивности ХЛ-свечения (I) по реакции (2):



При высоких концентрациях АО заметен период индукции (τ) реакции, но при этом ХЛ не ослабляется до нуля, что связано с появлением молекулярной ХЛ (I_{mol}) с участием активатора свечения. Относительная интенсивность I_{mol} постоянна и определяется, когда в реакционной смеси присутствует только растворитель и Rd6G, и ее величина не превышает 0,3–0,4.

Величину τ определяли в точке перегиба ХЛ-кривой, абсциссу которой вычисляли из условия, что вторая производная в точке перегиба равна нулю. Из полученных кинетических кривых ХЛ видно (рис. 1), что кофейная кислота активно реагирует с APOO^\bullet , и тем самым проявляет выраженную антирадикальную активность. Глюкоза не окисляется пероксирадикалами, но при этом в определенной концентрации в смеси с кофейной кислотой способна усиливать ее антирадикальное действие, проявляя тем самым функции синергиста.

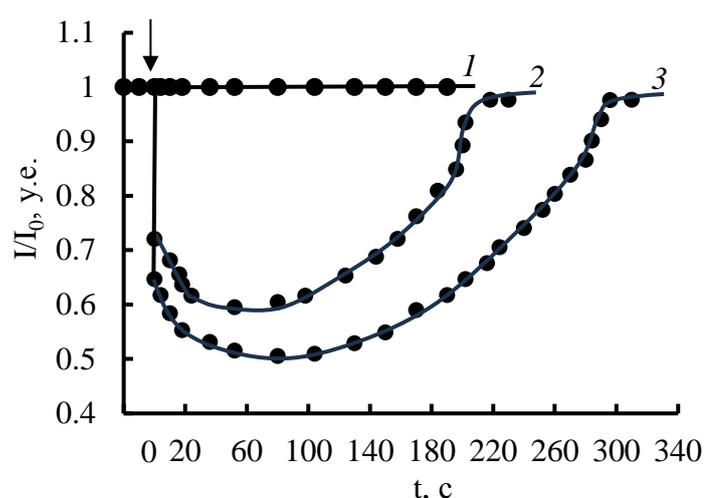


Рис. 1. Кинетика относительной интенсивности ХЛ (I/I_0) при окислении ААРН в фосфатно-цитратном буфере с $\text{pH} = 7,35$ после введения: 1 – глюкозы ($1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹); 2 – кофейной кислоты ($1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹); 3 – смеси кофейной кислоты с глюкозой (60:40) (суммарная концентрация моль $1 \cdot 10^{-4}$ л⁻¹). Момент введения АО показан стрелкой. $T = 323 \pm 2$ К, $\nu_i = 4,97 \cdot 10^{-7}$ моль·л⁻¹·с⁻¹; $[\text{Rd6G}] = 3 \cdot 10^{-3}$ моль·л⁻¹

Для определения наиболее эффективных композиций варьировали соотношение кофейной кислоты и углевода при постоянной суммарной концентрации смеси. Величину синергического эффекта (SE) оценивали по увеличению антирадикальной активности смеси по сравнению с аддитивным действием кофейной кислоты и сахара, используя величину периода индукции окисления ArOH:

$$SE = \frac{\tau_{см.} - \tau_{адд.}}{\tau_{адд.}} \cdot 100\% = \frac{\Delta\tau}{\tau_{адд.}} \cdot 100\%,$$

где $\tau_{см.}$ – период индукции реакции $АРОО^{\bullet}$ со смесью кофейной кислоты с сахаридом; $\tau_{адд.} = \tau_{ArOH} + \tau_{Sacch}$ – величина периода индукции в предположении, что действие смеси аддитивно; τ_{ArOH} – период индукции реакции окисления кофейной кислоты радикалом $АРОО^{\bullet}$; τ_{Sacch} – период индукции реакции $АРОО^{\bullet}$ с сахаридом.

Анализ зависимости величины SE от состава композиции в нейтральном буфере показал, что максимальный синергический эффект (SE_{max}) проявляется при соотношении ArOH–Sacch как 60 : 40 или 50 : 50 (рис. 2). При этом наблюдается общая закономерность – SE_{max} определяется только тогда, когда в смеси концентрация сахара не превышает концентрации кофейной кислоты (табл. 1).

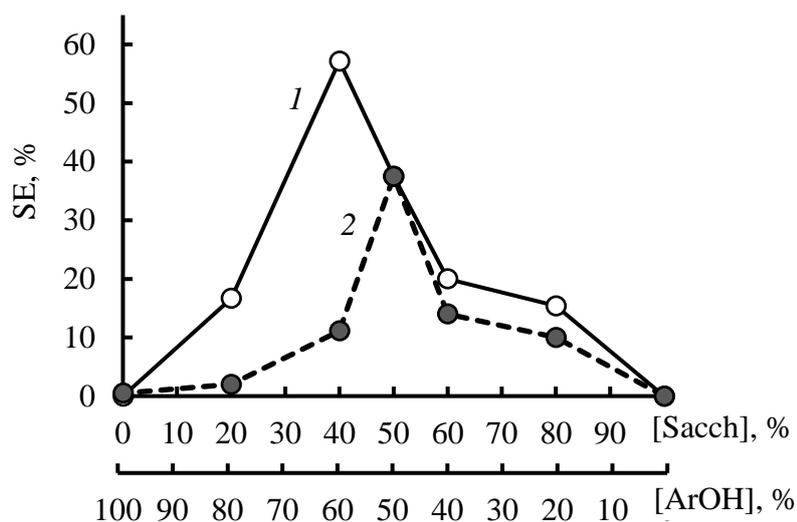


Рис. 2. Зависимость величины синергического эффекта (SE, %) в реакции с $АРОО^{\bullet}$ от состава смеси кофейная кислота–глюкоза (1) и кофейная кислота–фруктоза (2) (суммарная концентрация смеси $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹). Растворитель – фосфатный буфер с pH = 7,35. T = 323 ± 2 К.

Наибольшее значение SE_{max} установлено для дисахарида – лактозы, а наименьшее – у рамнозы (табл. 1). В ряду исследованных сахаров наблюдается общая закономерность – при переходе от моно- к дисахаридам эффект сверхаддитивности фенольно-сахаридной композиции возрастает:

рамноза < фруктоза < манноза < глюкоза < лактоза < сахароза.

Установленный синергизм относится к типу, когда при взаимодействии реагентов (реакция 3) образуется продукт, более эффективно взаимодействующий с радикалами, чем исходные индивидуальные вещества. Такими продуктами могут быть межмолекулярные (или ион-молекулярные) водородные комплексы кофейной кислоты с углеводами:

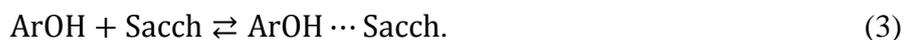
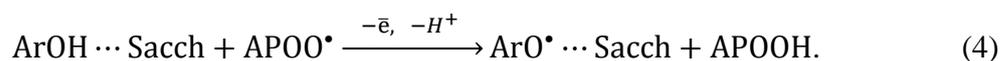


Таблица 1

Максимальный синергический эффект (SE_{\max}) композиций кофейной кислоты с моно- и дисахаридами (суммарная концентрация смеси $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹) в реакции с АРОО• в фосфатно-цитратном буфере при pH=7,35 и T=323 ± 2 К

Состав бинарной композиции	SE_{\max} , %
<i>Моносахариды</i>	
Кофейная кислота : глюкоза (60:40)	57,1
Кофейная кислота : манноза (60:40)	55,4
Кофейная кислота : фруктоза (50:50)	37,5
Кофейная кислота : рамноза (60:40)	20,0
<i>Дисахариды</i>	
Кофейная кислота : лактоза (50:50)	100,0
Кофейная кислота : сахароза (50:50)	73,8

Указанный механизм синергического действия был установлен авторами в смесях природных фенолов с моносахаридами [17], а также предложен в работе [18]. Очевидно, что в составе комплекса кофейная кислота будет реагировать с АРОО• быстрее (реакция 4), чем в индивидуальном виде (реакция 2).



Существование комплексов доказывали без выделения их из растворов методом УФ-спектроскопии. По изменению оптической плотности раствора судили об образовании комплекса при условии постоянной концентрации фенолокислоты и переменной концентрации углевода. На примере маннозы (рис. 3), показаны изменения в спектрах поглощения кофейной кислоты в зависимости от концентрации углевода. При этом исследованные моносахариды в УФ-области, характерной для кофейной кислоты, не поглощают. Образование комплекса $\text{ArOH} \cdots \text{Sacch}$ явно изменяет положение, форму и интенсивность полос поглощения молекул, участвующих в ассоциации. При увеличении концентрации моносахарида интенсивность полосы поглощения кислоты при 222 нм возрастает, а положение максимума смещается в bathochromную область.

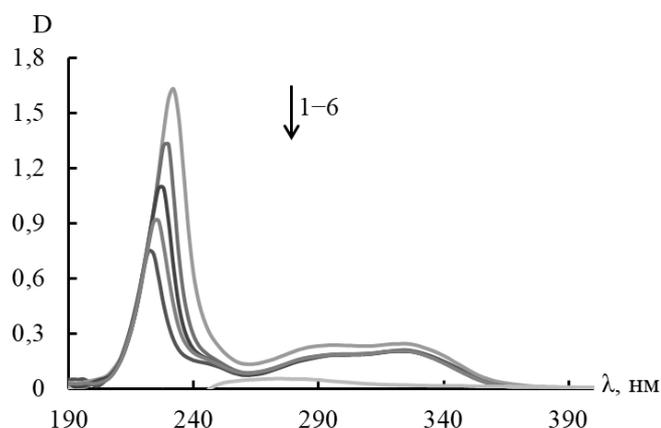


Рис. 3. УФ-спектры поглощения кофейной кислоты ($[\text{ArOH}] = 3 \cdot 10^{-5}$ моль·л⁻¹) (кривая 5), маннозы ($[\text{Sacch}] = 6 \cdot 10^{-3}$ моль·л⁻¹) (кривая 6), смесей кофейной кислоты с маннозой (кривые 1, 2, 3, 4) при концентрации: 1 – $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л; 2 – $4 \cdot 10^{-3}$ моль/л; 3 – $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л; 4 – $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Растворитель – буферный раствор с pH = 2, T = 298 ± 2 К

Причем для реакций с участием радикалов принципиально важны только Н-комплексы кофейной кислоты с сахарами, где фенолокислота выступает в роли донора протона. При этом водородная связь образуется между атомом О углевода и атомом Н фенольных групп кофейной кислоты. Это связано с тем, что согласно литературным данным [19, 20] и ранее проведенным исследованиям [21], донорные водородные комплексы фенол–сахарид проявляют более высокие восстанавливающие свойства (низкие потенциалы ионизации), а значит, более высокую АРА, чем исходные вещества или Н-комплексы акцепторного или смешанного типов. По-видимому, наибольшее количество комплексов донорного типа образуется при соотношении $ArOH-Sacch$ как 60:40 или 50:50, что и проявляется в появлении максимального синергического эффекта (SE_{max}). По этой же причине эффект синергизма возрастает для смесей кофейной кислоты с дисахаридами за счет увеличения числа О–Н-групп (по сравнению с моносахаридами), участвующих в образовании донорных Н-комплексов с высокими восстанавливающими свойствами.

Если предположение о влиянии качественного состава образующихся комплексов на синергическое действие фенольно-сахаридной композиции верно, но повышение рН среды должно изменить величину эффекта синергизма. Так, на примере лактозы показано (рис. 4), что чем выше рН среды, тем ниже синергический эффект смеси кофейной кислоты с лактозой. Это связано с тем, что с ростом рН среды фенолокислота диссоциирует с образованием фенолят-ионов, а значит, возможность образования донорного Н-комплекса с лактозой снижается, поскольку в ионизированной форме фенолят-ионы кислоты будут образовывать с углеводом ион-молекулярные комплексы акцепторного типа (рис. 4).

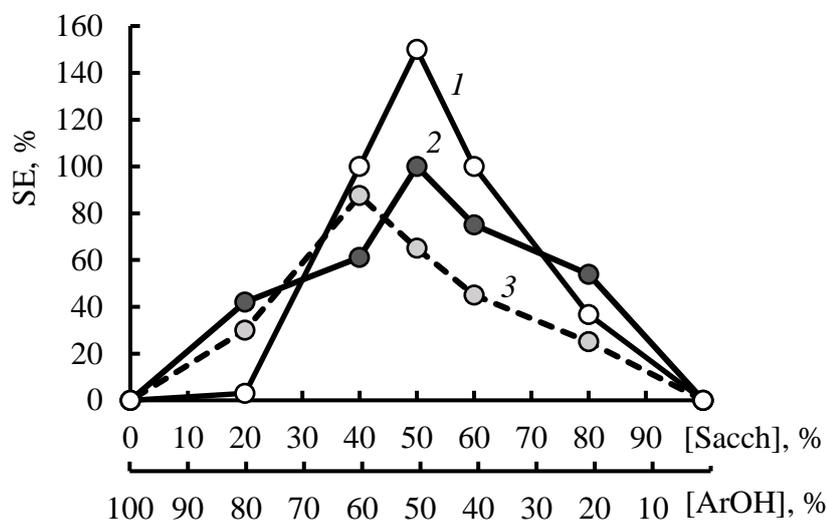


Рис. 4. Зависимость величины синергического эффекта (SE , %) от состава смеси кофейная кислота–лактоза при разных значениях рН буферного раствора: 1 – 2; 2 – 7,35; 3 – 9. Суммарная концентрация смеси $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹, $T = 323 \pm 2$ К

Выводы. Методом активированной хемилюминесценции установлено наличие синергического эффекта в бинарных композициях кофейной кислоты с моно- и дисахаридами в реакции с амидинопропанпероксидами в водных среды с разным рН при температуре 323 К. Максимальный эффект сверхаддитивности, равный 100 и 150 %, проявила смесь кофейной кислоты с лактозой в соотношении 50 : 50 в нейтральной и кислой среде с рН 7,35 и 2 соответственно. Причиной установленного

синергизма является образование водородного комплекса кофейная кислота–углевод донорного типа, способного реагировать с пероксильными радикалами быстрее, чем исходный антиоксидант. Наличие в системе таких Н-комплексов подтверждено методом УФ-спектроскопии, а также снижением эффекта синергизма фенольно-сахаридной композиции с ростом рН среды. Полученные данные необходимы и должны учитываться:

1) при разработке функциональных и специализированных продуктов (или лекарственных препаратов), обогащенных растительными фенольными соединениями;

2) для понимания принципов встраивания природных фенолов в пищевую систему продукта;

3) для оценки сохранения биодоступности и биоактивности фенолов с учетом химических свойств пищи;

4) для целенаправленного поиска фенольно-углеводных синергических композиций в составе растительного сырья.

Работа выполнена в рамках выполнения темы государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер госрегистрации 124012400355-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nutritional status, antioxidant activity and total phenolic content of different fruits and vegetables' peels / Y. Sadeh, T. Javed, R. Javed, et al. // PLoS ONE. – 2022. – Vol. 17, No. 5. – Art. e0265566.
2. Changes of phenolics contents, antioxidant activities, and enzyme activities in pellicles of *Juglans sigillata* Dode during fruits development / C. Li, B. Shi, X. Li, et al. // Int. J. Food Prop. – 2022. – Vol. 25, No. 1. – P. 2133–2145.
3. Gurbuzer A. Investigation of in vitro antimicrobial activities of some hydroxybenzoic and hydroxycinnamic acids commonly found in medicinal and aromatic plants / A. Gurbuzer // International Journal of Plant Based Pharmaceuticals. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 42–47.
4. Патент RU2020142414А. Композиция биологически активных веществ [Текст] / Банникова А.В. и др. – 2022.
5. Патент WO2009134165A1. Антиоксидантный и антигипоксантный комплекс на основе дигидрокверцетина для косметических изделий [Текст] / Тихонов В.П. и др. – 2009.
6. Патент RU2284349С1. Состав для стабилизации липидов [Текст] / Перевозкина М.Г. и др. – 2006.
7. Kroll J. Reactions of plant phenolics with food proteins and enzymes under special consideration of covalent bonds / J. Kroll, H.M. Rawel, S. Rohn // Food Sci. Technol. Res. – 2003. – Vol. 9, No. 3. – P. 205–218.
8. Interaction of milk α and β -casein with tea polyphenols / I. Hasni, P. Bourassa, S. Hamdani, et al. // Food Chem. – 2011. – Vol. 126, No. 2. – P. 630–639.
9. Saura-Calixto F. Dietary fiber as a carrier of dietary antioxidants: An essential physiological function / F. Saura-Calixto // J. Agric. Food. Chem. – 2011. – Vol. 59, No. 1. – P. 43–49.
10. Bioavailability of procyanidin dimmers and trimers and food matrix effect in vitro and in vivo models / A. Serra, A. Macia, M.P. Romero, et al. // British Journal of Nutrition. – 2010. – Vol. 103, No. 7. – P. 944–952.
11. Oxidative modification of rat eye lens proteins by peroxy radicals in vitro: Protection by the chain-breaking antioxidants stobadine and Trolox / M. Stefek, Z. Kyselova, L. Rackova, L. Krizanova // Biochim. Biophys. Acta, Mol. Basis Dis. – 2005. – Vol. 1741, No. 1–2. – P. 183–190.
12. Rackova L. Structural aspects of antioxidant activity of substituted pyridoindoles / L. Rackova, M. Stefek, M. Majekova // Redox Report. – 2002. – Vol. 7. – P. 207–214.
13. Хемиллюминесцентные методы исследования медленных химических процессов / В.Я. Шляпинтох, О.Н. Карпунин, Л.М. Постников и др. – М.: Наука, 1966. – 300 с.
14. Denisov E.T. Handbook of Free Radical Initiators / E.T. Denisov, T.G. Denisova, T.S. Pokidova. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 879 p.
15. Беляков В.А. Кинетика окси-хемиллюминесценции и ее использование для анализа антиоксидантов / В.А. Беляков, Р.Ф. Васильев, Г.Ф. Федорова // Кинетика и катализ. – 2004. – Т. 45, № 3. – С. 355–362.
16. Южаков В.И. Спектральнолюминесцентные свойства этанольных растворов родамина 6Ж при пикосекундном возбуждении / В.И. Южаков, В.З. Пашенко // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 3. – P. 613–615.

17. Structure and Antiradical Activity of Hydrogen-Bound Complexes of Protocatechoic Acid with Monosaccharides in Aqueous Media / N.I. Belaya, A.V. Belyia, O.V. Zarechnayab, V.L. Lobachev // Russ. J. Gen. Chem. – 2024. – Vol. 94, No. 1. – P. 93–105.
18. Olszowy-Tomczyk M. Synergistic, antagonistic and additive antioxidant effects in the binary mixtures / M. Olszowy-Tomczyk // Phytochem. Rev. – 2020. – Vol. 19. – P. 63–103.
19. Hydrogen Bonding in Aromatic Alcohol-Water Clusters: A Brief Review / D.-S. Ahn, I.-S. Jeon, S.-H. Jang, et al. // Bull. Korean Chem. Soc. – 2003. – Vol. 24, No. 6. – P. 695–702.
20. Yamabe S.A DFT study of proton transfers for the reaction of phenol and hydroxyl radical leading to dihydroxybenzene and H₂O in the water cluster / S. Yamabe, S. Yamazaki // Int. J. Quantum Chem. – 2017. – Vol. 118, No. 6. – Art. 25510.
21. Активность межмолекулярных водородных комплексов кверцетина с глюкозой в реакциях с пероксирадикалами хлопкового масла / Н.И. Белая, А.В. Белый, Г.А. Тихонова, Я.С. Удалов // Химия раст. сырья. – 2020. – № 3. – С. 57–65.

Поступила в редакцию 03.09.2024 г.

CHEMILUMINESCENT STUDY OF ANTI-RADICAL ACTIVITY OF COMPOSITIONS OF MONO- AND DISACCHARIDES WITH CAFFEIC ACID

E.A. Budnikova, N.I. Belaya, A.V. Bely, E.V. Kulik

Using the method of activated chemiluminescence, the antiradical synergistic effect of binary compositions of caffeic acid with mono- and disaccharides in reaction with amidinoisopropane peroxy radicals generated during the thermolysis of the hydrophilic azoinitiator 2'-azobis(2-amidinopropane)dihydrochloride in aqueous media with pH 2–9 at a temperature of 323±2 K was established. The maximum synergy effect, equal to 150 %, was shown by a mixture of caffeic acid and lactose in a ratio of 50:50 in hydrochloric acid buffer with pH 2. It was found that with a decrease in the acidity of the medium, the superadditive effect of the phenolic-saccharide composition decreases. A possible mechanism of synergy is the formation of a hydrogen complex between caffeic acid and the carbohydrate.

Key words: caffeic acid, saccharide, antiradical activity, synergism, radical.

Будникова Екатерина Андреевна
инженер кафедры физической химии,
аспирант кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: bbkatyy@mail.ru

Budnikova Ekaterina Andreevna
Engineer of the Department of Physical Chemistry,
postgraduate student of the Department of Physical
Chemistry, Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Белая Наталья Ивановна
доктор химических наук, доцент;
профессор кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: n.iv.belaya@mail.ru

Belaya Natalya Ivanovna
Doctor of Chemical Sciences, Docent;
Professor at the Department of
Physical Chemistry, Donetsk
State University, Donetsk, DPR, RF.

Белый Александр Владимирович
кандидат химических наук, доцент;
доцент кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: belyj@donnu.ru

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

Кулик Евгений Викторович
лаборант кафедры физической химии,
студент ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: kulik18150@gmail.com

Kulik Evgeny Viktorovich
laboratory assistant at the Department of
Physical Chemistry, student,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРОКСИДАЗНОЙ АКТИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОП-РЕАГЕНТА

© 2024. *Е. М. Кравченко, О. В. Макурина, В. С. Дорошкевич*

Исследован ряд веществ, тормозящих активность пероксидазы хрена. Наиболее эффективными «стоп-реагентами» являются соляная кислота и концентрированный раствор пероксида водорода. Оптимизирована методика определения активности растительных пероксидаз отбором проб с использованием орто-фенилендиамина в качестве субстрата-восстановителя и концентрированного раствора пероксида водорода в качестве стоп-реагента.

Ключевые слова: пероксидаза, ABTS, орто-фенилендиамин, спектрофотометрия, фотоколориметрия, окисление.

Введение. Пероксидазы окисляют различные субстраты, используя пероксид водорода в качестве окислителя. Эти ферменты чрезвычайно широко распространены в природе и разнообразны по биологическим функциям, среди них есть высокоспецифичные и низкоспецифичные ферменты. По строению пероксидазы делятся на гемовые и негемовые. Не менее разнообразны сферы использования пероксидаз, от биodeградации отходов и очистки почв и сточных вод, до тонкого органического синтеза, клинической диагностики и аналитических методик [1–3].

Определение пероксидазной активности является рутинной задачей при исследованиях во многих областях, от исследования жизненных процессов различных организмов, до выделения и очистки ферментных препаратов [4].

Постановка задачи. В качестве параметра, коррелирующего с пероксидазной активностью, как правило, используют начальную скорость превращения субстрата. Для ее измерения необходимо обеспечить протекание реакции в стандартных оптимальных для ферментативной реакции условиях. За изменением концентрации реактантов можно следить непосредственно, например, проводя реакцию в термостатируемой кювете спектрофотометра, способного очень быстро измерять оптическую плотность, или методом отбора проб.

В данной работе проводили подбор оптимальных условий определения активности растительных пероксидаз при их выделении фотоколориметрическим методом с остановкой ферментативной реакции.

Методика эксперимента. Спектрофотометрические измерения проводили на спектрофотометре Specord S300 UV-Vis с термостатируемым кюветным отделением. Для регистрации сигнала и первичной обработки полученных данных использовали программное обеспечение WinAspect. Опыты с остановкой пероксидазного окисления проводили в термостатируемых пробирках. Фотоколориметрические измерения проводили на колориметре КФК-2МП. Математическую обработку экспериментальных данных проводили в программе MS Excel. Измерения pH буферных растворов проводили на иономере И-160 М.

В исследованиях использовали коммерческий препарат пероксидазы хрена (Fluka, активность 440 U/мг). Фермент и 2,2'-азино-бис-(3-этилбензтиазолин-6-сульфонат) (ABTS) ($\geq 98\%$, Sigma) использовали без дополнительной очистки. Орто-фенилендиамин (PEAXИМ) очищали перекристаллизацией из водного раствора.

Чистоту веществ подтверждали измерением температур плавления и спектрофотометрически. Концентрацию HCl и H_2O_2 подтверждали титриметрически. Цитратные, фосфатные и карбонатные буферные растворы готовили из соответствующих компонентов марки «ч.д.а.» или «х.ч.» согласно методикам, описанным в [5].

Анализ результатов. В качестве субстратов-восстановителей нами были рассмотрены широко используемые вещества: (ABTS) и орто-фенилендиамин (ОФ). Процесс окисления этих субстратов в присутствии пероксидаз достаточно хорошо изучен, известна природа образующихся продуктов [6, 7]. Окисление удобно наблюдать спектрофотометрически. В случае ABTS полосы поглощения реактантов хорошо разделяются, расходование субстрата и накопление продукта можно наблюдать по отдельности. Расходование ОФ спектрофотометрически достоверно не наблюдается, но четкая полоса поглощения продукта доступна для наблюдения. Коэффициенты экстинкции указанных веществ представлены в табл. 1. Окисление обоих субстратов достаточно хорошо наблюдается визуально, что полезно при использовании метода отбора проб.

Таблица 1
Спектральные характеристики используемых субстратов и образующихся продуктов окисления

Вещество	λ_{max} , нм	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$, л·(см·моль) ⁻¹ *
ABTS	341,5	3,46
продукт окисления ABTS, ABTS ⁺ •	414	2,83
продукт окисления ОФ, 2,3-диаминофеназин (ДАФ)	448	1,38

* Определены в 0,1 М цитратном буферном растворе.

Подбор оптимальных условий работы с пероксидазой проводили с использованием пероксидазы хрена (HRP). Начальная скорость окисления ABTS в присутствии HRP максимальна и почти не зависит от температуры в диапазоне 30–60 °С, при низких температурах (10–25 °С) активность фермента составляет примерно половину от максимальной. Повышение температуры свыше 60 °С приводит к резкому снижению активности фермента (рис. 1). То есть, зависимость активности фермента от температуры в целом соответствует общепринятым воззрениям, но ее вид для HRP более сложный, чем предсказывает теоретическая модель.

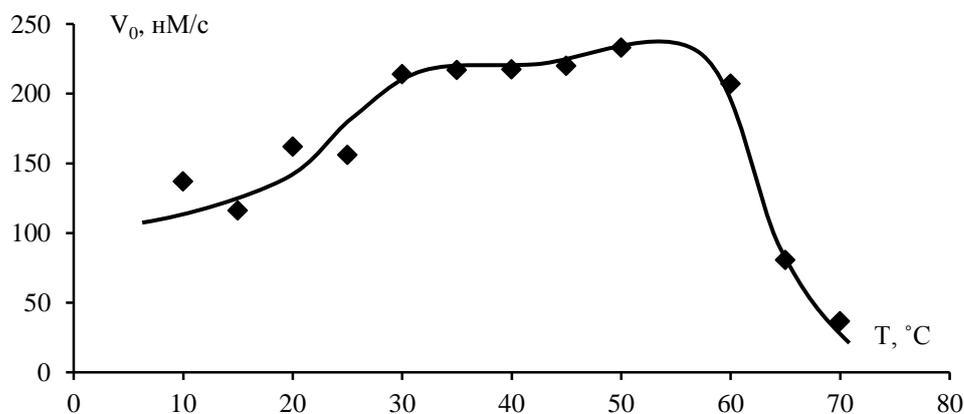


Рис. 1. Зависимость начальной скорости пероксидазного окисления ABTS от температуры.
Цитратный буфер pH 3,6, $[\text{ABTS}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 32$ мкМ, $[\text{HRP}]_0 = 0,1$ мг/л.

Зависимость активности фермента от pH может различаться для субстратов разной природы. Пероксидазное окисление ОФ и АВТС проводили в цитратных, фосфатных и карбонатных буферных растворах. Максимальная скорость пероксидазного окисления ОФ наблюдается при pH 4-5, АВТС – при pH чуть менее 4 (рис. 2).

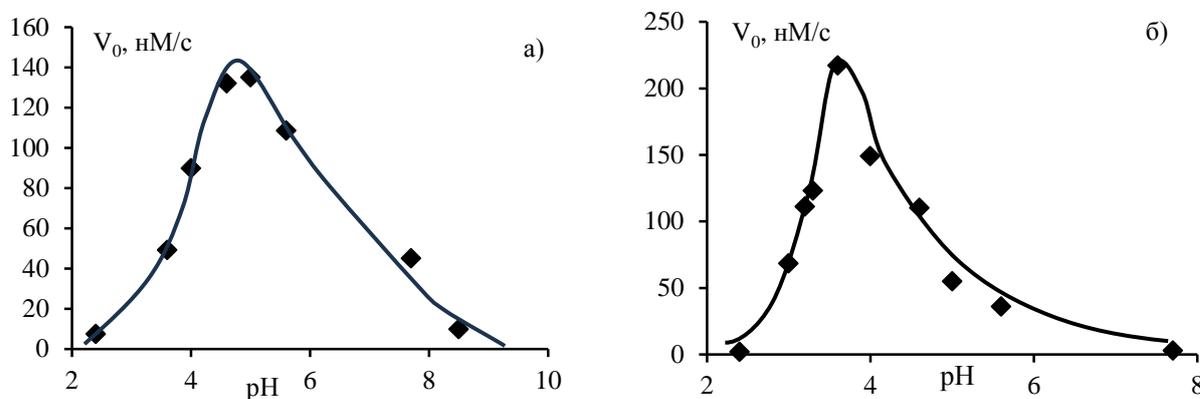


Рис.2. Зависимость начальной скорости (V_0) пероксидазного окисления субстратов от pH среды. $T = 35\text{ }^\circ\text{C}$; интервал pH 2,4 – 9,2.

а) ОФ, $[\text{ОФ}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 60\text{ мкМ}$, $[\text{HRP}]_0 = 0,1\text{ мг/л}$.
 б) АВТС, $[\text{АВТС}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 32\text{ мкМ}$, $[\text{HRP}]_0 = 0,1\text{ мг/л}$.

Разная степень очистки коммерческих ферментных препаратов, возможное наличие ингибирующих примесей, разница в активности ферментов из разных источников приводят к тому, что информация о массовой или даже молярной концентрации фермента недостаточна и для сопоставления данных разных исследовательских групп необходимы более универсальные величины. Одной из таких является активность, измеренная в международных величинах (юнитах). Для ее определения можно исследовать влияние концентрации фермента на скорость процесса при строго определенных условиях (концентрация, состав среды, pH, температура и т.д.). Кроме того, знание концентрационной зависимости активности фермента от его содержания позволяет определять его количественно в биообъектах и их фракциях, используя кинетический подход.

В качестве субстрата-стандарта для определения активности пероксидазы использовали АВТС. За кинетикой реакции пероксидазного окисления АВТС следили спектрофотометрически по накоплению продукта – катион-радикала АВТС (табл. 1).

В исследованном диапазоне зависимость начальной скорости окисления АВТС и ОФ от концентрации пероксидазы линейна (рис. 3, 4). Из этих зависимостей определяли активность фермента в международных единицах исходя из того, что 1 единица (1 U) соответствует такому количеству фермента, который катализирует превращение 1 моль субстрата за 1 мин. Активность используемого препарата пероксидазы хрена, определенная при окислении АВТС в указанных концентрационных условиях (рис. 3), составляет $149 \pm 28\text{ U/мг}$.

Активность используемой пероксидазы, определенная при окислении ОФ в указанных концентрационных условиях (рис. 4), составляет $344 \pm 52\text{ U/мг}$. Погрешность начальной скорости, определяемая в этой системе, составляет порядка 15 %.

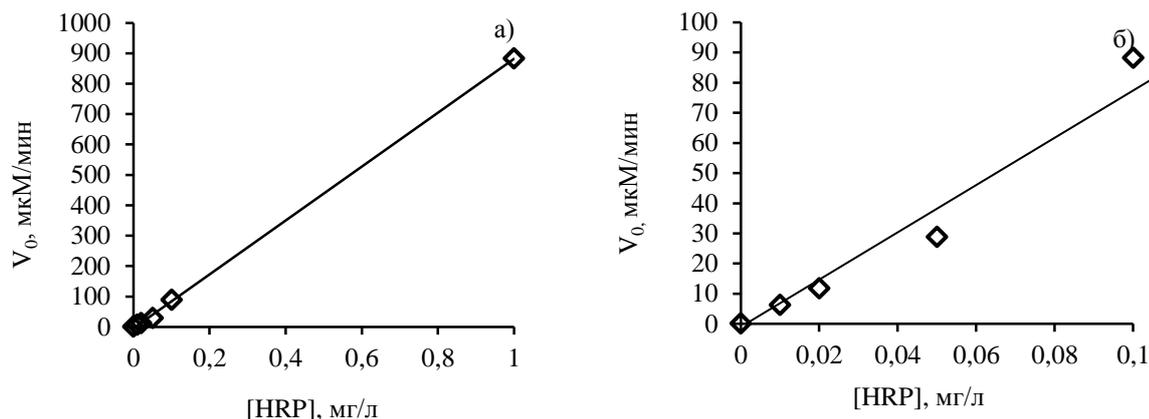


Рис. 3. Зависимость скорости пероксидазного окисления ABTS непосредственно в кювете от концентрации фермента. $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, цитратный буфер pH 4,6, $[\text{ABTS}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5\text{ мМ}$, $[\text{HRP}]_0 = 0,01 \div 1\text{ мг/л}$. а), б) – разные концентрационные диапазоны.

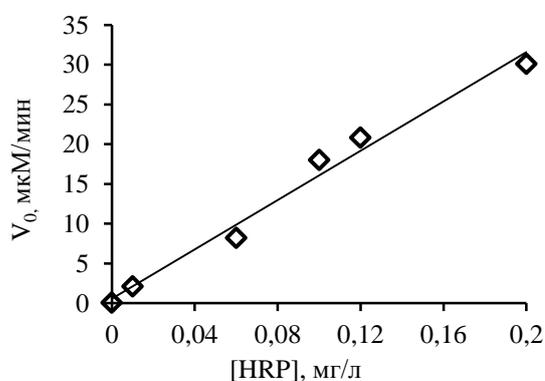


Рис. 4. Зависимость скорости пероксидазного окисления OF непосредственно в кювете от концентрации фермента. $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, цитратный буфер pH 4,6, $[\text{OF}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,2\text{ мМ}$, $[\text{HRP}]_0 = 0,01 \div 0,2\text{ мг/л}$.

Оба исследованных субстрата, ABTS и OF, окисляются пероксидазой хрена и исследуемыми пероксидазами экстрактов капусты с высокой скоростью и удобны для спектрофотометрического наблюдения. Для рутинных измерений активности выбрали OF из-за его существенно меньшей стоимости. Для повышения стабильности его растворяли не в воде, а в слабокислом буферном растворе (0,1 М цитратном с pH 4,6), а также замораживали небольшими порциями. Таким образом, для исследования пероксидазной активности предложены следующие условия: pH 4,6, 0,1 М цитратный буфер, температура $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $[\text{OF}]_0 = [\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,2\text{ мМ}$.

Метод определения скорости реакции при проведении ее непосредственно в кювете спектрофотометра удобен и позволяет избежать погрешностей, связанных с отбором проб, однако он требует специального оборудования и не всегда необходим. Поэтому мы подбирали условия методики определения пероксидазной активности на основе фотоколориметрии и отбора проб, простые в исполнении и обеспечивающие минимальную погрешность.

Метод отбора проб в случае высоких скоростей реакции требует использования способов торможения. В литературе известен ряд веществ, останавливающих или тормозящих пероксидазное окисление, в частности, ионы кадмия, тиоловые соединения, концентрированные кислоты, избыток пероксида водорода, органические

растворители [8–11]. В качестве стоп-реагентов нами были испытаны этиловый спирт, додецилсульфат натрия, соляная кислота и концентрированный раствор пероксида водорода.

Этиловый спирт заметно снижает скорость реакции только при введении в больших объемах и для задачи торможения без разбавления не подходит. Додецилсульфат натрия (SDS-Na) также недостаточно эффективен. Наиболее эффективными стоп-реагентами из исследованных оказались HCl и H₂O₂. Недостаток соляной кислоты состоит в достаточно заметном смещении полосы поглощения продукта окисления ОФ. Концентрированный пероксид водорода почти также эффективен (превращение ОФ после его добавления в основном связано с действием самого H₂O₂ как окислителя), и остановились в итоге на нем в объеме 0,1–0,2 мл при объеме реакционной смеси 2,5 мл (табл. 2).

Таблица 2

Влияние стоп-реагентов на начальную скорость пероксидазного окисления ОФ

Стоп-реагент	V ₀ , М/с ферментативной реакции,	V ₀ , М/с ферментативной реакции после введения стоп-реагента**	Степень ингибирования пероксидазы	Пероксидазная активность после введения стоп-реагента
Спирт этиловый 1 мл	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	6,78	15 %
Спирт этиловый 1 мл*	$6,27 \cdot 10^{-7}$	$4,25 \cdot 10^{-8}$	14,75	7 %
HCl 4,1 М 0,1 мл	$4,31 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$	26,77	4 %
HCl 4,1 М 0,2 мл	$3,42 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-9}$	91,69	1 %
H ₂ O ₂ 60 % 0,2 мл	$3,14 \cdot 10^{-7}$	$7,98 \cdot 10^{-9}$	39,35	3 %
H ₂ O ₂ 60 % 0,05 мл	$3,34 \cdot 10^{-7}$	$1,97 \cdot 10^{-8}$	16,95	6 %
H ₂ O ₂ 60 % 0,1 мл	$1,79 \cdot 10^{-7}$	$8,35 \cdot 10^{-9}$	21,44	5 %
SDS-Na 10 % 0,1 мл	$2,48 \cdot 10^{-7}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$	11,38	9 %

*При концентрации HRP 0,2 мг/л; ** С учетом разбавления T = 35 °С, 0,1 М цитратный буфер pH 4,6, [H₂O₂] = 200 мкМ, [ОФ] = 200 мкМ, [HRP] = 0,1 мг/л.

Кинетические кривые пероксидазного окисления ОФ имеют вид кривых с насыщением с линейными начальными участками. Линейная область наблюдается как минимум в течение 1 минуты для наибольших из исследованных концентраций (0,2 мг/л). Введение стоп-реагента H₂O₂ в течение 30 с – 1 минуты оптимально для проб с высокой активностью пероксидазы. Если активность ниже, реакцию до введения стоп-реагента целесообразно проводить дольше, с визуальным контролем, вводя стоп-реагент по достижении достаточной интенсивности окраски.

Пероксид водорода и соляная кислота в используемых концентрациях тормозят пероксидазное окисление с близкой эффективностью. Величины начальных скоростей, полученных с их использованием и погрешности, также соизмеримы. Время проведения реакции перед ее остановкой в диапазоне 30–60 с представляется оптимальным для схожих активностей пероксидазы. Разница между остановкой реакции 0,2 и 0,1 мл стоп-реагента незначительна. Использование дозатора при введении реагентов для пероксидазного окисления, хотя бы последнего, а также при торможении реакции, существенно снижает ошибку (табл. 3).

Зависимость начальной скорости окисления ОФ от концентрации пероксидазы, определенная в опыте с торможением реакции, линейна (рис. 5) и определяемая из нее активность фермента в международных единицах составляет 381 ± 49 У/мг.

Таблица 3

Точность определения скорости пероксидазного окисления ОФ непосредственно спектрофотометрически и при торможении стоп-реагентами

Стоп-реагент	Примерное время введения стоп-реагента, с	Объем стоп-реагента, мл	V_0 , М/с
Непосредственно спектрофотометрически			$(3,85 \pm 0,77) \cdot 10^{-7}$
HCl 4,1 М стеклянными пипетками*	30	0,2	$(4,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-7}$
HCl 4,1 М	30	0,2	$(3,93 \pm 0,46) \cdot 10^{-7}$
HCl 4,1 М	60	0,2	$(3,46 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$
HCl 4,1 М	30	0,1	$(3,44 \pm 0,18) \cdot 10^{-7}$
H ₂ O ₂ 60 %	60	0,1	$(3,44 \pm 0,36) \cdot 10^{-7}$
H ₂ O ₂ 60 %	30	0,1	$(3,15 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$

T = 35 °C, 0,1 М цитратный буфер pH 4,6, [H₂O₂] = 200 мкМ, [ОФ] = 200 мкМ, [HRP] = 0,1 мг/л. Кроме опыта (*), реагент, начинающий реакцию (рабочий раствор H₂O₂) и стоп-реагент (концентрированный H₂O₂) вводится дозаторами.

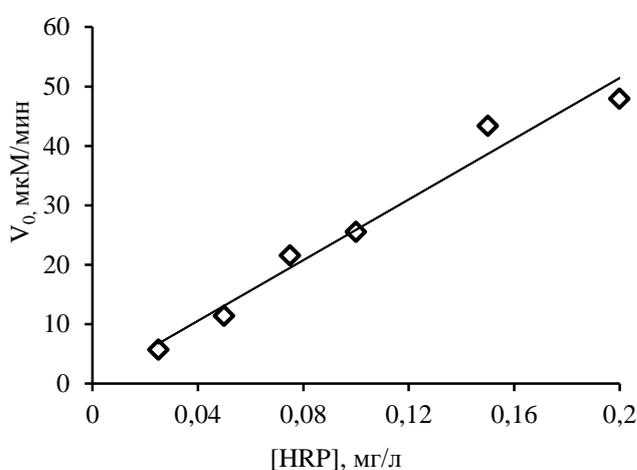


Рис. 5. Зависимость скорости пероксидазного окисления ОФ от концентрации фермента, определенная с помощью торможения реакции концентрированным H₂O₂. T = 35 °C, цитратный буфер pH 4,6, [ОФ]₀ = [H₂O₂]₀ = 0,2 мМ, [HRP]₀ = 0,01÷0,2 мг/л.

Отработанная методика была апробирована на фракциях экстракта капусты белокочанной, который подвергали фракционному размораживанию [12]. Первые порции оттаявшего экстракта проявляют более высокую пероксидазную активность. Как видно из табл. 4, результаты определения активности методом отбора проб отличаются от результатов, полученных при проведении реакции в кювете спектрофотометра не более чем на 14 %, то есть, не превышают ошибку метода спектрофотометрического определения начальной скорости (табл. 4).

Таблица 4

Точность определения активности пероксидазы во фракциях экстракта капусты белокочанной

Фракция экстракта	V_0 , М/с (кювета)	V_0 , М/с (при торможении H ₂ O ₂)	Различие результатов спектрофотометрии и торможения
Исходный экстракт	$4,81 \cdot 10^{-6}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$	14 %
Концентрат	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	2 %
Концентрат	$7,35 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	14 %
Разбавленная фракция	$7,39 \cdot 10^{-7}$	$6,73 \cdot 10^{-6}$	10 %
Концентрат	$5,10 \cdot 10^{-6}$	$4,93 \cdot 10^{-6}$	3 %

T = 35 °C, 0,1 М цитратный буфер pH 4,6, [H₂O₂] = 200 мкМ, [ОФ] = 200 мкМ. Реагент, начинающий реакцию (рабочий раствор H₂O₂) и стоп-реагент (концентрированный H₂O₂) вводится дозаторами.

Выводы. Подобраны условия определения пероксидазной активности по 1 точке с использованием стоп-реагента и орто-фенилендиамина в качестве субстрата-восстановителя. Показана высокая эффективность в качестве стоп-реагентов концентрированного пероксида водорода и соляной кислоты. Система апробирована при определении активности пероксидазы экстракта капусты и его фракций. Погрешность метода с торможением реакции и фотоколориметрическим определением концентрации составляет не более 20 %, на том же уровне, что и спектрофотометрический метод с непосредственным проведением реакции в термостатируемой кювете.

Работа выполнена в рамках деятельности молодежной лаборатории по исследованию реакционной способности органических соединений (№ госрегистрации НИОКТР 124051400022-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Comprehensive Review on Function and Application of Plant Peroxidases [Text] / V. P. Pandey, M. Awasthi, S. Singh et al. // *Biochemistry and Analytical Biochemistry*. – 2017. – Vol. 6, No 1. – P. 1-16. – DOI: 10.4172/2161-1009.1000308.
2. Chukwudi, N. Peroxidase, an Example of Enzymes with Numerous Applications / N. Chukwudi, O. C. Amadi, N. Amarachi // *Asian Journal of Chemical Sciences*. – 2021. – Vol. 10, No 2. – P. 11-22. – DOI: 10.9734/ajocs/2021/v10i219087.
3. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты (обзор) [Текст] / Н. А. Куликова, О. И. Кляйн, Е.В. Степанова [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2011. – Т. 47, № 6. – С. 619–634.
4. Silaghi-Dumitrescu, R. Assays for peroxidase activity: The HRP case / R. Silaghi-Dumitrescu // *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemia*. – 2010. – Vol. 55. – P. 207-222.
5. Справочник биохимика / Р. Досон, Д. Эллиот, У. Эллиот, К. Джонс; Пер. с англ. В. Л. Друцы, О. Н. Королевой. – Москва : Мир, 1991. – 543 с. – ISBN 5-03-001032-7.
6. Кирейко, А. В. Механизм реакций пероксидазного окисления о-дианизидина, 3,3',5,5'-тетраметилбензидина и о-фенилендиамина в присутствии додецилсульфата натрия [Текст] / А. В. Кирейко, И. А. Веселова, Т. Н. Шеховцова // *Биоорганическая химия*. – 2006. – Т. 32, № 1. – С. 80-86.
7. Branchi, B. Kinetics of oxidation of benzyl alcohols by the dication and radical cation of ABTS. Comparison with laccase-ABTS oxidations: an apparent paradox [Text] / B. Branchi, C. Galli, P. Gentili // *Org. Biomol. Chem*. – 2005. – Vol. 3. – P. 2604–2614.
8. Raouia, A. Highly selective and sensitive detection of cadmium ions by horseradish peroxidase enzyme inhibition using a colorimetric microplate reader and smartphone paper-based analytical device / A. Raouia, A. Aziz // *Microchemical Journal*. – 2021. – Vol. 172. – P.106940. – DOI: 10.1016/j.microc.2021.106940.
9. Valderrama, B. Deactivation of Hemeperoxidases by Hydrogen Peroxide: Focus on Compound III. Biocatalysis Based on Heme Peroxidases In: Torres, E., Ayala, M. (eds) *Biocatalysis Based on Heme Peroxidases*. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2010. – P. 291–314. – DOI:10.1007/978-3-642-12627-7_11.
10. Inhibition of horseradish peroxidase by thiol type inhibitors: Mercaptoethanol and mercaptoacetic acid / S. Reyhaneh, J. Vahab, S. Reza et al. // *Journal of Molecular Liquids*. – 2006. – Vol. 128. – P. 175-177. – DOI: 10.1016/j.molliq.2006.01.005.
11. Bovaird, J Optimizing the o-phenylenediamine assay for horseradish peroxidase: Effects of phosphate and pH, substrate and enzyme concentrations, and stopping reagents / J. Bovaird, T. Ngo, H. Lenhoff // *Clinical chemistry*. – 1983. – Vol. 28. – P. 2423-2426. – DOI 10.1093/clinchem/28.12.2423.
12. Кравченко, Е. М. Выделение и концентрирование пероксидазы белокочанной капусты / Кравченко Е.М., Одарюк И.Д. // *Технологии переработки отходов с получением новой продукции. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Киров, 2021. – С. 122-126.

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

DETERMINATION OF PEROXIDASE ACTIVITY USING STOP REAGENT

E. M. Kravchenko, O. V. Makurina, V. S. Doroshkevich

A number of substances inhibiting the activity of horseradish peroxidase have been studied. The most effective "stop reagents" are hydrochloric acid and concentrated hydrogen peroxide solution. A method for determining the activity of plant peroxidases by sampling using ortho-phenylenediamine as a reducing substrate and concentrated hydrogen peroxide solution as a stop reagent has been optimized.

Keywords: peroxidase, ABTS, spectrophotometry, photolorimetry, ortho-phenylenediamine.

Кравченко Елена Михайловна

младший научный сотрудник кафедры биохимии и органической химии ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: elena_grazhina@mail.ru

Kravchenko Elena Michailovna

Junior researcher the Department of Biochemistry and Organic Chemistry, Donetsk State University”, Donetsk, DPR, RF.

Макурина Ольга Владимировна

лаборант молодежной лаборатории по исследованию реакционной способности органических соединений, магистр ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: olya.makurina.03@mail.ru

Makurina Olga Vladimirovna

Laboratory assistant of the youth scientific laboratory for the study of the reactivity of organic compounds, Master's Degree student, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Дорошкевич Виктор Сергеевич

старший преподаватель кафедры биохимии и органической химии ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: v.s.doroshkevich@mail.ru

Doroshkevich Viktor Sergeevich

Senior Lecturer, Department of Biochemistry and Organic Chemistry, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

ТИТАНОКСИДНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ В СОСТАВЕ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

© 2024. *В.М. Михальчук, Р.И. Лыга, А.Д. Верескун, Н.А. Мальцева, О.Ф. Николаева*

С использованием золь-гель технологии синтезированы прозрачные титаноксидные композиты на основе низковязких циклоалифатических эпоксидных смол. В эпоксидно-аминные реакционные смеси УП-650Т/Ancamine 2579 и Epoxeh 1510/Ancamine 2579 вводили тетрабутоксид титана для формирования TiO_2 -частиц. На начальных стадиях синтеза непосредственно в полимерном связующем образовывался золь титаноксидных частиц. Формирование титаноксидной и эпоксидной трехмерных сеток происходило одновременно. Максимальное содержание неорганического наполнителя в композитах составляло 5 масс.%. В обоих видах полимерных матриц диоксид титана, сформированный *in situ* золь-гель методом, проявляет армирующее действие (температура перехода в высокоэластическое состояние композитов смещается в сторону более высоких значений) за счет образования титаноксидного каркаса внутри органической матрицы. Однородность структуры полученных образцов зависит от содержания наполнителя и используемой для синтеза эпоксидной смолы. С увеличением концентрации диоксида титана в составе композитов повышается устойчивость образцов к окислению кислородом, а также термостабильность композитов. Температура начала основной стадии термоокислительной деструкции увеличились на 11 °С, а температура 50 %-ной потери массы образцов – на 29 °С.

Ключевые слова: золь-гель метод; диоксид титана; эпоксидные композиты; свойства; деструкция.

Введение. На сегодняшний день функциональные материалы представлены достаточно широким рядом синтетических полимерных материалов и наполненных композитов на их основе, в том числе со специальными свойствами. Особое место занимают композиты на основе эпоксидных смол, которые обладают такими ценными свойствами, как высокие диэлектрические показатели, водостойкость, малая усадка при переходе в сшитое состояние, хорошая адгезия к металлам, фарфору, стеклу. Это позволяет использовать их в качестве связующих при производстве полимерных композитов, лаков, клеев, пропиточных и заливочных компаундов [1].

Для улучшения механических, электрических, оптических и термических свойств эпоксидных полимеров используют неорганические нанонаполнители [2]. Диоксид титана, как наполнитель полимерных композитов, характеризуется низкой токсичностью, высокими оптическими свойствами, доступностью и низкой стоимостью, химической стабильностью и высокой фотоактивностью [3].

Одно из самых важных мест в области создания наноматериалов по-прежнему занимает золь-гель технология, поскольку сложно превзойти ряд характерных для нее существенных преимуществ. Практически все продукты данного метода синтеза представляют собой наноматериалы, обладающие комплексом уникальных свойств. Именно такой подход к получению наночастиц дает широкие возможности для выбора исходных реагентов, регулирования условий синтеза и, что более важно, модифицирования поверхности и морфологии частиц [4, 5]. Последние факторы будут предопределять тонкое регулирование свойств получаемого материала. В особой степени это важно при использовании наночастиц в качестве наполнителей полимерных связующих, поскольку от характера распределения частиц наполнителя, их плотности, прочности их связи с полимерной матрицей напрямую зависят все физико-химические свойства композиционных материалов [2].

Проведение золь-гель синтеза нанонаполнителя возможно непосредственно в компонентах эпоксидной составляющей композитов. При этом амин одновременно выполняет роль и отвердителя смолы, и катализатора гидролитической поликонденсации алкоксида металла, протекающей за счет абсорбированной из воздуха влаги в эпоксидном олигомере и аминном отвердителе. Проведение такого синтеза не требует сложного аппаратного обеспечения, а также исключает использование органического растворителя и проведение дополнительных стадий, таких как совмещение золь с полимерным связующим и удаление летучих продуктов гидролиза и поликонденсации. Кроме того, композиты, полученные при одновременном формировании частиц наполнителя и полимерной матрицы, обладают более высокими антикоррозионными свойствами на поверхности алюминиевых сплавов [6].

Целью исследования было осуществление золь-гель технологии получения эпоксидно-титаноксидных композитов аминного отверждения одностадийным способом и изучение их свойств.

Экспериментальная часть. Композиты получали на основе циклоалифатических эпоксидных олигомеров – смолы УП-650Т (триэпоксида 1,1-диметил-3-циклогексена, $M = 360 \text{ г}\cdot\text{моль}^{-1}$, ЭЧ = 37,4 %, $\eta = 0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (25 °С)) или смолы Epox 1510 (диглицидилового эфира дициклогексилпропана, ЭЧ = 24,4 %, $\rho = 1,14 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $\eta = 2,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (25 °С)), а также аминного отвердителя ANCAMINE 2579 (циклоалифатического полиамина, $\rho = 200 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ (25 °С), АЧ, мг КОН/г = 315 мг) и тетрабутоксид титана ($M = 320,5 \text{ г}\cdot\text{моль}^{-1}$, $\rho = 0,900 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ (25 °С)). Неорганический оксидный наполнитель TiO_2 формировали из тетрабутоксититана с использованием золь-гель технологии без введения в реакционную систему органического растворителя. Диоксид титана синтезировали в среде полимерного связующего. Аминный отвердитель и тетрабутоксититан вводили непосредственно в эпоксидную смолу. Количество вводимого в композицию алкоксида титана рассчитывали на задаваемую концентрацию TiO_2 в композитах от 0,5 до 5 масс.%. Синтез проводили при комнатной температуре, затем сформированные образцы подвергали доотверждению при температуре 120 °С в течении 6 часов. Композиты получали в виде тонких пленок (толщина 200 мкм) и блочных образцов цилиндрической формы диаметром в сечении 10 мм.

Термомеханический анализ ненаполненных полимеров и титаноксидных композитов проводили на лабораторной установке с цифровой регистрацией данных. Основными составляющими анализатора являлись термокриокамера ТК-500, измеритель-регулятор программный ТРМ251 фирмы ОВЕН и модуль введения МВА8. На плёночные образцы размером 25×6×0,2 мм непрерывно действовала растягивающая нагрузка. Скорость нагревания составляла 4 °С·мин⁻¹.

Экстракцией низкомолекулярных веществ органическим растворителем (при 50 °С в течение 72 часов) определяли содержание (выход) золь-фракции W_{sol} полимеров и нанокомпозитов.

Устойчивость пленочных образцов к окислению изучали газовольюмометрическим методом при 180 °С и давлении кислорода 1 бар. При этом определяли максимальную скорость поглощения кислорода V_{max} .

Термогравиметрические исследования проводили в неизотермическом режиме на дериватографе Q 1500 D системы Paulik–Paulik–Erdey в среде кислорода воздуха при скорости нагревания 10 °С·мин⁻¹. Данные дериватографического метода обрабатывали с помощью программы для аппроксимации кривых и анализа данных Fityk 1.3.1. Для математического разделения дифференциальных кривых потери массы образцов на

составляющие использовали набор кривых, который описывается функцией Гаусса и методом аппроксимации Nelder-Mead Simplex.

Микроскопические исследования проводили с использованием микроскопов МБС-2 и BIOLAM ЛОМО, оснащенных цифровой видеокамерой.

Анализ результатов. Термомеханический анализ полученных пленочных образцов на основе триэпоксида показал, что при малых концентрациях диоксида титана (до 2 масс.%) температура начала перехода T_g и температура завершения перехода композитов в высокоэластическое состояние T_e практически отвечают параметрам немодифицированного полимера аминного отверждения. Однако при концентрациях 2,5 и более масс.% TiO_2 оказывает армирующее влияние на полимерную эпоксидную матрицу: температура стеклования повышается на 6–14 °С, а T_e – на 9–25 °С (табл. 1).

Таблица 1

Температура стеклования T_g , температура завершения перехода композитов в высокоэластическое состояние T_e , температурный интервал α -релаксационного перехода ΔT и выход золь-фракции W_{sol} композитов (УП-650Т/Аncamine 2579)

$w(TiO_2)$, масс.%	T_g , °С	T_e , °С	ΔT , °С	ΔT , %	W_{sol} , %
–	88	100	12	14	6,8
0,5	87	100	13	15	6,7
1	89	103	14	16	6,9
1,5	90	103	13	15	7,2
2	89	102	13	15	7,1
2,5	94	109	15	17	7,1
5	102	125	23	26	7,6

Полученные значения температурного интервала α -релаксационного перехода ΔT свидетельствуют о том, что титаноксидный наполнитель при малых концентрациях (до 2 масс.%) «не препятствует» формированию эпоксидной сетчатой структуры, образованию однородной органической трехмерной сетки. Тем не менее, при более высоких концентрациях оксида титана структура композитов становится все более неоднородной: ΔT существенно увеличивается (табл. 1).

Для более детального изучения влияния присутствия титаноксидного наполнителя в составе композитов на параметры, характеризующие их сетчатую структуру, определен выход золь-фракции композитов W_{sol} . Введение TiO_2 в состав композитов приводит к незначительному увеличению выхода золь-фракции композитов: у немодифицированного полимера данный параметр составляет 6,8 %, а у композита, содержащего 5 масс.% наполнителя – 7,6 % (табл. 1). Достаточно высокие значения выхода золь-фракции для композитов можно было бы объяснить присутствием побочных продуктов гидролитической поликонденсации (спирта и воды) алкоксида металла [7]. Содержание фракции, неподшитой к сетчатой структуре, в чистом полимере на основе смолы УП-650Т является достаточно высоким, что может быть объяснено наличием абсорбированной влаги из воздуха как в исходных реагентах (смоле и амине) [6], так и в отвержденных полимерных образцах. Поэтому был сделан вывод о необходимости проведения предварительного просушивания образцов перед проведением экспериментальных исследований.

Образцы, полученные на основе Eponex 1510, также продемонстрировали повышение термомеханических параметров: во всем изученном диапазоне концентраций диоксида титана T_g композитов повышается на 2–11 °С, а T_e – на 10–25 °С (табл. 2). При чем заметное изменение температур начала и завершения перехода

в высокоэластическое состояние происходит, начиная с 2 масс.% наполнителя, как и в случае образцов, полученных на основе триэпоксида.

Таблица 2

Температура стеклования T_g , температура завершения перехода композитов в высокоэластическое состояние T_e , температурный интервал α -релаксационного перехода ΔT и выход золь-фракции W_{sol} композитов на основе Eponex 1510

$w(\text{TiO}_2)$, масс.%	T_g , °C	T_e , °C	ΔT , °C	ΔT , %	W_{sol} , %
–	61	66	5	8	3,4
1	63	76	13	21	3,4
2	65	77	12	20	3,1
3	70	84	14	23	3,0
4	72	87	15	25	4,1
5	72	91	19	31	4,9

При наименьшей степени наполнения температурный интервал α -релаксационного перехода композитов увеличивается, а дальнейшее повышение содержания оксида титана в образцах мало влияет на неоднородность их сетчатой структуры, даже при 5 масс.% TiO_2 . Однако когда были учтены термомеханические параметры данной полимерной матрицы, то оказалось, что в случае эпоксидного олигомера Eponex 1510 влияние наполнителя является более значительным, чем для системы на основе УП-650Т: ΔT увеличивается с 8 до 31 %, тогда как для композитов триэпоксид/амин разность между температурами завершения и начала перехода в высокоэластическое состояние увеличилась с 14 до 26 % (табл. 1, 2). Такое влияние титаноксидного наполнителя может быть связано с возможными взаимодействиями между неорганической и органической составляющими композитов. В частности, вероятно протекание конденсации между поверхностными гидроксильными группами частиц TiO_2 и вторичными ОН-группами, характерными для полимерных матриц на основе олигомеризованных эпоксидных смол. Действительно, используемая смола УП-650Т является молекулярным дистиллятом, что исключает присутствие вторичных гидроксидов на изопропиловых фрагментах цепей. Такое предположение не противоречит армирующему влиянию наполнителя и малозаметному изменению выхода золь-фракции композитов Eponex 1510/амин с повышением содержания диоксида титана (табл. 2). Кроме того, нельзя исключить раскрытие эпоксидных групп с участием поверхностных гидроксильных групп титаноксидных частиц.

Термогравиметрические исследования термоокислительной деградации немодифицированного полимера УП-650Т/Ancamine 2579 и эпоксидно-титаноксидных композитов на основе данного полимерного связующего при доступе кислорода воздуха были проведены в интервале температур от 25 до 820 °C (рис. 1).

Первичный анализ полученных дериватографических кривых показал, что термоокислительная деструкция немодифицированного полимера и композитов в неизотермических условиях проходит в три основные стадии без четкого разграничения между ними (рис. 1 а). Особый интерес представляет самая быстрая стадия деградации образцов, где активно протекают термическая и термоокислительная деструкции композитов. Указанная стадия протекает с большой потерей массы образцов и проявляется в виде глубокого минимума на дифференциальных кривых (рис. 1 б). Ведение TiO_2 в состав композитов в наибольших концентрациях приводит к снижению максимальной скорости потери массы на основной стадии неизотермической окислительной деструкции.

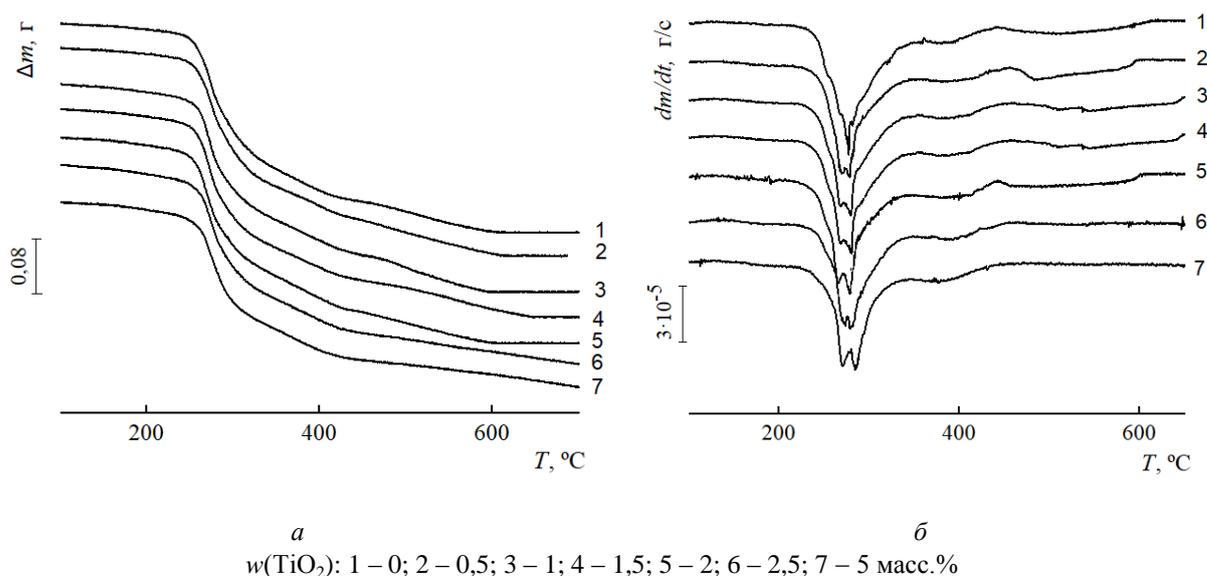


Рис. 1. Дериватографические кривые потери массы (*a*) и скорости потери массы (*b*) чистого полимера и оксидных композитов (УП-650Т/Ancamine 2579)

Для анализа влияния титаноксидного наполнителя на термоокислительную деградацию эпоксидных композитов были определены температуры, соответствующие началу основной стадии деструкции T_{start} , 50 %-ой потере массы T_{50} , максимальной скорости деструкции T_{max} и окончанию основной стадии деструкции T_{fin} полимера и титаноксидных композитов (табл. 3).

Таблица 3

Температуры, соответствующие началу основной стадии деструкции T_{start} , 50 %-ой потере массы T_{50} , максимальной скорости деструкции T_{max} и окончанию основной стадии деструкции T_{fin} полимера и титаноксидных композитов

$w(\text{TiO}_2)$, масс.%	T_{start} , °C	T_{50} , °C	T_{max} , °C	T_{fin} , °C
0	216	280	276	343
0,5	218	300	277	347
1	215	301	278	350
1,5	218	303	278	351
2	219	305	277	350
2,5	223	307	279	351
5	227	309	282	352

Установлено, что диоксид титана проявляет стабилизирующее влияние уже при минимальной степени наполнения: все названные выше температурные параметры в той или иной мере повысились. При достижении концентрации неорганического наполнителя 5 масс.% температура начала основной стадии деструкции увеличились на 11 °C, температура окончания этой стадии – на 9 °C, а температура, соответствующая 50 %-ной потере массы образца, – на 29 °C. Тем не менее, положение минимума сдвинулось в сторону больших температур только на 6 °C (табл. 3).

При термогравиметрических исследованиях сложных процессов, таких как неизотермическая деструкция полимеров, часто используют математическое разделение экспериментальной кривой на составляющие, которые описываются распределением Гаусса, а их сумма повторяет экспериментально полученную кривую. Математическая обработка DTG-дериватограмм показала, что термоокислительная

деградация ненаполненного полимера и титаноксидных композитов проходит в пять стадий, а при больших концентрациях TiO_2 определяются шесть стадий вследствие разделения основного пика на две составляющие (рис. 2). Первый небольшой пологий максимум при температуре до $125\text{ }^\circ\text{C}$, обусловлен удалением из образца летучих низкомолекулярных веществ, химически несвязанных с полимерной матрицей композитов. Такими компонентами являются абсорбированная влага и продукты гидролитической поликонденсации алкоксида титана, а также летучие низкомолекулярные примеси. На этой стадии происходит 7–9 %-ая потеря массы композитов, тогда как немодифицированный полимер аминного отверждения теряет 6 % своей массы.

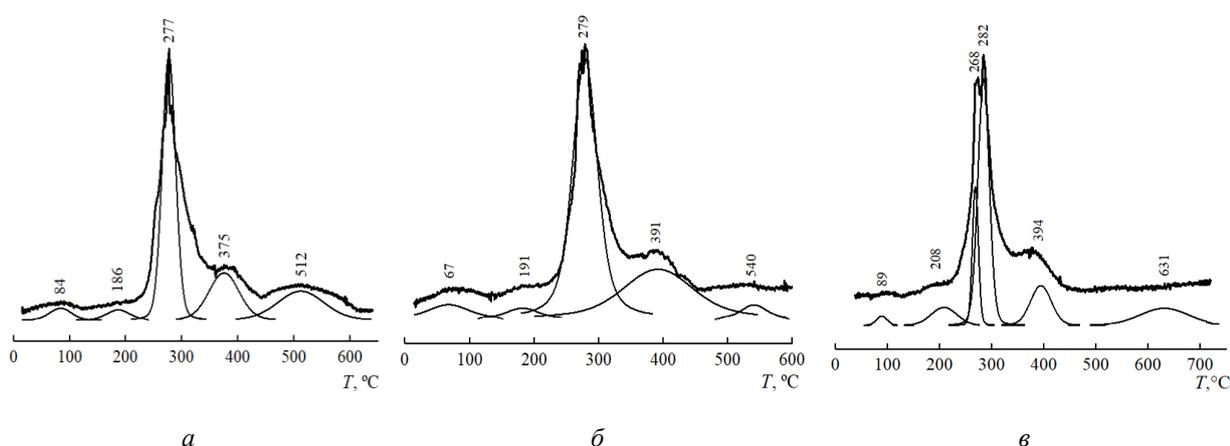


Рис. 2. Дериватографические кривые скорости потери массы полимера (а) и композита (УП-650Т/Аncamine 2579), содержащего 2,5 (б) и 5 масс.% (в) наполнителя TiO_2 , после математической обработки

Вторая стадия деструкции имеет максимум при $186\text{--}208\text{ }^\circ\text{C}$, она также характеризуется низкой скоростью потери массы. В этой области температур идет термически инициированная термоокислительная деструкция полимера.

На третьей самой быстрой стадии деструкции композита (полимера), ее еще называют основной стадией процесса, потеря массы образцов достигает 50 %. Глубокие стадии окислительных процессов приводят к быстрой деструкции образца с максимальной скоростью при $277\text{--}282\text{ }^\circ\text{C}$. На этой и последующей четвертой стадии ($375\text{ }^\circ\text{C}$) теряется 70 % массы полимера. Следует отметить, что в присутствии титаноксидного наполнителя максимум условно четвертой стадии смещается в сторону больших температур на $16\text{--}19\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2 б, в). Предположительно именно на этих стадиях интенсивно проходят реакции, связанные с инициированным разрушением оксипропиленовых цепей с образованием карбонильных групп и двойных связей, и происходит улетучивание таких продуктов деструкции, как ацетальдегид, ацетон, вода и низкомолекулярные углеводороды. А на четвертой стадии деградации идет окончательное разрушение фрагментов макромолекулярных образований и углубление окислительных процессов. В целом, анализируя площади под кривыми, установлено, что основная потеря массы образцов происходит на стадиях 2–4 в диапазоне от 125 до $500\text{ }^\circ\text{C}$, что в принципе характерно для эпоксидных полимеров и композитов на их основе.

Далее проходит последняя пятая стадия, на которой продолжается термоокислительная деструкция продуктов пиролиза с выделением газообразных

продуктов, и происходит окончательное выгорание коксового остатка. На кривых DTG это проявляется в виде пологих максимумов (512–631 °С). При введении в состав полимера TiO_2 и с увеличением его содержания эти максимумы смещаются в сторону более высоких температур на 28–119 °С, и наблюдается пролонгирование завершающей стадии деградации (рис. 2).

Микроскопические исследования показали, что синтезируемый *in situ* неорганический наполнитель в полученных композитах формирует титаноксидную трехмерную сетку. Визуальное изучение композитов после высокотемпературного отжига показало, что в тигле остается аэрогель, форма которого, как правило, повторяет форму исходного образца. При этом масса остатка отвечает массовому содержанию диоксида титана в образцах, и плотность аэрогеля повышается с увеличением концентрации наполнителя в композитах (рис. 3).

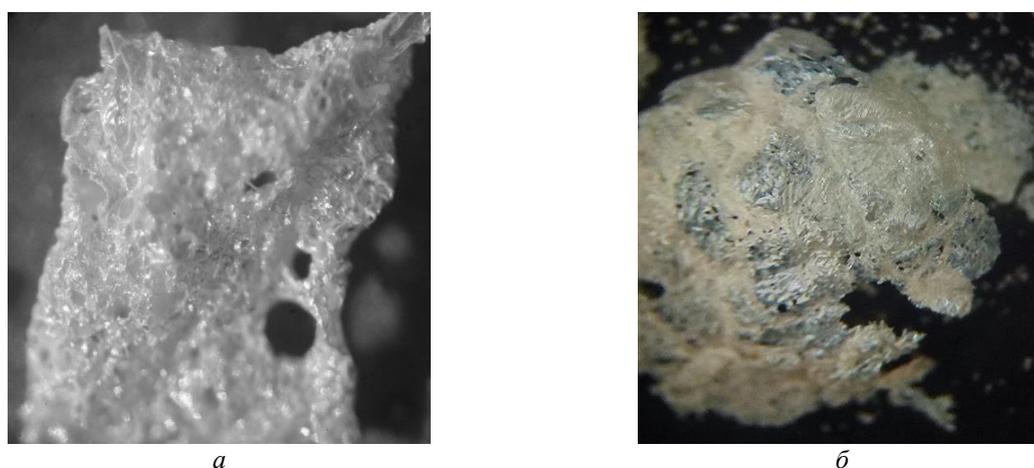


Рис. 3. Микрофотографии титаноксидных композитов (УП-650Т/Апсамине 2579) после высокотемпературного отжига

Неизотермические гравиметрические исследования были проведены также для систем на основе диглицидилового эфира дициклогексилпропана (рис. 4–6).

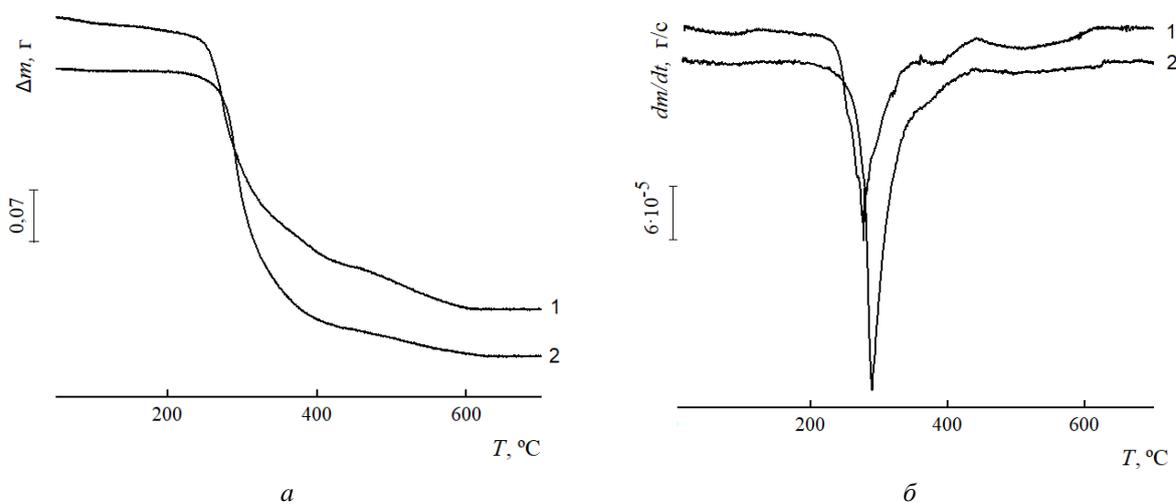


Рис. 4. Дериватографические кривые потери массы (а) и скорости потери массы (б) немодифицированных полимеров

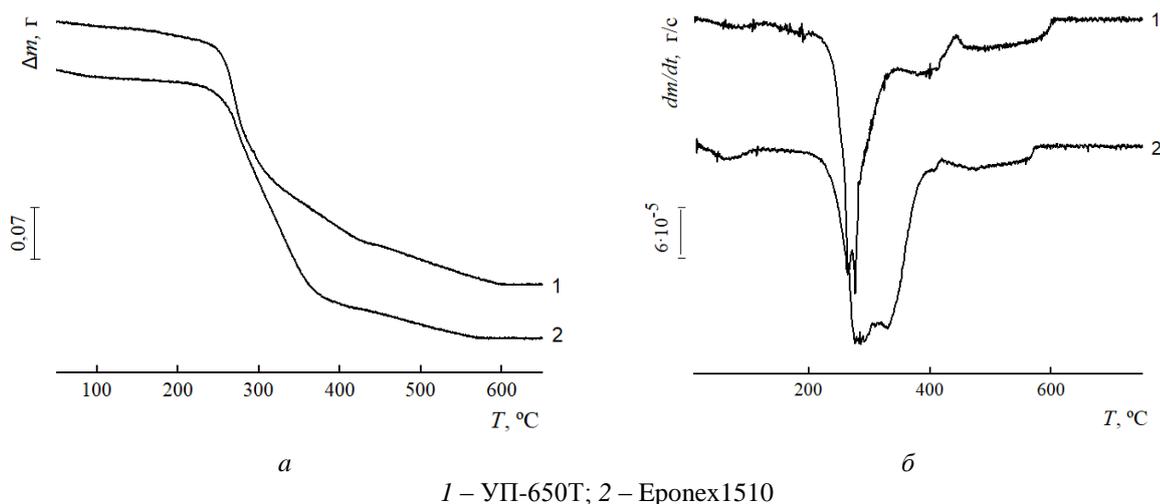


Рис. 5. Дериватографические кривые потери массы (а) и скорости потери массы (б) композитов, содержащих 2 масс.% TiO_2

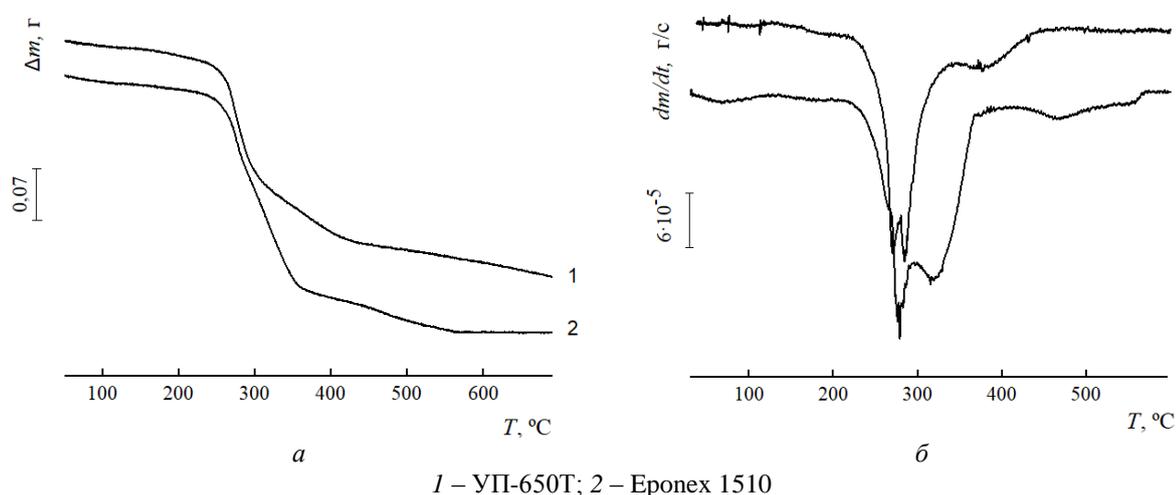


Рис. 6. Дериватографические кривые потери массы (а) и скорости потери массы (б) композитов, содержащих 5 масс.% TiO_2

Следует отметить, что у немодифицированного эпоксидного полимера аминного отверждения на основе УП-650Т, как более густосетчатого полимера, основная стадия термоокислительной деструкции протекает со значительно меньшей скоростью (рис. 4). Введение в полимерную матрицу титаноксидного наполнителя «сглаживает» разницу в скорости основной стадии деградации между образцами на основе разных эпоксидных смол (рис. 5, 6). При этом стадия самой активной потери массы композитов на основе диэпоксида занимает больший температурный интервал. Ввиду последнего факта можно предположить наличие в таких системах большего числа центров термической окислительной деструкции.

Газоволюмометрическим методом показано, что немодифицированный полимер и титаноксидные композиты подвергаются окислительным процессам ниже $200\text{ }^\circ\text{C}$. Проведено изучение термоокислительной деструкции полимера и композитов в присутствии кислорода при $180\text{ }^\circ\text{C}$. Типичные кинетические кривые поглощения кислорода пленочными образцами представлены на рис. 7. Линейной аппроксимацией участков кривых, соответствующих квазистационарному режиму автоокисления полимера и композитов, определялась максимальная скорость окисления (табл. 4).

Установлено, что при введении в полимер возрастающего количества титаноксидного наполнителя максимальная скорость окисления снижается от $6,4 \cdot 10^{-5}$ до $1,9 \cdot 10^{-5}$ моль·кг⁻¹·с⁻¹. Следовательно, диоксид титана ингибирует процесс автоокисления композитов, и при его концентрации 5 % скорость поглощения кислорода снижается более чем в 3 раза. Такие результаты согласуются с армирующим влиянием неорганического наполнителя на матрицу композитов (табл. 1).

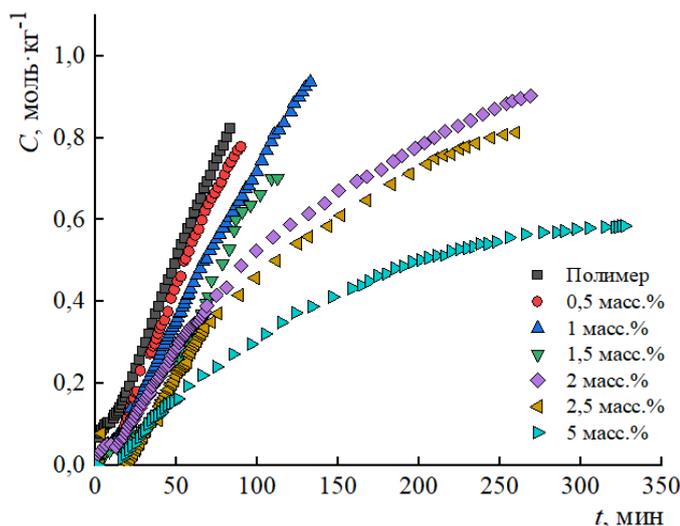


Рис. 7. Кинетические кривые поглощения кислорода пленочными образцами полимера и композитов (УП-650Т/Ancamine 2579) с различным содержанием TiO₂. T = 180 °С

Природу стабилизирующего влияния наполнителя предстоит еще выяснить. В литературных источниках говорится о том, что такие наполнители как диоксид титана и кремнезем могут препятствовать проникновению кислорода в объем композита [8]. В других источниках предположили участие частиц MeO₂ в вырожденном разветвлении кинетических цепей окисления субстрата и в обрыве RO₂-радикалов [9]. Последнее возможно ввиду наличия большого количества гидроксильных групп на высокоразвитой поверхности частиц нанонаполнителя [10].

Таблица 4
Максимальная скорость поглощения кислорода V_{\max} композитами (УП-650Т/Ancamine 2579). T = 180 °С

w(TiO ₂), масс.%	$V_{\max} \cdot 10^5$, моль·кг ⁻¹ ·с ⁻¹
0	6,40
0,5	4,82
1	3,64
1,5	2,83
2	2,57
2,5	2,02
5	1,94

Устойчивость титаноксидных композитов на основе эпоксидной смолы УП-650 к высокотемпературному окислению кислородом сравнили с результатами, полученными для систем на основе диглицидилового эфира дициклогексилпропана. Установлено, что диоксид титана в составе композитов на основе диэпоксида также ингибирует

процесс окисления композитов: с ростом степени наполнения скорость окисления образцов уменьшается (рис. 8). Существенное снижение скорости поглощения кислорода наблюдается уже при 2 масс.% TiO_2 , а при концентрации диоксида титана 5 масс.% скорость поглощения кислорода композитом ниже более чем в 2 раза по сравнению с немодифицированным полимером (табл. 5). При этом, устойчивость композитов, полученных с использованием смолы Eponex 1510, к окислительному процессу в целом ниже, и антиоксидантное действие наполнителя в них является менее выраженным. Это может быть обусловлено, во-первых, большей плотностью трёхмерной полимерной сетки на основе триэпоксида, о чем свидетельствуют более высокие значения температуры стеклования композитов. Во-вторых, при изучении термомеханических свойств композитов было установлено, что введение титаноксидного наполнителя в композиты на основе диглицидилового эфира дициклогексилпропана в большей степени снижает однородность их сетчатой структуры (табл. 2), что не может не отразиться на проникновении окислительного агента в объем композитов и устойчивости образцов к действию окислительной среды в целом. Соответственно, более неоднородная эпоксидная матрица проявляет меньшую устойчивость к действию кислорода.

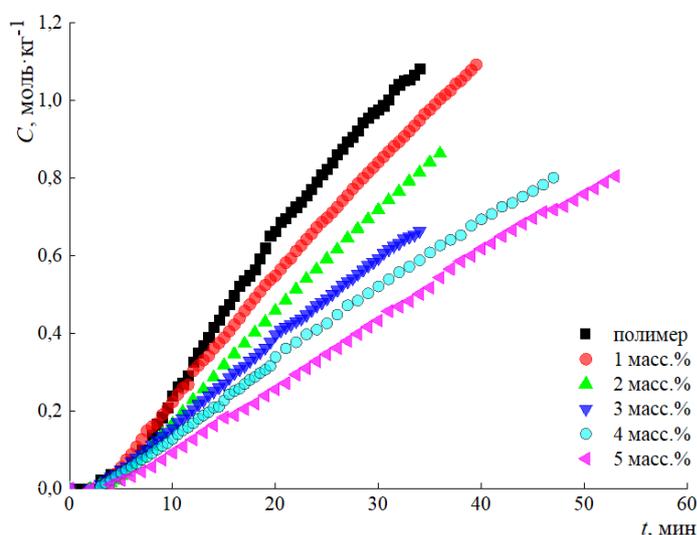


Рис. 8. Кинетические кривые поглощения кислорода пленочными образцами полимера и композитов (Eponex 1510/Ancamine 2579) с различным содержанием TiO_2 . $T = 180\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 5
Максимальная скорость поглощения кислорода V_{\max} композитами (Eponex 1510/Ancamine 2579). $T = 180\text{ }^\circ\text{C}$

$w(\text{TiO}_2)$, масс. %	$V_{\max} \cdot 10^4$, моль·кг ⁻¹ ·с ⁻¹
0	6,03
1	4,43
2	3,59
3	3,24
4	3,08
5	2,77

Выводы. Проведенное исследование показало, что золь-гель метод получения титаноксидного наполнителя может быть успешно осуществлен в среде низковязких циклоалифатических эпоксидных связующих. Способ синтеза эпоксидно-титаноксидных композитов в одну стадию позволяет не вводить органические

растворители в реакционную систему. Низкомолекулярные побочные продукты гидролитической поликонденсации алкоксида титана удаляются из образцов композитов в процессе их просушивания. Получены две серии образцов прозрачных стеклообразных (при комнатной температуре) композитов с различной степенью наполнения диоксидом титана и изучены их свойства.

Наполнитель формируется по типу «неорганическая сетка в органической полимерной матрице». При этом плотность Ti–O–Ti-сетки пропорциональна количеству вводимого тетрабутоксид титана в реакционную смесь, т. е. концентрации неорганической составляющей композитов. Присутствие титаноксидного наполнителя и его содержание в составе композитов оказывают влияние на параметры, характеризующие густоту сшивки сетчатой структуры и ее однородность. Формирующаяся в процессе синтеза композитов титаноксидная трехмерная сетка армирует эпоксидно-аминную полимерную матрицу. В случае использования эпоксидной смолы Epoxex 1510 для получения композитов возможно взаимодействие высокоразвитой поверхности частиц диоксида титана с вторичными гидроксильными группами в повторяющихся фрагментах олигомерных молекул. Такое взаимодействие приведет к образованию химической связи между органической и неорганической составляющими композитов (связи C–O–Ti).

Влияние титаноксидного наполнителя на топологическую структуру эпоксидных композитов отражается на свойствах образцов. Все полученные эпоксидно-неорганические композиты аминного отверждения в высокотемпературных условиях поглощают кислород с меньшей скоростью, в особой степени при концентрациях TiO₂, близких к 5 масс.%. Как результат, образцы композитов являются более устойчивыми к термоокислительной деградации в целом.

Исследования проводились в рамках государственного задания (номер госрегистрации 124012400357-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silica solid particles toughening, strengthening and anti-aging on epoxy resin / J. Ai, W. Cheng, P. Wang, W. Qian, Q. Chen // J. Appl. Polym. Sci. – 2020. – e50331. – 11 p. – URL: <https://doi.org/10.1002/app.50331>
2. Effect of Particle Size on the Mechanical Properties of TiO₂-Epoxy Nanocomposites / Y.-M. Choi, S.-A. Hwangbo, T.G. Lee, Y.-B. Ham // Materials. – 2021. – Vol. 14. – 2866. – 12 p. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma14112866>
3. TiO₂ reinforced high-performance epoxy-co-polyamide composite coatings: article / F. Alia, M. Waseema, R. Khurshida, A. Afzal // Prog. Org. Coat. – 2020. – Vol. 146. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105726>
4. Khamova, T.V. Methods and approaches of the sol-gel technology for the surface modification of aluminum oxide powders / T.V. Khamova, O.A. Shilova, S.V. Khashkovskii // Glass Phys. Chem. – 2017. – Vol. 43. – P. 571-584. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659617060062>
5. Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review / C. Verma [et al.] // React. Funct. Polym. – 2019. – 47 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741>
6. Лыга, Р. И. Формирование нанокомпозитов на основе эпоксидных смол и тетраэтоксисилана / Р. И. Лыга, В. М. Михальчук, Т. Г. Тюрина // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. – 2020. – № 3–4. – С. 48-57.
7. An overview of nanomaterials in fuel cells: Synthesis method and application / N. F. Raduwan [et al.] // Int. J. Hydrog. Energy. – 2022. – Vol. 47, Iss. 42. – P. 18468-18495. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.035>
8. Poly (methyl methacrylate)-TiO₂ nanocomposites obtained by non-hydrolytic sol-gel synthesis: the innovative tert-butyl alcohol route / D. Morselli, F. Bondioli, M. Fiorini, M. Messori // J. Mater. Sci. – 2012. – Vol. 47. – P. 7003-7012. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6651-4>
9. Preparation of SiO₂-GO hybrid nanoparticles and the thermal properties of methylphenylsilicone resins/SiO₂-GO nanocomposites / G. Wu [et al.] // Thermochim. Acta. – 2015. – Vol. 613. – P. 77-86. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2015.05.026>

10. Wang, Y. Polymeric organo-silane coatings for aluminum alloy corrosion protection by self-assembled method / Y. Wang, Y. Li, F. Wang // J. Chem. – 2012. – Vol. 9, No. 1. – P. 435-442. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/548143>

Поступила в редакцию 05.09.2024 г.

TITANIUM OXIDE FILLER IN EPOXY COMPOSITES PRODUCED BY SOL-GEL METHOD

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

Transparent titanium oxide composites based on low-viscosity cycloaliphatic epoxy resins were synthesized using sol-gel technology. Titanium tetrabutoxide was introduced into epoxy-amine reaction mixtures UP-650T/Ancamine 2579 and Eponex 1510/Ancamine 2579 to form TiO₂ particles. At the initial stages of synthesis, a sol of titanium oxide particles was formed directly in the polymer binder. The formation of titanium oxide and epoxy three-dimensional networks occurred simultaneously. The maximum content of inorganic filler in the composites was 5 wt.%. In both types of polymer matrices, titanium dioxide formed in situ by the sol-gel method exhibits a reinforcing effect (the temperature of transition to the highly elastic state of the composites shifts towards higher values) due to the formation of a titanium oxide framework inside the organic matrix. The homogeneity of the structure of the obtained samples depends on the filler content and the epoxy resin used for the synthesis. With an increase of titanium dioxide concentration in the composition of the composites, the resistance of the samples to oxidation by oxygen, as well as the thermal stability of the composites, increases. The temperature of the starting of main stage of thermo-oxidative destruction increased by 11 °C, and the temperature of 50 % mass loss of the samples – by 29 °C.

Keywords: sol-gel method; titanium dioxide; epoxy composites; properties; destruction.

Михальчук Владимир Михайлович
доктор химических наук, профессор,
профессор кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: v.m.mikhalchuk@mail.ru

Mikhal'chuk Vladimir Mihaylovich
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Physical Chemistry,
FSBEI HE "Donetsk State University",
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: v.m.mikhalchuk@mail.ru

Лыга Рита Ивановна
кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: lygarita@mail.ru

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

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

Vereskun Anastasia Dmitrievna
Engineer at the Department of Physical Chemistry,
FSBEI HE "Donetsk State University",
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: nastyave22@gmail.com

Мальцева Наталья Александровна
инженер кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: malt.natalia@gmail.com

Maltseva Natalia Alexandrovna
Engineer at the Department of Physical Chemistry,
FSBEI HE "Donetsk State University",
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: malt.natalia@gmail.com

Николаева Ольга Федоровна
инженер 2 категории кафедры физической химии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: nikolaevso_1975@mail.ru

Nikolaeva Olga Fedorovna
Engineer 2nd category at the Department of Physical
Chemistry, FSBEI HE "Donetsk State University",
Donetsk, DPR, RF.
E-mail: nikolaevso_1975@mail.ru

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 612.1/8

DOI: 10.5281/zenodo.13745208

EDN: IMJZGV

ВЛИЯНИЕ АНАЭРОБНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА УРОВЕНЬ ПОСТОЯННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА СПОРТСМЕНОВ

© 2024. Т. М. Брук, Н. С. Менькова, И. С. Баскаков

Метод нейроэнергетического картирования используется для оценки церебрального гомеостаза в большей степени в медицине. В спорте этот метод используется неоправданно редко, хотя имеет диагностическое значение и может служить маркером для оценки готовности к тренировочной и соревновательной деятельности, адаптационных возможностей организма спортсмена к физическим нагрузкам. В исследовании принимали участие 21 спортсмен-хоккеист. Измерялся уровень постоянных потенциалов коры головного мозга (УПП) до нагрузки и после. Результаты исследования зафиксировали значительное повышение церебрального гомеостаза после нагрузки анаэробного характера, что указывает на низкую устойчивость к стрессу, сниженные адаптационные возможности.

Ключевые слова: нейроэнергетическое картирование; уровень постоянных потенциалов; церебральный гомеостаз; психофизиологическое исследование; когнитивные функции; теппинг-тест; анаэробная нагрузка; хоккеисты.

Введение. Высокие достижения спортсменов тесным образом связаны с применением комплексного подхода к исследованию функционального состояния, который включает системную оценку индивидуальных адаптационных возможностей и позволяет подобрать оптимальные учебно-тренировочные нагрузки с учетом физиологических резервов организма атлетов. Нейрофизиологическая характеристика во взаимосвязи с показателями спортивной деятельности может использоваться в научном поиске методов лучшей результативности. Для оценки церебрального гомеостаза используется регистрация уровня постоянных потенциалов (УПП) коры головного мозга. В основном этот метод используется в медицине. Недостаточность работ по применению нейроэнергетического картирования в спортивной практике [1, 2] подчеркивает актуальность данного исследования. Применение нейроэнергетического картирования может носить диагностический характер как для оценки готовности спортсмена к тренировочной и соревновательной деятельности, так и использоваться для контроля за периодом восстановления.

Цель – выявить особенности функционального состояния квалифицированных спортсменов-хоккеистов при воздействии неспецифической физической нагрузки по показателям уровня церебрального энергообмена.

Объект – уровень энергетического обмена коры головного мозга квалифицированных спортсменов.

Предмет исследования – показатели уровня энергетического обмена в различных областях коры головного мозга.

Гипотеза исследования – предполагалось, что уровень постоянных потенциалов в 5 областях коры головного мозга, отвечающих за двигательную активность, возрастет в ответ на анаэробную физическую нагрузку и позволит использовать данный метод для оценки готовности спортсменов к тренировочной и соревновательной деятельности.

Материалы и методы. В эксперименте приняли участие высококвалифицированные спортсмены, представители ХК «СГУС» Смоленск – 21 человек в возрасте от 18 до 23 лет. Для оценки энергетического и метаболического обмена в коре головного мозга использовали методику нейроэнергокартирования (Нейро-КМ).

Нейроэнергокартирование – метод регистрации уровня постоянных потенциалов (УПП) коры головного мозга. Он отражает индивидуальные особенности общих и локальных энергозатрат, связанных с функциональным состоянием головного мозга и нервной системы в целом.

Регистрация уровня постоянных потенциалов (УПП) производилась монополярно в пяти отведениях: от нижне-лобной (Fz), центральной (Cz), затылочной (Oz), а также правой (Td) и левой (Ts) височных областей головы. Референтный электрод фиксировался на запястье правой руки. Регистрация УПП сначала осуществлялась в состоянии относительного физиологического покоя, а затем после нагрузочного 45-секундного теста анаэробного характера (с использованием велоэргометра Монарх). Выбор нагрузки обусловлен тем, что продолжительность пребывания хоккеиста на льду составляет в среднем 30–45 секунд.

Вместе с методом нейроэнергокартирования, аналогично до и после нагрузки, проводилось анкетирование спортсменов с помощью аппаратно-программного психодиагностического комплекса «Мультипсихометр». Оценивали кратковременную память, произвольное внимание и способность к логическому мышлению. Для оценки силы нервной системы использовали теппинг-тест по методике Е.П.Ильина.

Полученные результаты были обработаны статистически методом непараметрической статистики Манна-Уитни в программе Statistica 10.0.

Результаты исследования. В процессе исследования УПП головного мозга спортсменов-хоккеистов, было отмечено, что у 76 % обследуемых УПП повысился после 45-секундной физической нагрузки анаэробного характера (рис. 1). Повышение УПП по всем отведениям было зарегистрировано в диапазоне 7,83–12,39 мВ, что составляет 58 %. Это закономерно, т.к. при физических нагрузках растет энергообмен, увеличивается количество потребляемой глюкозы, а отсутствие достаточного количества кислорода в начале мышечной деятельности, ведет к нарастанию ацидоза и росту УПП [3].

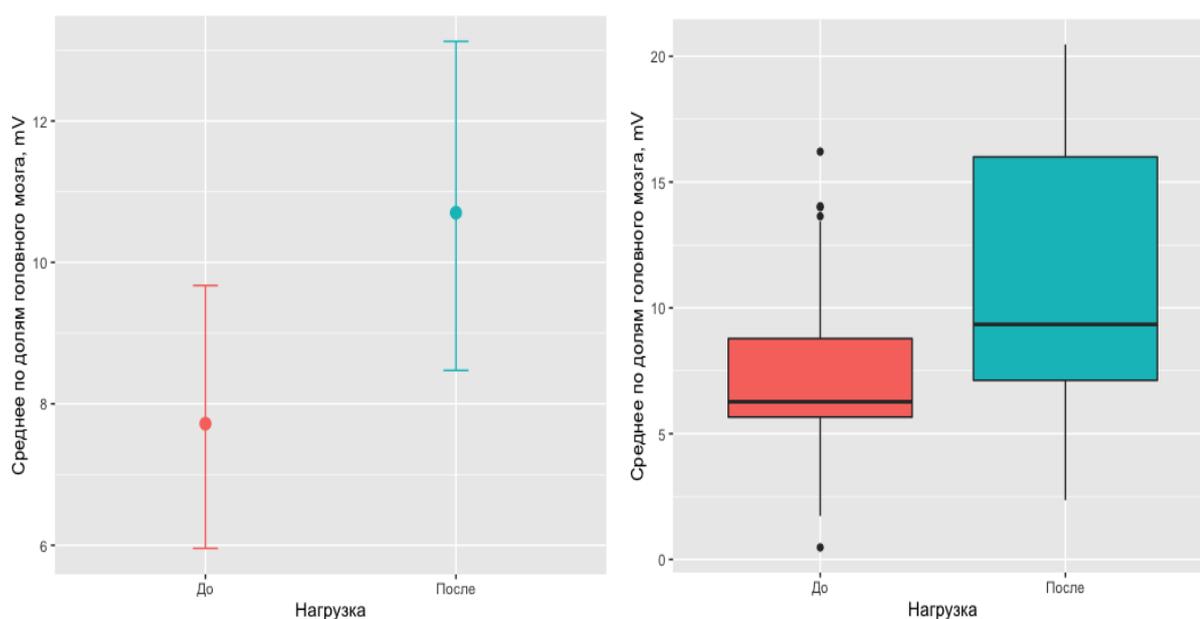


Рис. 1. Значение УПП среднее по всем отведениям до и после нагрузки (mean, median)

Лишь у 24 % изменение носило отрицательный характер. Снижение УПП среднего по всем отведениям составило 27 % (верхнее значение 10,42 мВ, нижнее 8,21 мВ). Причина снижения УПП в процессе тренировки в том, что кислотность в периферической крови нарастает более значительно, чем в мозге [4, 5].

УПП лобной доли достоверно увеличился (рис. 2) с 4,09 мВ до 8,20 мВ после нагрузки ($p=0,002857$). Это указывает на выраженное влияние физической нагрузки на показатели, отражающие уровень энергетического обмена в лобной зоне коры головного мозга, которая в наибольшей степени ориентирована на обеспечение произвольной моторной активности организма [2, 6].

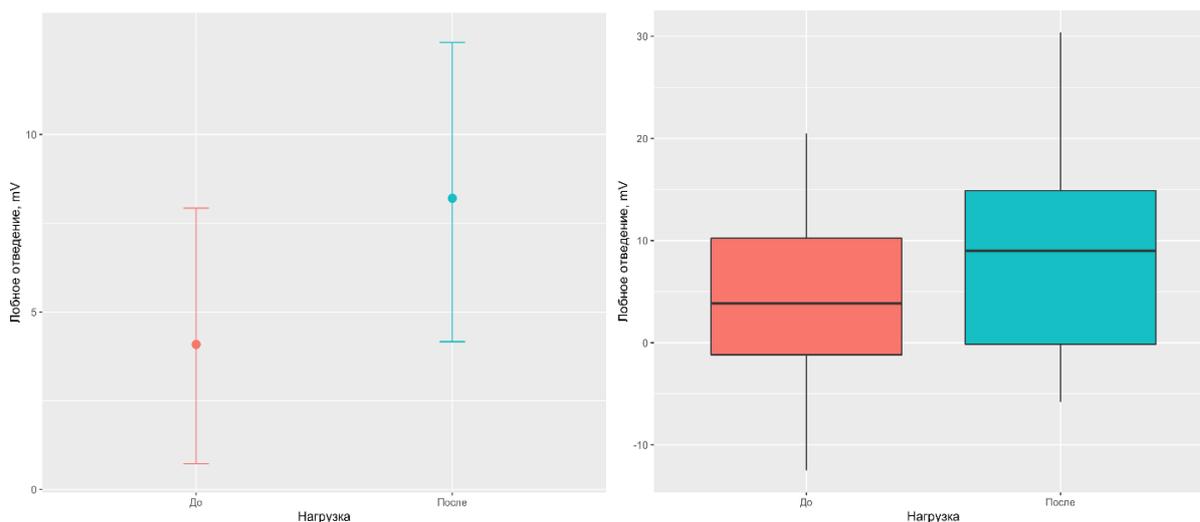


Рис. 2. Значение УПП в лобном отведении до и после нагрузки (mean, median)

Тенденции к повышению церебрального метаболизма зарегистрированы в центральной зоне (16,49 мВ в состоянии относительного физиологического покоя и 16,91 мВ после нагрузки), в затылочной зоне (9,58 мВ в состоянии относительного физиологического покоя и 11,57 мВ после нагрузки).

В правой и левой височных зонах соответственно наблюдаем достоверное повышение УПП (рис. 3, 4).

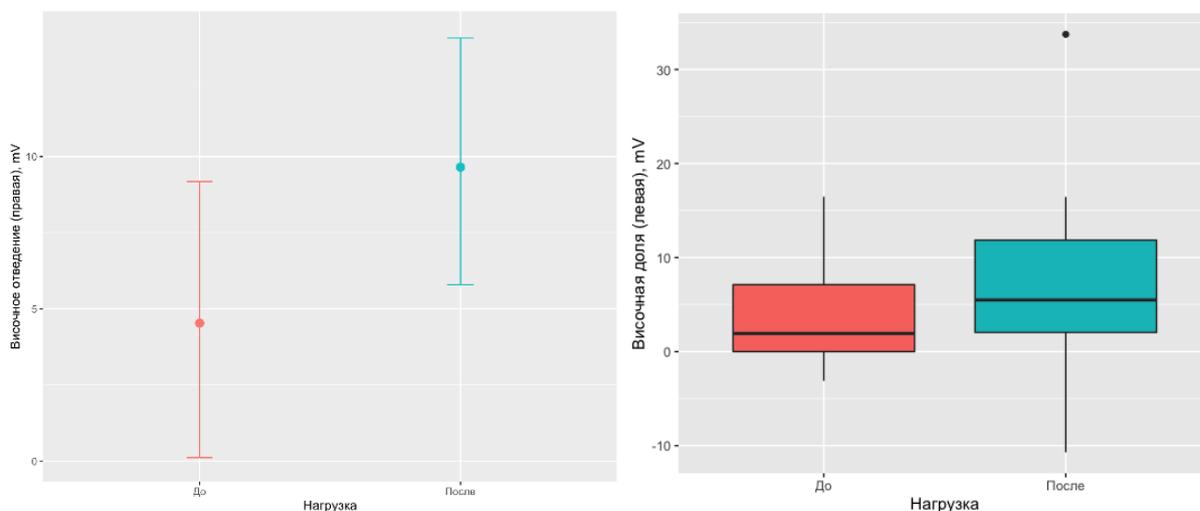


Рис. 3. Значение УПП в правом височном отведении до и после нагрузки (mean, median)

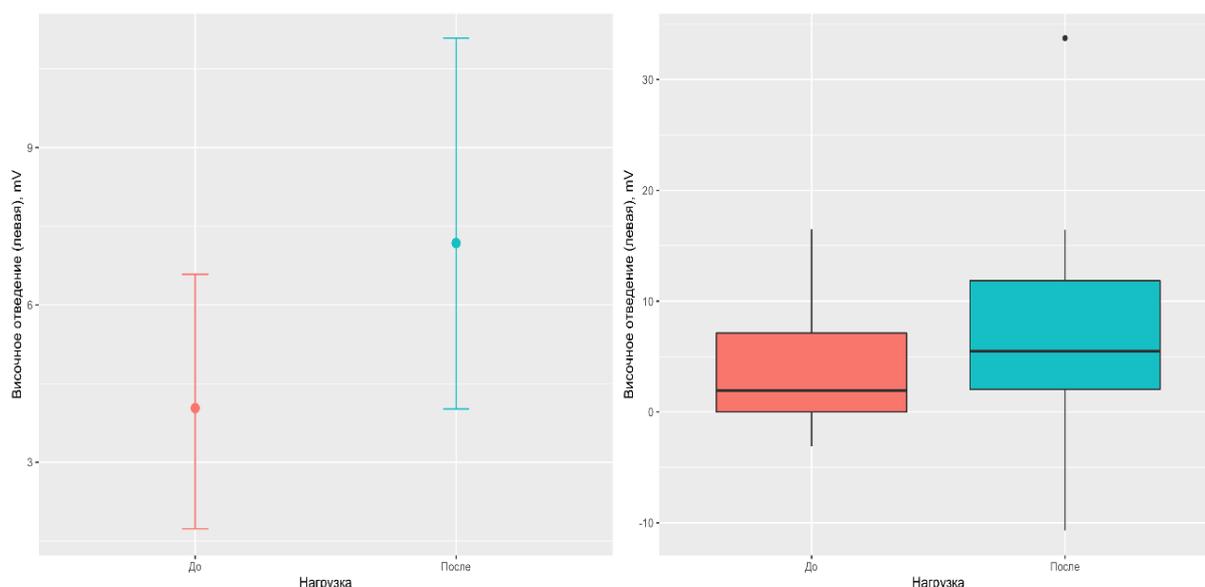


Рис. 4. Значение УПП в левом височном отведении до и после нагрузки (mean, median)

УПП увеличился справа с 4,53 мВ до 9,65 мВ после нагрузки ($p=0,01417$). В левом височном отведении УПП увеличился с 4,03 мВ до 7,18 мВ после нагрузки ($p=0,03192$).

Наблюдалась незначительная правовисочная латерализация, которая усилилась после нагрузки.

В ходе исследования когнитивных функций мы получили следующие данные, которые представлены в таблице. По результатам тестирования уровень продуктивности логического мышления достоверно повысился, точность снизилась, эффективность изменилась незначительно. Уровень произвольного внимания и кратковременной памяти достоверно повысились по всем параметрам.

Таблица

Результаты тестирования когнитивных функций

Параметр	Логическое мышление					
	продуктивность		точность		эффективность	
	До нагрузки	После нагрузки	До нагрузки	После нагрузки	До нагрузки	После нагрузки
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7
Min	43,3	43,3	63,3	53,3	25,5	19,8
Q1	46,7	60	70,4	66,7	34,3	38,2
Median	60	70	83,3	75	42,9	48,1
Mean	60,96	70,16	78,79	72,92	45,32	48,17
Q3	66,7	83,3	85,7	83,3	55,8	66
Max	90	96,7	90,5	96,7	78,8	92,6
sd	13,16	13,52	9,3	11,85	14,19	19
p-значение	0,013		0,006		0,627	
	Произвольное внимание					
Min	25	34,4	44,4	52,2	7,6	15,1
Q2	40,6	46,9	57,7	64	22,1	27,3
Median	43,8	62,5	69,2	70,8	28,1	39,2
Mean	47,49	59,37	68,85	73,5	29,92	41,2
Q4	56,3	68,8	80	83,3	34,6	55,5

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7
Max	81,3	84,4	90	95,5	62,2	77,1
sd	13,44	15,23	13,18	13,2	13,96	18,08
p-значение	0,0001		0,096		0,0009	
Кратковременная память						
Min	33,3	46,7	40	46,7	10	15,6
Q3	56,7	76,7	70	76,7	35,2	54,3
Median	70	86,7	76,7	86,7	52,8	72,2
Mean	67,3	81,91	74,56	82,75	48,68	66,61
Q5	80	93,3	83,3	93,3	62,8	85,6
Max	96,7	100	96,7	100	92,6	100
sd	17,79	14,05	15	14,26	22,84	23,53
p-значение	0,0005		0,006		0,001	

Анализ результатов тестирования спортсменов на силу нервной системы проводили по трем индексам [7]. Сравнивали эффективность, силу и выносливость нервной системы до и после физической нагрузки анаэробного характера. Незначительно увеличился индекс эффективности нервной системы, остальные показатели практически не изменились. Примерно 50 % исследуемых имеет средний или средне-слабый тип нервной системы. На рисунке 5 отражены данные теппинг-теста до и после физической нагрузки, достоверных отличий не по одному 5-секундному отрезку не выявлено.

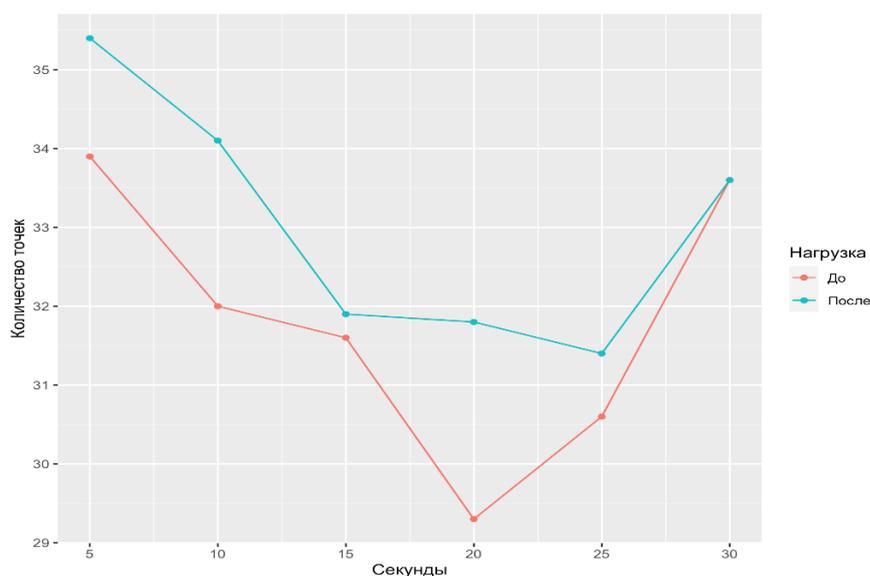


Рис. 5. Результаты теппинг-теста до и после нагрузки

Анализ взаимосвязи показателей изменения церебрального энергообмена с результатами лабильности когнитивных функций, силой нервных процессов до и после физической нагрузки, значимого результата не выявил.

Вывод. УПП, отражающий энергетические процессы в мозге, может быть использован для оценки резервных возможностей спортсмена и прогноза спортивных достижений уже на стадии тренировок [8]. Повышение значения церебрального гомеостаза после небольшой физической нагрузки анаэробного характера, указывает на низкую устойчивость к стрессу, сниженные адаптационные возможности, что подтверждают ранее проведенные исследования [2, 3, 5, 6] и, соответственно, более

низкие результаты в спортивной деятельности по анализу тренера (снижены такие показатели как количество выполненных бросков по воротам, заброшенных шайб, процент реализации бросков по воротам). У лиц с меньшим усредненным УПП, более низким уровнем церебральных энергозатрат, анаэробный порог более высокий, спортивные достижения выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косорыгина К.Ю. Оценка кумулятивного эффекта низкоинтенсивного лазерного излучения для оптимизации функционального состояния и специальной работоспособности высококвалифицированных спортсменов-велосипедистов: автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.03.01 / Косорыгина Кристина Юрьевна; СГУС. – Смоленск, 2015. – 178 с.
2. Терехов, П.А. Физиологическое обоснование применения внутренировочных средств для потенцирования физической работоспособности спортсменов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 1.5.5 / Терехов Павел Александрович; СГУС. – Смоленск, 2023. – 150 с.
3. Фокин, В. Ф. Энергетическая физиология мозга / В.Ф. Фокин, Н.В. Пономарева. – М.: «Антидор», 2002. – 248 с.
4. Анализ уровня постоянного потенциала головного мозга как метод оперативного и текущего контроля состояния спортсменов / А.А. Баба-Заде, Н.Н. Озолин, В.Ф. Фокин, Л.Л. Клименко, А.Ф. Конькова // Теория и практика физической культуры. – 1989. – № 5. – С. 42-44.
5. Анализ энергетической активности мозга по данным нейропсиходинамического тестирования при комплексном воздействии эргогенных и физико-терапевтических средств потенцирования на организм спортсменов / Т.М. Брук, Ф.Б. Литвин, П.А. Терехов, И.О. Смолдовская // Олимпийский спорт и спорт для всех : материалы XXV Междунар. науч. Конгр. (Минск, 15–17 окт. 2020 г.) – Минск : БГУФК, 2020. – Ч. 2. – С. 325-331.
6. Комплексный подход в оценке функционального состояния высококвалифицированных спортсменов циклических видов спорта в подготовительный период / Т.М. Брук, К.А. Стрелычева, Н.В. Осипова, К.Ю. Косорыгина, Н.Д. Титкова // Спортивная медицина: наука и практика. – 2017. – Т. 7, № 1. – С. 24-28.
7. Нопин, С.В. Теппинг-тест как показатель эффективности, силы и выносливости нервной системы у спортсменов различных видов спорта / С.В. Нопин, Ю.В. Корягина, Ю.В. Кушнарева // Современные вопросы биомедицины. – 2022. – № 2 (6). – С. 86-91.
8. Ващенко, А.С. Оценка устойчивых постоянных потенциалов головного мозга в контроле за уровнем функциональной готовности спортсменов к тренировочной и соревновательной деятельности / А.С. Ващенко, А.С. Павлов // Спорт и медицина. Сочи-2013 : матер. IV-й Всеросс. с междунар. уч. науч.-практ. конф. (Сочи, 19-22 июня 2013 г.) – Сочи, 2013. — С. 38-41.

Поступила в редакцию 14.07.2024 г.

THE EFFECT OF ANAEROBIC PHYSICAL ACTIVITY ON THE LEVEL OF CONSTANT POTENTIALS OF THE CEREBRAL CORTEX OF ATHLETES

T. M. Brook, N. S. Menkova, I. S. Baskakov

The method of neuroenergetic mapping is used to assess cerebral homeostasis to a greater extent in medicine. In sports, this method is used unreasonably rarely, although it has diagnostic significance and can serve as a marker for assessing readiness for training and competitive activities, the adaptive capabilities of the athlete's body to physical exertion. 21 hockey athletes participated in the study. The level of constant potentials of the cerebral cortex (LCC) was measured before and after exercise. The results of the study recorded a significant increase in cerebral homeostasis after anaerobic exercise, which indicates low resistance to stress and reduced adaptive capabilities.

Keywords: neuroenergetic mapping; level of constant potentials; cerebral homeostasis; psychophysiological research; cognitive functions; tapping test; anaerobic load; hockey players.

Брук Татьяна Михайловна

доктор биологических наук, профессор;
зав. кафедрой биологических дисциплин
ФГБОУ ВО «Смоленский государственный
университет спорта», г. Смоленск, РФ.
E-mail: biologicheskixdisciplin@mail.ru

Менькова Наталья Сергеевна

аспирант кафедры биологических дисциплин
ФГБОУ ВО «Смоленский государственный
университет спорта», г. Смоленск, РФ.
E-mail: menkovanata@mail.ru

Баскаков Иван Святославович

инженер-исследователь
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр
химической физики им. Н.Н. Семенова» РАН,
г. Москва, РФ.
E-mail: ivan12@inbox.ru

Brooke Tatyana Mikhailovna

Doctor of Biological Sciences, Professor;
Head of the Department of Biological Disciplines,
Smolensk State University of Sports, Smolensk, RF.
E-mail: biologicheskixdisciplin@mail.ru

Menkova Natalia Sergeevna

Postgraduate student of the Department of Biological
Sciences,
Smolensk State University of Sports, Smolensk, RF.
E-mail: menkovanata@mail.ru

Baskakov Ivan Svyatoslavovich

Research Engineer,
N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical
Physics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, RF.
E-mail: ivan12@inbox.ru

ПЫЛЕУДЕРЖИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА ПОРОДНЫХ ОТВАЛАХ ДОНБАССА

© 2024. Д.А. Достовалова, А.З. Глухов, Н.С. Подгородецкий

Проведена сравнительная оценка пылевой нагрузки некоторых озелененных и самозаросших отвалов Донецко-Макеевской городской агломерации и территории их СЗЗ по накоплению пыли листовых пластинок *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L., *Robinia pseudoacacia* L. как аборигенных видов, характеризующихся высокой пылефильтрующей способностью и распространившихся на отвалах, представленных различным составом слагающих пород и *Juglans regia* L. как самозаносного вида, пылеудерживающие свойства которого не изучены.

В ходе исследований установлено, что *Robinia pseudoacacia* L. имеет самые высокие пылеудерживающие свойства из всех исследованных растений, а самые низкие – *Juglans regia* L. Наиболее запыленными являются листья древесных растений породного отвала ш. № 9 Капитальная ввиду больших участков каменистой перегоревшей породы. Предполагается, что на данном отвале еще активны процессы окисления. Для *Robinia pseudoacacia* L., *Acer platanoides* L. и *Acer negundo* L. показатели пылевой нагрузки на отвалах превышают показатели в СЗЗ в среднем в 1,15 раза, а для *Juglans regia* L. – в 3 раза. Хотя зачастую *Juglans regia* L. не используется для рекультивации породных отвалов, он скорее всего является самозаносным видом.

Проведенные мероприятия по технической и биологической рекультивации способствуют снижению пылевой нагрузки территории.

Ключевые слова: шахтный породный отвал, Донецко-Макеевская городская агломерация, пылеудерживающие свойства, пылевая нагрузка

Введение. Выветривание горных пород сопровождается образованием частиц крупно- и мелкодисперсной пыли, рассеивающейся в атмосферном воздухе в сухом виде и смываемой атмосферными осадками. Биологическая рекультивация шахтных породных отвалов проводится с использованием растений с повышенной пылефильтрующей способностью – тополь бальзамический, акация белая, лиственница Сукачева, сосна обыкновенная, клен остролистный и др. [1, 2].

Листья древесных растений задерживают до 40 % от валового количества выпавшей пыли, что составляет 1,2 ... 3,2 г/м² листовой поверхности [1]. Загрязнение приземной атмосферы пылью также является существенным деградирующим условием по отношению к окружающей среде и растениям. В районе расположения урбаноземов, урбанотехноземов, реплантоземов наблюдается повышение значений поврежденности листьев деревьев и кустарников в сравнении с другими территориями. В районах расположения этих типов почвогрунтов установлены положительные корреляционные зависимости на среднем и высоком уровне [2].

В результате исследований Демиденко Г.А. установлено, что показатели накопления пыли на листовых пластинках города Красноярска показывают взаимосвязь между содержанием этих элементов и уровнем антропогенного загрязнения [3].

Установлено, что в тренде эффективности по пылеулавливанию на территории Донбасса виды растений первой категории расположены в следующем списке: *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Betula Pendula* и *Robinia pseudoacacia*. [4].

Древесные и кустарниковые виды растений являются эффективным фильтром, который обладает способностью осажать находящиеся в воздухе твердые частицы пыли и сажи, а также поглощать из воздуха и частично усваивать газообразные

примеси. Учеными доказано, что 1 га зеленых насаждений очищает из воздуха до 60–70 т пыли в год, уменьшая ее концентрацию на 25–45 % [5].

Первоначальным этапом исследований может выступать определение количества пыли на площади одного конкретного листа и ее процентное соотношение. Имея выборку листьев с одного дерева и площадь посадки конкретного вида можно определить пылевую нагрузку на отдельную территорию.

Целью исследования является сравнительная оценка пылевой нагрузки некоторых озелененных и самозаросших отвалов Донецко-Макеевской городской агломерации и территории их СЗЗ по накоплению пыли листовых пластинок *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L., *Robinia pseudoacacia* L. как аборигенных видов, характеризующихся высокой пылефильтрующей способностью и распространившихся на отвалах, представленных различным составом слагающих пород и *Juglans regia* L. как самозаносного вида, пылеудерживающие свойства которого не изучены.

По данным Госкомэкополитики при Главе ДНР на территории Республики насчитывается около 600 породных отвалов, большинство из которых расположены на административных территориях городов Донецк (144), Макеевка (118), Шахтерск (69) и Торез (67). Техногенная нагрузка в Донбассе в 5–10 раз выше средней. Общая площадь техногенных объектов на территории некоторых городов области достигает 10 % и более от их площади.

В работе проводятся сравнительные исследования пылевой нагрузки озелененных и самозаросших отвалов Донецко-Макеевской городской агломерации в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ). Практически от всех отвалов на расстоянии 500 м находятся жилые и производственные объекты.

В качестве модельных выбраны следующие породные отвалы шахт: озелененный отвал бывш. 6/14 (Червоногвардейский район, г. Макеевка), озелененный отвал ш. 5/6 им. Димитрова (Калининский район, г. Донецк), озелененный отвал ш. Заперевальная (Буденновский район, г. Донецк) и самозаросший отвал ш. № 9 Капитальная (Пролетарский район, г. Донецк).

Отвалы на данный момент являются потухшими без имеющихся очагов горения. Возраст отвалов примерно одинаковый – 45–60 лет. Температура в тени и под кронами деревьев составляет 20–22 °С, на местах попадания солнечных лучей – до 30 °С (замеры проводились в мае 2024 года). Породы на отвалах слабовыветренная, состоит из обломков породы разных размеров. Содержание фракции менее 1 мм от 11 до 27 %. Отвалы находятся в стадии окисления и массового поселения растений.

Отвал ш. 5/6 имеет наибольший возраст среди исследованных отвалов (57 лет) с окончания эксплуатации, что предположительно и обуславливает самые низкие показатели запыленности ввиду максимальной выветренности породы. Отвал ш. Заперевальная заселен растениями только на половину, верхняя часть его является окисляемой и перегоревшей, возможно это влияет на высокий уровень пыли на листьях растений, находящихся на уровнях ниже. Отвал ш. 6/14 также имеет окаменевшие остатки перегоревшей породы. Отвал ш. № 9 Капитальная является практически полностью заросшим, но фракция на многих участках представляет собой в большей степени породу, чем почвенный субстрат.

В ходе исследования применялись обзорный, аналитический, натурный и экспериментальный методы.

Отбор проб растительного материала производился в несколько этапов в июне, июле и августе 2024 года в пределах определенной площадки (около 25 м²), с высоты 1,5–2 м (высота слоя воздуха, вдыхаемого человеком) в 10 кратной повторности в соответствии с установленной методикой [6].

Площадки отбора ориентированы на разных уровнях породного отвала, а также в пределах СЗЗ.

Площадь листа высчитывалась путем обмера листовых пластинок вдоль и поперек и умножения на коэффициент. Коэффициент колеблется для различных видов древесных растений от 0,60 до 0,66. Масса пыли рассчитывается как разница между вторым и первым взвешиванием в мг. Количество пыли определяется как соотношение массы пыли к площади листовой пластинки в мг на 1 см² листа. [7].

Результаты исследований представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

Результаты определения пылевой нагрузки отвалов Донецко-Макеевской агломерации по накоплению пыли листовыми пластинками *Robinia pseudoacacia* L.

Отвал	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки на отвале	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , на отвале	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки в СЗЗ	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , в СЗЗ
Ш. 6/14	6,8	0,24	6,4	0,28
Ш. 5/6 им. Димитрова	4,2	0,14	3,8	0,28
Ш. Заперевальная	3,07	0,2	2,9	0,24
Ш. № 9 Капитальная	3,2	0,27	2,8	0,32

Таблица 2

Результаты определения пылевой нагрузки отвалов Донецко-Макеевской агломерации по накоплению пыли листовыми пластинками *Acer negundo* L.

Отвал	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки на отвале	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , на отвале	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки в СЗЗ	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , в СЗЗ
Ш. 6/14	0,63	0,19	0,5	0,25
Ш. 5/6 им. Димитрова	1,02	0,27	1,03	0,17
Ш. Заперевальная	0,48	0,096	0,38	0,06
Ш. № 9 Капитальная	1,2	0,024	1,0	0,02

Таблица 3

Результаты определения пылевой нагрузки отвалов Донецко-Макеевской агломерации по накоплению пыли листовыми пластинками *Acer platanoides* L.

Отвал	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки на отвале	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , на отвале	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки в СЗЗ	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , в СЗЗ
Ш. 6/14	0,52	0,8	0,51	0,8
Ш. 5/6 им. Димитрова	0,38	0,5	0,38	0,55
Ш. Заперевальная	0,48	0,41	0,48	0,3
Ш. № 9 Капитальная	1,04	1,11	0,92	0,96

Таблица 4

Результаты определения пылевой нагрузки отвалов Донецко-Макеевской агломерации по накоплению пыли листовыми пластинками *Juglans regia* L.

Отвал	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки на отвале	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , на отвале	Масса пыли, мг, с 1 листовой пластинки в СЗЗ	Количество пыли на листовой пластинке, мг/см ² , в СЗЗ
Ш. 6/14	3,9	3,3	3,7	1,6
Ш. 5/6 им. Димитрова	0,8	0,3	0,3	0,13
Ш. Заперевальная	3,2	1,9	3,18	1,04
Ш. № 9 Капитальная	0,08	0,025	0,048	0,015

В ходе статистической обработки результатов исследований установлено, что для *Robinia pseudoacacia* L. количество пыли составляет в среднем $0,21 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,056 \text{ мг/см}^2$), а в пределах СЗЗ – до $0,28 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,033 \text{ мг/см}^2$). Разность между двумя средними значениями этих двух зависимых групп составляет $0,067 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение – $0,049 \text{ мг/см}^2$). Значение t-критерия Стьюдента составляет 2,78. Различия в количестве оседаемой пыли на отвале и СЗЗ статистически достоверны на высоком уровне значимости ($p = 0,069$). Так как рассчитанное значение критерия больше критического (для 4 степеней свободы значение t-критерия Стьюдента составляет 2,77), делаем вывод о том, что наблюдаемые различия статистически значимы.

Для *Acer negundo* L. количество пыли составляет в среднем $1,69 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет 3%), а в пределах СЗЗ – до $0,17 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,08 \text{ мг/см}^2$). Разность между двумя средними значениями этих двух зависимых групп составляет $1,52 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение – $2,9 \text{ мг/см}^2$). Значение t-критерия Стьюдента составляет 1,01 ввиду высокой варьированности полученных показателей. Для *Acer platanoides* L. количество пыли составляет в среднем $0,71 \text{ мг/см}^2$ на отвале (стандартное отклонение составляет $0,32 \text{ мг/см}^2$), а в пределах СЗЗ – до $0,65 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,29 \text{ мг/см}^2$). Разность между двумя средними значениями этих двух зависимых групп составляет $0,05 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение – $0,09 \text{ мг/см}^2$). Значение t-критерия Стьюдента составляет 1,13 ввиду высокой варьированности полученных показателей. Пылевая нагрузка на отвале № 9 Капитальная значительно превышает нагрузку в его СЗЗ и является максимальной среди рассмотренных отвалов, что требует дальнейших исследований с целью выявления способствующих факторов влияния.

Для *Juglans regia* L. количество пыли составляет в среднем $1,4 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,52 \text{ мг/см}^2$), а в пределах СЗЗ – до $0,69 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение составляет $0,76 \text{ мг/см}^2$). Разность между двумя средними значениями этих двух зависимых групп составляет $0,69 \text{ мг/см}^2$ (стандартное отклонение – $0,77 \text{ мг/см}^2$). Значение t-критерия Стьюдента составляет 1,78. Различия в количестве оседаемой пыли на отвале и СЗЗ статистически достоверны на высоком уровне значимости ($p = 0,17$).

Выводы. В ходе исследований установлено, что *Robinia pseudoacacia* L. имеет самые высокие пылеудерживающие свойства из всех исследованных растений, а самые низкие – *Juglans regia* L. Наиболее запыленными являются листья древесных растений породного отвала ш. № 9 Капитальная ввиду больших участков каменистой перегоревшей породы. Предполагается, что на данном отвале еще активны процессы окисления. Для *Robinia pseudoacacia* L., *Acer platanoides* L. и *Acer negundo* L. показатели пылевой нагрузки на отвалах превышают показатели в СЗЗ в среднем в 1,15 раза, а для *Juglans regia* L. – в 3 раза. Хотя зачастую *Juglans regia* L. не используется для рекультивации породных отвалов, он скорее всего является самозаносным видом.

На отвале бывш. ш. 6/14 пылевая нагрузка превышена в 3 раза по сравнению с нормой и в 2 раза наблюдается превышение нормативов в пределах СЗЗ.

На отвале ш. 5/6 им. Димитрова пылевая нагрузка превышена в 10 раз по сравнению с нормой и в 2 раза наблюдается превышение нормативов в пределах СЗЗ.

На отвале ш. Заперевальная пылевая нагрузка превышена в 3 раза по сравнению с нормой и в 3 раза наблюдается превышение нормативов в пределах СЗЗ.

На отвале ш. № 9 Капитальная пылевая нагрузка превышена в 30 раз по сравнению с нормой и в 10 раз наблюдается превышение нормативов в пределах СЗЗ.

Проведенные мероприятия по технической и биологической рекультивации способствуют снижению пылевой нагрузки территории.

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ Донецкий ботанический сад по теме FREG-2023-0002 «Качественные и функциональные характеристики почв сельскохозяйственных угодий в степной зоне и пути восстановления их биологической продуктивности», № 123101300198-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцова Д.С. Специфичность пылеосаждения травянистыми растениями в промышленно развитом Донбассе // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Книга 2– Киров, 2022.– С. 210-213.
2. Злотникова Т.В., Пахомова Д.И. Пылеулавливающая способность листьев различных древесных пород, используемых в насаждениях // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Абакана, 2023. – С. 5-8.
3. Чернышенко О.В. Пылефильтрующая способность древесных растений // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – Москва, 2012. – С. 7-10.
4. Ларионов М.В. Факторы деградации почв и атмосферного воздуха и их влияние на состояние растений в городских и пригородных экосистемах // Самарский научный вестник. – Т. 9, № 2 (31). – Самара, 2020. – С. 78–85.
5. Демиденко Г.А. Интенсивность загрязнения листьев древесных растений города Красноярска // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. – Улан-Удэ, 2021. – № 4(65). – С. 123–130.
6. Скларова С.В. Пылеулавливающая эффективность древесных и кустарниковых растений в промышленном городе Донбасса // Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности / Материалы V Международной научной конференции. – Том 2. – Под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Донецк, 2020. – С. 257-259.
7. Жумадилова А.Ж. Пылеудерживающая способность древесных и кустарниковых растений // Новости науки Казахстана. – Алматы, 2014. – № 2(120). – С. 38 - 48.
8. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. – М.: Гидромет, 1981. – 108 с.
9. Методы биохимического анализа растений. – Л.: ЛГУ, 1978. – 280 с.

Поступила в редакцию 29.08.2024 г.

DUST-RETAINING PROPERTIES OF WOODY PLANTS ON THE ROCK DUMPS OF DONBASS

D.A. Dostovalova, A.Z. Glukhov, N.S. Podgorodetsky

A comparative assessment of the dust load of some landscaped and self-overgrown dumps of the Donetsk-Makeyevka urban agglomeration and the territory of their SPZ was carried out on the accumulation of dust from leaf plates *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L., *Robinia pseudoacacia* L. as native species characterized by high dust-filtering ability and spread on dumps represented by different composition of composing rocks and *Juglans regia* L. as a self-bearing species, the dust-retaining properties of which have not been studied.

During the research, it was found that *Robinia pseudoacacia* L. has the highest dust-retaining properties of all the studied plants, and the lowest - *Juglans regia* L. The leaves of woody plants of the rock dump sh. No. 9 Kapitalnaya are the dustiest due to large areas of stony burnt-out rock. It is assumed that the oxidation process is still active at this dump. For *Robinia pseudoacacia* L., *Acer platanoides* L. and *Acer negundo* L., the dust load indicators on the dumps exceed those in the SPZ by an average of 1.15 times, and for *Juglans regia* L. – 3 times. Although often *Juglans regia* L. it is not used for the reclamation of rock dumps, it is most likely a self-bearing species.

The measures taken for technical and biological reclamation contribute to reducing the dust load of the territory.

Keywords: mine rock dump, Donetsk-Makeyevskaya urban agglomeration, dust-retaining properties, dust load.

Достовалова Дарья Александровна
аспирант, младший научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории
экологической информатики и моделирования
ФГБНУ «Донецкий ботанический сад»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: dasha.dostovalova1997@mail.ru

Глухов Александр Захарович
доктор биологических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Донецкий ботанический сад»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: glukhov.az@mail.ru

Подгородецкий Николай Сергеевич
кандидат технических наук, доцент
кафедры техносферной безопасности
ФГБОУ ВО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
г. Макеевка, ДНР, РФ.
E-mail: n.s.podgorodetskiy@donnasa.ru

Dostovalova Daria Alexandrovna
Postgraduate student, Junior Researcher
at the Research Laboratory
of Environmental Informatics and
Modeling,
Donetsk Botanical Garden,
Donetsk, DPR, RF.

Glukhov Alexander Zakharovich
Doctor of Biological Sciences, Professor,
Chief Researcher,
Donetsk Botanical Garden,
Donetsk, DPR, RF.

Podgorodetsky Nikolas Sergeevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Technosphere Safety,
Donbass National Academy of Civil engineering and
Architecture,
Makeyevka, DPR, RF.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НЕКОТОРЫХ СТАРИННЫХ УСАДЕБНЫХ ПАРКОВ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ РФ ПО КРИТЕРИЯМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ

© 2024. А.А. Гайворонская, Л.Н. Анищенко

На основе многолетних натурных исследований маршрутным методом с использованием геоботанических, лесотипологических, геоэкологических методик описаны компоненты биологической устойчивости лесных сообществ в 15 старинных усадебных парках в пределах Брянской области. Исследованные объекты – антропогенно-трансформированные комплексы, которые сходны и типичны для биогеографических условий нечерноземья по компонентам фиторазнообразия. Сформировавшиеся в результате демулационных сукцессионных процессов лесные сообщества на территории старинных усадебных парков имеют своеобразные признаки, в том числе и касающиеся естественного возобновления видов-доминантов и эдификаторов. На большей части урочищ присутствует средняя степень естественного возобновления, что обеспечивает разновозрастность и относительную саморегуляцию состояния древостоев. Анализ результатов инвентаризации показал отсутствие условий для динамического гомеостатического равновесия в старинных усадебных парках. Основные элементы биоустойчивости – элементы фиторазнообразия, мозаичности в распространении видов, а также разнообразии местообитаний, урочищ ландшафтов и другие – характеризуются низкими значениями. Наиболее благоприятная ситуация с поддержанием гомеостатического равновесия выявлена для парков и лесных сообществ усадьбы Любин Хутор, Ляличи, Корецких, Дуниных-Борковских: относительное биоравновесие поддерживается гетерогенностью структурного, видового (таксономического), ландшафтного разнообразия.

Ключевые слова: биологическая устойчивость, лесные сообщества, старинные усадебные парки, гетерогенность сообществ, Брянская область, Нечерноземье РФ.

Введение. Исследования отечественных и зарубежных авторов, посвященные поиску индикаторных показателей, позволяющих выявить гомеостатическую позицию растительных сообществ, рассматривают структурное и видовое разнообразие биоценозов, зависящих от географических и ландшафтных особенностей местности [1–5]. Наиболее часто упоминаются такие параметры, как видовое разнообразие, эколого-ценотический состав, стабильность эдификаторов и доминирующих видов, создающих и поддерживающих среду [6, 7]. Также отмечается гетерогенность мозаичности почвенного покрова и увеличение сложности лесных структур за счёт валежа и микросукцессионных смен при разной степени разложения древесины. При обобщении разноплановых изысканий в лесных сообществах можно отметить, что все отмеченные процессы, диагностированные вышеописанными показателями, стимулируют в биогеоценозах увеличение межвидовых взаимодействий, в том числе и с участием элементов зооценозов, т.е. создают основу для функционального разнообразия [5, 8, 9].

В зарубежных работах для обозначения возможности поддержания гомеостатического равновесия лесов на антропогенно-преобразованных территориях введён термин «управляемые лесные ландшафты», в которых выявляются виды с «функциональной избыточностью», ключевые виды. Они позволяют прогнозировать стабильность сетевых видовых взаимодействий и служат «лучшими инструментами мониторинга управляемых лесов» [4, 10, 11].

Фитоценозы старинных усадебных парков (УПр) также попадают в категорию «управляемых лесов». Из-за многокомпонентности сложность сформировавшихся в них лесов без лесокультурообразующих мероприятий высока. Однако исследований, которые

выявляют закономерности процессов становления, развития и устойчивости (структурных и видовых особенностей) в усадебных парках, недостаточно. Они касаются в основном таксономического разнообразия. В настоящей работе поставлена цель исследования – выявить элементы биологической устойчивости лесных сообществ в старинных усадебных парках Брянской области (центре староосвоенного региона Нечерноземья РФ) на основе фитоценологического, структурного и геоэкологического разнообразия.

Степень устойчивости лесных сообществ, в том числе и формирующихся в результате естественных сукцессионных процессов в УПр, зависит от способности к адаптациям при стрессовых условиях, а также эффективности саморегуляционных процессов, поддерживаемых не только биологическими факторами, но и ландшафтным разнообразием. В работе впервые проанализированы компоненты ландшафтной структуры, климатических особенностей, сообществ, целостных визуально-эстетических образований в лесных сообществах старинных УПр в регионе, поддерживающих адаптационные возможности лесов для выделения мониторинговых признаков и биодиагностических мероприятий.

Материалы, методы, методики исследований. В течение 2019–2023 гг. продолжались работы, начатые в 2012 г., по обоснованию средообразующей роли усадебных парков (УПр); использованы публикации промежуточных исследований по устойчивости, разнообразию биоэлементов и обустройству экотроп [12–15]. Описание лесных сообществ парковых комплексов приведено ниже. На основании специальных исследований растительного покрова и выполненных геоботанических описаний выявлены разнообразные типы фитоценозов. Общая характеристика флоры УПр была описана ранее [12, 14].

Фитоценозы выделяли для УПр, в которых состояние паркового комплекса позволяет диагностировать его как лесное сообщество: УПр Дуниных-Борковских (УД), УПр Румянцева (УР), УПр Рёвны (УРв), УПр Фоевичи (УФ), УПр Ляличи (УЛ), УПр Корецких (УК). Визуальные характеристики аспектов сообществ в некоторых старинных усадебных парках показаны на рис. 1 и 2.



Рис.1. Вторичные липово-ясеневые леса с травянистым покровом из колокольчика широколистного в усадебном парке Корецких-Быковых Стародубского района Брянской области (А). Усадебный парк имени Дуниных-Борковских Мглинского района, превратившийся в лесное многоярусное сообщество (Б)



Рис. 2. Контур аллеи, сохранённый деревьями в усадебном парке Ляличи Суражского района (А).
Высоковозрастные лесные сообщества из дуба и граба в усадебном парке Любин Хутор
Новозыбковского района (Б).

Исследования осуществляли маршрутным методом с геоботаническими изысканиями и описанием особенностей сложения фитоценозов [16–18]. По итогам лесопатологических, лесо-санитарных и эколого-эстетических исследований вычисляли индексы для лесов УПр, а затем проводили сравнение расчетных данных. Определяли I_c – индекс состояния, который позволяет обосновать общую жизнеспособность насаждений, в частности, применяется только для лесов. По рекомендациям лесоустроителей учёт ведётся по суммарной степени сохранности лесной среды (полнота, сомкнутость крон), степень антропогенной трансформации лесных местообитаний. Значения 7 и выше – леса диагностируются как I класс, устойчивые сообщества. От показателя 1,5 до 6,9 баллов – как II и III класс устойчивости. Индекс «отлично» используется для оценки и динамики механизмов гомеостаза как естественных, так и окультуренных сообществ [19].

На пробных площадях (ППр) описывали данные по фитоценозу. При выявлении лесотаксационных показателей отмечали густоту, цвет кроны площадных деревьев, облиственность (охвоенность), повреждённость листвы, наличие некрозов, относительные приросты побегов и стволов, возраст хвои. Эстетические данные по древесным видам. По всем признакам жизненности (обобщённые экопоказатели) рассчитывали индекс – средняя категория состояния фитоценозов ($СрК$). Интервальные значения по признакам жизненности: до 1,8 – здоровые сообщества, от 1,9 до 2,8 – ослабленные, от 2,9 – сильно ослабленные.

При анализе флористического состава приводили показатели экорежимов, спектра эколого-биологических элементов, вычисляли показатели сходства. Для номенклатуры сосудистых растений использована общепринятая сводка П.Ф. Маевского [20].

При комплексной оценке УПр применяли методики М. А. Лося (2013), который предложил обследовать природно-территориальные образования, в том числе и рекреационные объекты, охраняемые территории в направлении суммы компонентов

рельефа, климата, ценозов, а также как целостные визуально-эстетические образования [21]. Впервые применены показатели степени мозаичности ландшафта (МЛ) – отношение числа контуров ландшафтных комплексов (ЛК) к площади биосистем (П) (или объектов). Изучение рекреационной привлекательности (РП) парков проводили по методике И.И. Зиганшина и Д.В. Иванова (2017), учитывающей сумму баллов за показатели в пяти группах [21].

Статистическую обработку проводили по стандартным методикам, осуществляли корреляционный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение. В районе описательных эколого-ботанических работ в УПр выделены три сообщества из шести классов лесов, установленных для территории Брянской области.

Из класса Дубово-буковые леса (*Quercus-Fagetea*) распространены лещиновососновые (*Corylo avellanae – Pinetum sylvestris*), здесь доминирует: *Pinus sylvestris* L. (3), *Corylus avellana* L. (4), *Quercus robur* L. (+), *Stellaria holostea* L. (2), *Athyrium filix-femina* (L.) Roth (1), *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt (+), *Milium effusum* L. (+). *Convallaria majalis* L. (r), *Stachys sylvatica* L. (r) и др.

Сообщества принадлежат к союзу дуба черешчатого с липой (*Quercus roboris-Tilion cordatae* Solomeshch et Laivinsh 1993 ex Bulokhov et Solomeshsh 2003), распространены на серых лесных почвах с лёгким суглинком. Первый ярус сформирован *Quercus robur*, второй – *Tilia cordata* Mill. В ассоциации липо-дубовых лесов во всех старинных парковых комплексах пространственная структура сообществ союза сформирована 6 ярусами, с *Quercus robur* первый ярус высоких деревьев формирует *Pinus sylvestris* и *Fraxinus excelsior* L. Хорошо развит подлесок с *Corylus avellana* и *Euonymus verrucosus* Scop., *Lonicera xylostium* L. В ярусах травостоя доминируют неморальные виды, такие как *Carex pilosa* Scop., *Paris quadrifolia* L., *Aegopodium podagraria* L., *Galeobdolon luteum* Huds. и другие. Фактически очертания аллей всех парков, в том числе и в усадьбе Любин Хутор, уже не просматриваются, так как заняты деревьями второй величины и подлеском.

В дубово-лещиновых сообществах (*Quercus robur – Corylus avellana*) доминируют: *Quercus robur* (4), *Corylus avellana* (5), *Asarum europaeum* L. (3), *Convallaria majalis* (+), *Milium effusum* (+), *Geum urbanum* L. (+), *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott (r) и др. В ассоциациях дубово-медуничных (*Pulmonaria obscura – Quercetum roboris*) часто выделяются осиновые фации (*Populeosum tremulae*). В этой ассоциации доминируют: *Quercus robur* (+), *Ulmus laevis* Pall. (1), *Populus tremula* L. (5), *Pulmonaria obscura* Dumort. (4), *Trifolium montanum* L. (r), *Maianthemum bifolium* (r), *Trientalis europaea* L. (+), *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth (+), *Geum urbanum* (+), *Actaea spicata* L. (r) и др.

Класс Черноольховые леса (*Alnetea glutinosae*), ассоциация ольхово-болотно-фиалковая (*Violo palustris – Alnetum glutinosae*) представлена: *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth. (5), *Viola palustris* L. (1), *Sorbus aucuparia* L. (r), *Rubus caesius* L. (r), *Maianthemum bifolium* (+), *Trientalis europaea* (1), *Athyrium filix-femina* (2), *Driopteris cristata* (L.) A. Gray (+) и др.

В ассоциации черноольхово-осоковой (*Carici elongatae – Alnetum glutinosae*) отмечаются: *Carex acuta* L. (1), *Thelypteris palustris* Schott (+), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (3), *Carex rostrata* Stokes (2), *Lysimachia vulgaris* L. (+), *Urtica dioica* L. (+) и др.

Визуальное рекогносцировочное обследование лесонасаждений района проведения работ выявило преобладание средневозрастных насаждений.

Совокупные наблюдения для УПр антропогенно изменённых территорий позволили сделать обобщение о эколого-дендрологическом составе и сохранности насаждений парков.

Состав по видам УПр в Брянской области определяется, прежде всего, историческим прошлым и местоположением объекта ландшафтного планирования [16, 17, 22]. Ландшафтные композиции создаваемых парков конструировались также с использованием аборигенных видов дендрофлоры. Метод кластерного анализа показал, что видовое сходство фитоценозов УПр различается (рис. 3).

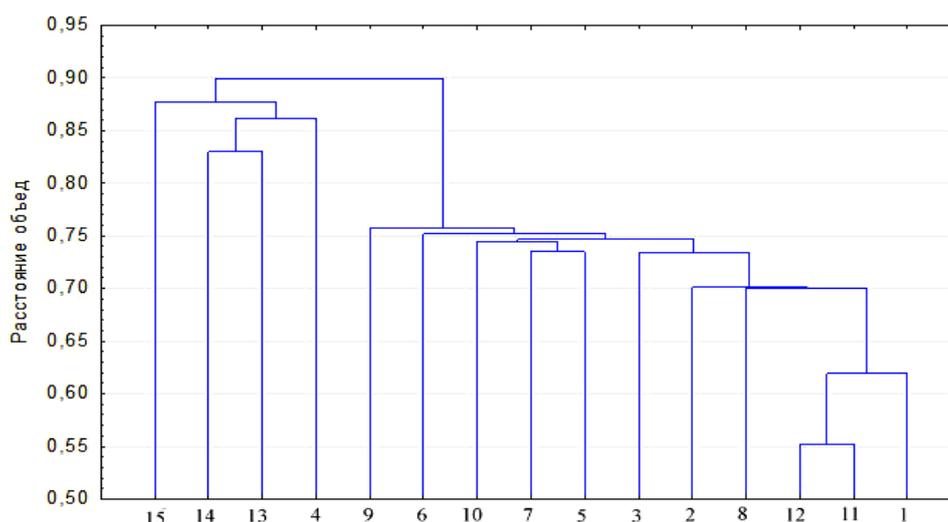


Рис. 3. Дендрограмма сходства флористического состава сообществ усадебных парков

Примечание: Старинные усадьбы: 1 – Ляличи. 2 – Корецкий. 3 – Любин Хутор. 4 – Красный рог. 5 – Фоевичи. 6 – Гринёво. 7 – Рёвны. 8 – Вьюнки. 9 – Хотылёво (Тенишевых). 10 – Мальцовский. 11 – Безобразовых-Халаевых. 12 – Дуниных-Борковских. 13 – Миклашевских. 14 – Румянцева. 15 – Гулевичей.

Выделяется два блока фитоценозов в старинных парковых комплексах по видовому составу флоры – УПр Гринёво, Дуниных, Миклашевских и Румянцева – в этих объектах композиции конструировались в основном из представителей местной флоры, интродуцентов немного. Парковые комплексы в усадьбе Дуниных-Борковских, Миклашевских, Рёвны превратились в насаждения, которые классифицируются как лесные сообщества. В усадьбе Гринёво Погарского района зарегистрирован лес 4 стадии дигрессии. Во втором блоке присутствуют остальные УПр, которые также своеобразны по видовому составу, однако в них зарегистрированы интродуцированные виды. В этом блоке выделяется старинный парк усадьбы Гулевичей в Выгоничском районе (№ 15), которая практически полностью разрушена и парк может попасть в зону экорестаурации при планировании экокаркасов. УРв в Навлинском районе также выделена по своеобразию видов, которые в значительной степени представлены местными видами.

В наименьшей степени число интродуцентов выделено в «лесном» УПр Корецких (№ 2), однако его сообщества превратились в естественные, поддерживающиеся самостоятельно, так как демулационные смены завершены.

На территории шедевра ландшафтного искусства – усадьбе Вьюнки (№ 8) – произрастает значительное количество неевропейских видов в хорошей сохранности; лесных сообществ из них не формируется. В один из блоков объединены УПр старинных усадеб Фоевичи, Рёвны, Мальцовский, которые связывает группа сходных видов флоры из которых построены пейзажные композиции. Особым своеобразием отличается усадебный парк в памятнике природы «Любин Хутор» в Новозыбковском

районе (№ 3), который представляет собой рефугиум видов, собранных для коллекции в регулярную часть УПр, они достаточно хорошо сохранились до нашего времени, и большая часть из них поддерживается семенным путём. Отдельным блоком представлены УПр в Выгоничском и Мглинском районе (№№ 11, 12 – парк в усадьбе Безобразовых-Халаевых, Дуниных-Борковских) как одни из самых небогатых по видовому составу, практически «моновидовые» и с минимумом интродуцентов.

Таким образом, анализ данных дендрограммы сходства видов в УПр позволил выделить уникальные по составу памятники культурного и природного наследия. Выявленные показатели сравнительной характеристики видового состава могут быть основой наблюдений за динамикой древостоя и напочвенного покрова, а также определения оптимизационных действий по восстановлению.

По показателю средней категории состояния насаждений (СрК) все УПр имеют диапазон баллов от 1,6 до 2,8, что говорит о разбросе элементов гомеостатического равновесия, а также отражает степень антропогенного воздействия в прошлом, сохранность древесных видов, на основе которых формировались лесные сообщества (рис. 4). УПр №№ 1, 2, 4, 7, 8, 12, 13, 14 имеют хорошо сохранившиеся насаждения, которые можно квалифицировать как лесные, с плотно сомкнувшимися кронами и развитым травяным и напочвенным покровом (СрК). Показатели расчётного индекса колеблются от 1,6 до 1,8 баллов. Для старинных усадебных парков с давней историей и относительно отдалённых от общих путепроводов баллы категории состояния насаждений низкие и характеризуют «здоровые» насаждения [2].

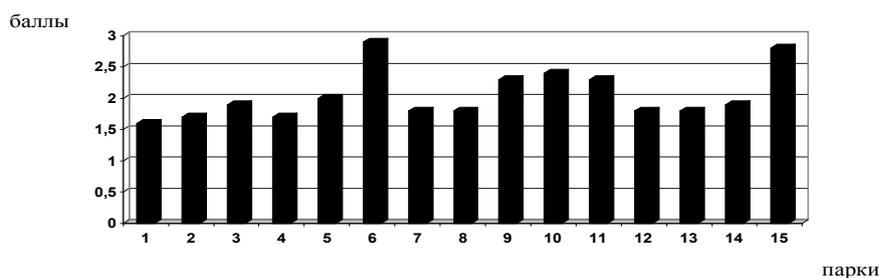


Рис. 4. Показатели категории состояния лесных сообществ (СрК)

Примечание. Обозначения аналогичны рис. 3.

УПр Гулевичей (Выгоничский район), так же как и усадьба Трёхбратское, будет утеряна как элемент историко-культурной и биологической ценности в связи со снижением биоразнообразия и низкой устойчивостью. В УПр № 10, 6, 15 нет естественных ценозов, это полностью окультуренные сообщества [14].

Информация по расчётному I_c показана на рис. 5.

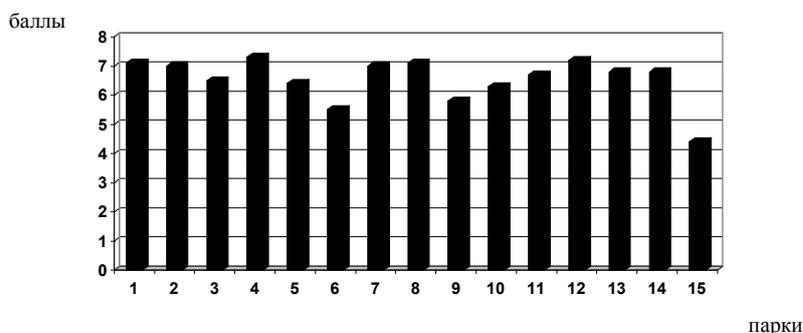


Рис. 5. Показатели индекса состояния лесных сообществ (I_c)

Примечание. Обозначения аналогичны рис. 3.

Значения расчётного показателя I_c изменяется для парковых ансамблей от 4,4 (II класс устойчивости, ослабленные ценозы, устойчивость нарушена) до 7, 3 (I класс, здоровые, устойчивые ценозы). Два мониторинговых показателя S_rK и I_c для изученных УПр практически коррелируют и взаимосвязаны. Низкой устойчивости УПр не выявлено, следовательно, даже при очень неблагоприятных состояниях парковых ансамблей они не утратили средообразующей функции и могут быть реконструированы.

Все усадебные парки выполняют средообразующую роль, восстанавливая все виды биоразнообразия – от генетического до ценотического. Однако многие из них имеют высокую сохранность природной составляющей и могут использоваться как элемент и рекреационного каркаса (РК), обладают значительным рекреационным потенциалом (РП). С 2017 г. применяют комплексную оценку рекреационного потенциала и оперируют суммой баллов за пять групп показателей. Для УПр и отражения вклада в возможность рекреации с реконструкцией паркового комплекса отражена в табл. 1. Наибольшим суммарным показателем РП отличаются УПр Ляличи, Красный Рог, Рёвны, Вьюнки, Дуниных, Корецкий, однако ни один из объектов не обладает высокими баллами по всем пяти группам показателей. Особенно понижает баллы общей ценности условия транспортной доступности, рекреационных условий, т.е. обустроенности, уникальных (для просмотра) объектов.

Таблица 1

Оценка компонентов рекреационного потенциала старинных усадебных парков

Группа	Показатель	Балл														
		1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
А **	Пейзажное разнообразие	3	3	2	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1
	Визуальная привлекательность	3	2	2	3	1	1	3	3	1	2	3	3	1	2	1
	Рекреационные условия	3	1	2	3	1	1	2	3	1	2	3	2	2	2	1
	Уникальные объекты и явления	3	1	2	3	1	0	2	3	1	1	1	2	2	2	0
	Видовое разнообразие	3	3	3	2	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1
Б	Объекты культурного наследия	3	1	2	3	1	1	2	3	1	2	3	2	2	2	0
В	Удаленность	1	1	1	3	1	1	2	2	3	2	3	2	1	1	1
	Покрытие дорог	3	1	1	3	1	1	2	3	2	3	3	2	1	2	1
Г	Наличие инфраструктуры для посетителей	1	1	1	3	1	1	1	3	1	3	3	1	1	1	0
Д	Превышение рекреационных нагрузок	2	3	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
	Антропогенная трансформация	2	3	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1
	Загрязнение среды	3	3	1	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1
	Риск неблагоприятных событий	2	3	2	2	1	1	2	2	1	2	3	2	2	2	1

Примечание. * Обозначения аналогичны рис. 1. ** Группа компонентов: А – Природная привлекательность. Б – Культурно-познавательная ценность. В – Транспортная доступность. Г – Инфраструктурная доступность. Д – Экологические риски.

Все УПр, входящие в группу наиболее благоприятных для посещения и включения в рекреационный каркас, имеют положительные оценки, повышающие возможность парковых комплексов на включение в «рекреационное кольцо парков»: высокая степень мозаичности и ландшафтного разнообразия, наличие привлекательных форм пейзажа – старовозрастных деревьев, геологических обнажений, водных объектов, точек обзора пейзажа лесных сообществ; наличие уникальных объектов – развитых интродуцентов, лесных сообществ климаксового характера, высокого видового разнообразия. Риск возникновения неблагоприятных явлений оценивался в комплексе по итогам визуального обследования и документальным данным – это возможные изменения водных объектов, оползни, наличие свалок или их возникновение, падение старовозрастных экземпляров лесного древостоя и др.

Культурно-познавательное значение имеют те УПр, которые располагаются в поселениях, имеют регулярный уход за парковыми насаждениями, вблизи которых расположены объекты культового назначения, родники. Также некоторые УПр имеют статус памятников Федерального значения и охраняются законом.

Исходя из оценки РП, целесообразно предложить реставрационные мероприятия с наименьшими затратами и быстрой окупаемостью в УПр: Ляличи, Любин Хутор, Рёвны, Дуниных. Эти объекты могут стать элементами в экокаркаса: природными охраняемыми территориями, рекреационными и зелёными зонами, так как биокоридоры представлены лесными сообществами, хорошо сохранившимися. Однако ценные природные комплексы в оставшихся УПр, например, в городских и сельских поселениях, будут также выполнять главную роль элементов экокаркаса – средообразующую, водоохранную, транзитных коридоров для БР.

При сравнении особенностей УПр в регионе и признаков, выявленных для других объектов в ЦФО, необходима оценка для обоснования включения парков в категорию «геопарк» (ГП). ГП – это категория охраняемых территорий и объектов, по видам осуществляемой деятельности его скорее можно отнести в группу нацпарков – научной, образовательной, рекреационной. Ни один из УПр Брянской области не соответствует критериям «глобального геопарка» (ЮНЕСКО) [23], так как: отсутствует положения по устойчивому развитию объектов и охраны (за исключением некоторых объектов); нет плана по управлению, учитывающие социальные в первую очередь и экономические потребности местного населения, в том числе и для обеспечения охраны ландшафтов.

В настоящее время разработка концепций включения УПр в систему «глобальный геопарк» важна, однако, для сохранения имеющегося потенциала ландшафтных природных объектов необходимо начать работы по обоснованию включения парков в реестр охраняемых объектов. Это возможно для парка Корецких, Дуниных-Борковских, что обеспечит охрану ценных природных комплексов. Рекреационная нагрузка на эти УПр низкая, экориски практически сведены к минимуму, имеются сформировавшиеся лесные ценозы – термофильные дубравы. Для этих объектов также не характерно наличие видов-трансформеров, инвазивных, которые могут вытеснять местные виды. И если для парка Корецких можно создать региональный заказник (или памятник природы), то для усадьбы Дуниных-Борковских – природный парк, который будет выполнять природоохранные и рекреационные функции одновременно. В границах этого старинного парка (лесного сообщества) легко выделяются зоны, имеющие экологическое, культурное и рекреационное значение, в том числе и с большим водным объектом. Категория «природный парк» целесообразна и потому, что на площади этих охранных объектов могут выделяться зоны и участки по

ценности, в том числе и со строгим режимом охраны, а также агрохозяйственная; на территории могут находиться земельные участки различных пользователей (и собственников), значит, что возможно расширение границ и на территорию поселений.

Целесообразно рассмотреть выделение в УПр Тенишевых и Миклашевских территорий охраняемых объектов, но сохранность парков (и окружающих ценных в культурном и историческом отношении) мала так же, как и площадь парков. Пейзажное значение комплексов невелико из-за значительного преобразования в результате природопользовательской нагрузки. Также отсутствует буферная зона для предполагаемого охраняемого объекта, так как зона жилой застройки и агрохозяйственных комплексов вклинивается на территорию УПр; расширение ОТ невозможно ввиду значительного преобразования окружающих ландшафтов, островного характера усадеб.

Установлено, что все УПр выполняют специфические функции, включающиеся в значения элементов экокаркаса. К их числу относят: компенсаторную – проявляется в устранении неблагоприятных экофакторов для индивидуального и популяционного здоровья, предоставление экосистемных услуг, т.е. средообразующие функции; функцию экопросвещения; рекреационную и сохранение природных и культурных достопримечательностей; сохранение разнообразия биосистем; также и организацию научных исследований динамики природных комплексов.

Эстетическая ценность элементов ЭК в виде УПр оценивалась по степени мозаичности ландшафта (МЛ), а также видового разнообразия ландшафтов (ВЛ). Данные для УПр отражены в табл. 2.

Таблица 2

Данные по эколого-ландшафтному разнообразию парковых комплексов

Парковые комплексы*	Показатель МЛ	Показатель ВЛ
1	4,2	0,61
2	3,3	0,53
3	2,5	0,41
4	1,5	0,11
5	2,5	0,41
6	1,2	0,11
7	3,7	0,46
8	4,0	0,57
9	1,2	0,14
10	1,3	0,12
11	1,3	0,12
12	4,2	0,59
13	2,9	0,27
14	3,3	0,35
15	0,5	0,10

Примечание. * Парковые комплексы аналогичны обозначениям в табл. 2.

Комплексы с пониженной эстетической ценностью и привлекательностью зарегистрированы для УПр по данным расчётных индексов: в старинной усадьбе Гринёво, Миклашевских, Хотылёво, Мальцовский, Безобразовых-Халаевых, Гулевичей (№№ 6, 9, 10, 11, 15). На незначительной площади парков отсутствуют целостные объекты и здания исторического наследия, повышающие пейзажную привлекательность; посадки окультурены, малый видовой состав средообразующих видов; для парковых комплексов «стёрто» пейзажное своеобразие, исторически отсутствует разнообразие в композиции [3, 17, 27, 28]. Значения индексов

ландшафтного разнообразия могут скорректировать действия работ по благоустройству и внести изменения в планировочные проекты для старинных парковых комплексов.

Исследованные объекты представляют собой антропогенно-трансформированные территории, связанные в том числе и с сильным вмешательством на парковые комплексы, они не являются уникальными по элементам биоразнообразия, что отмечалось в работах отечественных авторов [14, 15]. Эволюционно и сукцессионно формирующиеся лесные сообщества на территории старинных усадебных парков имеют своеобразные признаки, в том числе и касающиеся естественного возобновления видов-доминантов и эдификаторов – на большей части урочищ присутствует средняя степень естественного возобновления, что обеспечивает разновозрастность и устойчивость древостоев. Хорошо возобновляются аборигенные виды, ранее использовавшиеся в ландшафтном строительстве. В ходе сукцессионных процессов сформировались лесные биоценозы, в которых хорошо развиты элементы ветровально-почвенных комплексов, мозаичная структура, создающая многочисленные микроместообитания, повышающие гомеостатическое равновесие. Таким образом, состав лесных биоценозов отвечает условиям произрастания, т.е. коренному биотопу, почвенно-грунтовым условиям и геоморфологическим особенностям Нечерноземья РФ [24]. По показателям состояния древостоя старовозрастное происхождение имеют только 38 % лесных сообществ, сформировавшихся в усадебных парках, относятся к категории «устойчивые, здоровые», они сопоставимы по растительной зоне хвойно-широколиственных лесов.

Анализ сукцессионных состояний в сформировавшихся лесных сообществах на территории УПр по аналогии с известными работами школы О.В. Смирновой показал, что леса могут быть отнесены ко второму типу сукцессионных систем – системы микроместообитаний, развивающихся в процессе жизнедеятельности биоты, полночленность спектров древесных видов, что обсуждалось в ранее опубликованных работах [14, 25, 26]. На формирование биоценоза в таких лесах частичное влияние оказал процесс искусственного подбора древесных и кустарниковых видов; сказалось отсутствие диаспор коренных (местных) древесных видов; отдельные ценопопуляции исчезли в результате нерегламентированной хозяйственной деятельности в разные временные периоды. Этот тип назван неполночленной аутогенной сукцессией, поэтому неполноценность биоты «не позволяет полностью реализовать экосистемные функции лесов» [25]. Однако, выявление основных черт устойчивости сообществ лесов в старинных усадебных парках, может способствовать уточнению механизмов гомеостатического равновесия, а также определения статуса особо охраняемых природных территорий. Чем более развита пространственная структура лесных сообществ, разнообразнее видовая представленность растений в биоценозе, а также мозаичность ландшафтов старинных усадебных парков, тем больше парковые комплексы приближаются к состоянию гомеостатического равновесия. Развитость элементов гар-мозаики, формирующейся, в том числе и в результате демулационных смен в УПр, по мнению авторов биогеоценотической лесной школы О.В. Смирновой будет служить ориентиром лесореабилитационных мероприятий [1]. Статус особо охраняемых природных территорий рекомендован для присвоения УПр с устойчивым лесным сообществом.

Заключение. Работы отечественных авторов показали, что создание особо охраняемых территорий в ландшафтах, испытывающих длительное антропогенное преобразование, обуславливают уменьшение показателей видового разнообразия [1]. Все рассматриваемые усадебные комплексы с парками, заложенными в ландшафтном

дизайне в конце XVIII–XIX вв., обеднены видами, микроместообитаниями, не отличаются разнообразием ландшафтных урочищ, косвенно определяющих не только разницу в фитоценозах, но и рекреационную привлекательность. В целом изъятие территорий при традиционном природопользовании (в частности из рекреационного и садово-паркового) для организации особо охраняемых территорий изменило стрессовые факторы на растительные сообщества и другие элементы биоразнообразия, но не сопровождалось восстановлением природного разнообразия видов. Таким образом, лесные сообщества, сформировавшиеся на месте демутационных смен в старинных парковых комплексах в Нечерноземье РФ, характеризуются заведомо низкими показателями фиторазнообразия, а также невысокими расчётными индексами лесных насаждений. Лимитирующими биоразнообразие факторами выступили и дополнительные: небольшая по площади территория, отсутствие буферной зоны, крайняя степень преобразования ранее староосвоенной территории. Полидоминантные лесные биоценозы не могли быть сформированы ввиду отсутствия диаспор древесных и кустарниковых видов. При рассмотрении вопросов сравнительной характеристики элементов биоразнообразия лесных сообществ и лесов парков в старинных усадьбах Нечерноземья РФ следует отметить, что потенциальное биоразнообразие выше в естественных лесах, что необходимо учитывать при требующейся экологической реставрации предклимаксовых лесов в старинных усадьбах, обеспечения устойчивой структуры ценопопуляций эдификаторных древесных и кустарниковых видов по аналогии с естественными лесами, предотвращения фрагментации ареалов лесообразующих видов для создания целостного биома в парках, поддержание ресурсов местообитаний, даже искусственно созданных, для формирования геоэкологического разнообразия и экотопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Коротков В.Н. Теоретические основы оптимизации функции биоразнообразия лесного покрова (синтез современных представлений) // Лесоведение. – 2015. – № 4. – С. 277-288.
2. Стороженко В.Г., Быков А.В., Бухарева О.А., Петров А.В. Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценотических исследований. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. – 171 с.
3. Стороженко В.Г. Эволюционные принципы устойчивости лесных сообществ // Сибирский лесной журнал. – 2020. – № 4. – С. 87-96.
4. Larrieu L., Cabanettes A., Goux N., Burne, L., Bouget C., and Deconchat M. Development over time of the tree-related microhabitat profile: The case of lowland beech–oak coppice-with-standards set-aside stands in France. *Eur. J. For. Res.* – 2017. – Vol. 136. – P. 37-49. – DOI: 10.1007/s10342-016-1006-3.
5. Jaroszewicz B., Cholewińska O., Gutowski J. M., Samojlik T., Zimny M., and Latałowa, M. Białowieża forest-a relic of the high naturalness of European forests. *Forests.* – 2019. – Vol. 10. – P. 1-28. – DOI: 10.3390/f10100849.
6. Cadieux P, Drapeau P, Ouellet-Lapointe U, Leduc A, Imbeau L, Deschênes R and Nappi A Old forest structural development drives complexity of nest webs in a naturally disturbed boreal mixedwood forest landscape. *Front. For. Glob.* – 2023. – Change 6. – P.1084696. – DOI: 10.3389/ffgc.2023.1084696.
7. Martin M., Fenton N., and Morin H. Structural diversity and dynamics of boreal old-growth forests case study in Eastern Canada. *For. Ecol. Manag.* – Vol. 422. – 2018. – P. 125-136. – DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.007.
8. Larrieu L., Cabanettes A., Courbaud B., Goulard M., Heintz W., Schuck A., et al. Co-occurrence patterns of tree-related microhabitats: a method to simplify routine monitoring. *Ecol. Indic.* – 2021. – Vol. 127. – P. 107757. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107757.
9. Елисеенко Е. П. Роль усадебных парков в повышении биоразнообразия региона // Вестник Тверского государственного университета. Серия: биология и экология. – 2014. – Вып. 25. – С. 76-81.
10. Lelli C., Bruun, H. H., Chiarucc, A., Donati D., Frascaroli F., Fritz Ö., et al.. Biodiversity response to forest structure and management: comparing species richness, conservation relevant species and functional

- diversity as metrics in forest conservation. *For. Ecol. Manage.* – Vol. 432. – 2019. – P. 707–717. – DOI: 10.1016/j.foreco.2018.09.057.
11. Martin M., Grondin P., Lambert M. C., Bergeron Y., and Morin H. Compared to wildfire, management practices reduced old-growth forest diversity and functionality in primary boreal landscapes of eastern Canada. *Front. For. Glob. Change* – No. 4. – 2021. – P. 639397. – DOI: 10.3389/ffgc.2021.639397.
 12. Анищенко Л.Н., Любимов В.Б., Борздыко Е.В., Сквородникова Н.А., Стрижакова И.В., Кришталева Ю.И. Мониторинг состояния фитоценозов старинных усадебных парков Брянской области как основа экотуризма и рекультивации // Ежегодник НИИ Фундаментальных и прикладных исследований. – 2015. – № 1 (6). – С. 31-38.
 13. Елисеенко Е. П., Панасенко Н.Н. Дендрофлора усадебных парков Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. Серия: биология и экология. – 2015. – Вып. 25. – С. 398-402.
 14. Данилов Д.И., Гайворонская А.А., Анищенко Л.Н. Экологическая оценка природных комплексов старинных усадебных парков Брянской области // Матер. междунар. научно-практической конф. «Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов. – Грозный, 2023. – С. 109-115.
 15. Стрижакова И.В., Анищенко Л.Н. Оценка экологического состояния усадебных парков Брянской области // Сб. тезисов научно-практической конф. «Актуальные проблемы химии и биологии». – Пушкино: ФГБОУ ВО «ПушГЕНИ», 2014. – С. 28
 16. Нотов А.А., Дементьева С.М., Мейсунова А.Ф. Некоторые методические аспекты экологического обследования объектов культурного наследия, имеющих природоохранную ценность // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11. – Ч. 2. – С. 221-225.
 17. Полякова Г.А. Флора и растительность старых парков Подмосквья / Г.А. Полякова. – М.: Наука. 1992. – 225 с.
 18. Швецов А.Н., Полякова Г.А. Методика обследования флоры и растительности старинных парков и музеев // Сохранение и восстановление природно-культурных комплексов Подмосквья. 1995. – С. 155-160.
 19. Мозолевская Е.Г., Шарапа Т.В. Некоторые результаты применения индекса состояния насаждений при мониторинге // Лесной вестник. – 2003. – № 2. – С. 142-147.
 20. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. – М.: Тов-во научных изданий КМК, 2014. – 635 с.
 21. Лось М. А. Природный туристско-рекреационный потенциал ландшафтно-экологической среды: особенности его оценки и рационального использования // Географический вестник. – 2013. – № 2 (25). – С. 104-109.
 22. Дворянские усадьбы Брянского края: из истории культурного наследия Брянщины // Под ред. А.В. Городкова. – Брянск: Клуб любителей истории родного края: Буквица, 2018. – Т. 1. – 374 с.
 23. Лунева Е.В. Организация геопарков в России и особенности их правового режима // *Lex russica.* – 2021. – Т. 74, № 9. – С. 32-43. – DOI: 10.17803/1729-5920.2021.178.9.032-043.
 24. Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный федеральный округ: Брянская область / Н. Г. Рыбальский, А. Г. Митюкова Е. Д. Самотесов. – М.: НИА – Природа, 2007. – 1144 с.
 25. Смирнова О.В., Алейников А.А. Сукцессионные системы бореальных лесов европейской России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1 (5). – С. 1367-1370.
 26. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / Под ред. О.В. Смирновой. – М.: Наука, 2004. – Кн. 1. – 479 с. Кн. 2. – 575 с.

Поступила в редакцию 07.08.2024 г.

ON THE ASSESSMENT OF THE STATE OF SOME OLD ESTATE PARKS IN THE NON-BLACK EARTH REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION BY THE CRITERIA OF BIOLOGICAL STABILITY OF FOREST COMMUNITIES

A.A. Gaivoronskaya, L.N. Anishchenko

Based on long-term field studies using the route method and geobotanical, forest typological, and geoeological techniques, the components of biological stability of forest communities in 15 old manor parks within the Bryansk region are described. The objects under study are anthropogenically transformed complexes

that are similar and typical for the biogeographical conditions of the non-chernozem region in terms of phytodiversity components; forest communities formed as a result of demutational succession processes in the territory of old manor parks have specific features, including those related to the natural regeneration of dominant and edifier species. Most of the tracts have an average degree of natural regeneration, which ensures uneven ages and relative self-regulation of the state of forest stands. Analysis of the inventory results showed the absence of conditions for dynamic homeostatic equilibrium in the old manor parks. The main elements of biostability – elements of phytodiversity, mosaic in the distribution of species, as well as diversity of habitats, landscape tracts and others – are characterized by low values. The most favorable situation with maintaining homeostatic equilibrium was identified for the estate parks and forest communities of the Lyubin Khutor, Lyalychi, Koretsky, Dunin-Borkovsky estates: relative biobalance is maintained by heterogeneity of structural, species (taxonomic), landscape diversity.

Keywords: biological stability; forest communities; ancient manor parks; community heterogeneity; Bryansk region; Non-Black Earth Region of the Russian Federation.

Гайворонская Анжелика Алексеевна,

аспирант кафедры географии, экологии и землеустройства, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», г. Брянск, РФ.
E-mail: gajvoronskaja.anzhelika@yandex.ru

Gaivoronskaya Anzhelika Alekseevna,

postgraduate student of the Department of Geography, Ecology and Land Management, FSBEI HE «Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky», Bryansk, RF.
E-mail: gajvoronskaja.anzhelika@yandex.ru

Анищенко Лидия Николаевна,

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры географии, экологии и землеустройства ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», г. Брянск, РФ.
E-mail: Lanishchenko@mail.ru

Anishchenko Lidiya Nikolaevna,

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Geography, Ecology and Land Management, FSBEI HE «Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky», Bryansk, RF.
E-mail: Lanishchenko@mail.ru

ДВИЖЕНИЕ МАГНИТОМАРКИРОВАННЫХ КЛЕТОК НАД ПОЛОСОВОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2024. А.А. Губарев, В.Н. Павлов, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова

В работе выполняется проверка модели перемещения магнитомаркированных клеток над поверхностью пленки с полосовой доменной структурой под действием внешнего магнитного поля. Оцененные по результатам экспериментов значения амплитуд колебаний клеток и максимальная частота, при которой происходит переход от движения клеток с пересечением множества границ доменов на колебания клеток над одним из доменов, позволяют выполнить моделирование, используя магнитную восприимчивость клеток в качестве неизвестного. Независимым образом измеренное значение магнитной восприимчивости клеток удовлетворительно согласуется с найденным в результате моделирования.

Ключевые слова: магнитомаркированные клетки, плёнки с полосовой доменной структурой.

Введение. Возможность управляемого магнитным полем перемещения магнитных микро- и нанообъектов над поверхностью феррит-гранатовых пленок с доменной структурой привлекает большое внимание исследователей, см. например [1–11]. В экспериментах, описанных в работе [2], рассмотрены особенности перемещения дрожжевых клеток, магнитомаркированных наночастицами магнетита, обладающих парамагнитными свойствами, над поверхностью феррит-гранатовой плёнки под действием магнитного поля, создаваемого полосовой доменной структурой (ПДС) пленки и внешнего, зависящего от времени, однородного магнитного поля \mathbf{H}^e . В работе [2], установлено, что движение парамагнитных клеток происходит перпендикулярно направлению доменных границ ПДС. При этом, в зависимости от частоты внешнего поля движение клеток может иметь вид либо колебаний в пределах ширины домена, либо направленного перемещения через границы многих доменов. По видеозаписи экспериментов можно оценить амплитуды колебаний магнитомаркированных (ММ) клеток или частоту внешнего управляющего магнитного поля, при которой происходит переход от движения через множество границ доменов к колебаниям в пределах одного домена. Выбирая при моделировании в качестве подгоночных параметров магнитную восприимчивость магнитомаркированной клетки и высоту, на которой движется клетка над поверхностью плёнки, можно получить значения этих величин и сравнить найденную таким способом магнитную восприимчивость магнитомаркированных клеток с экспериментально определенным значением восприимчивости ММ клеток. Целью данной работы была проверка модели, разработанной авторами, путём сравнения оценки магнитной восприимчивости ММ клеток по результатам моделирования с величиной независимого экспериментального её измерения.

Модель. Рассматривается полосовая доменная структура с периодом λ . При изменении внешней напряженности магнитного поля, малой по сравнению с намагниченностью доменов, период λ изменяется слабо, поэтому в модели период считается постоянной величиной. Выберем систему координат так, чтобы плоскость XU совпадала с поверхностью плёнки, ось Z была направлена перпендикулярно пленке, а ось Y была направлена вдоль доменов. Вдоль оси Y первый домен занимает

область от $-L_y$ до L_y , а вдоль оси X — от $-L_x$ до L_x . На рис. 1 показана выбранная система координат.

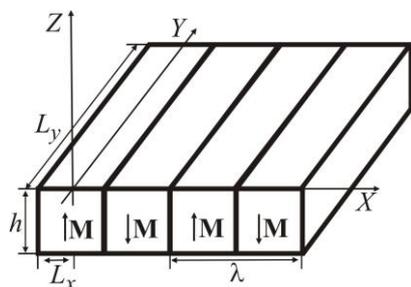


Рис. 1. Система координат

Напряженность \mathbf{H} создаваемая доменом может быть найдена по формуле

$$\mathbf{H} = -\nabla\psi,$$

где магнитный потенциал ψ является решением уравнения $\Delta\psi = \text{div } \mathbf{M}$. В этом исследовании предполагается, что вектор намагниченности не зависит от координат в пределах домена и направлен вдоль оси Oz ($M = |\mathbf{M}|$). В этом случае решение этого уравнения с условиями $\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_2$, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_2 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_1$ на поверхности,

ограничивающей область домена, содержащий намагниченный материал, можно записать в виде

$$\psi(r) = \frac{M}{4\pi} \int_V \frac{z - z'}{\left((x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2\right)^{3/2}} dx' dy' dz'. \quad (1)$$

Интегрируя (1) и устремляя L_y к бесконечности, получим, что напряженность в области над плёнкой, создаваемой первым доменом, может быть записано в виде

$$H_x(x, z) = -\frac{M}{4\pi} \ln \left[\frac{(x - L_x)^2 + z^2}{(x + L_x)^2 + z^2} \cdot \frac{(x + L_x)^2 + (z + h)^2}{(x - L_x)^2 + (z + h)^2} \right],$$

$$H_z(x, z) = -\frac{M}{2\pi} \left(\arctg \frac{x - L_x}{z} - \arctg \frac{x + L_x}{z} - \arctg \frac{x - L_x}{z + h} + \arctg \frac{x + L_x}{z + h} \right).$$

Если не учитывать влияние напряженности, создаваемой одним доменом на состояние других доменов, пренебечь переходными областями между доменами (доменными стенками), то общую напряженность можно записать в виде

$$\mathbf{H}(x_0, z_0) = \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{H}_k(x_0 - k\lambda, z_0) + \mathbf{H}^e,$$

где \mathbf{H}^e — напряженность внешнего магнитного поля, \mathbf{H}_k — напряженность создаваемая доменом с намагниченностью $(-1)^k M$ и шириной соответствующей k -ому домену. В отсутствии внешнего поля ширины обеих типов доменов равны $\lambda/2$. Под действием z -компоненты внешнего магнитного поля (H_z^e) изменяются ширины доменов с намагниченностью направленной вдоль оси Z , λ_+ , и в обратную сторону, λ_-

$$\Delta = \frac{\lambda_+ - \lambda_-}{2} = \frac{\pi h / 2}{\ln \text{ch}(\pi h / \lambda)} \frac{H_z^e}{M}, \quad (2)$$

где h — толщина плёнки, $\operatorname{ch}(x)$ — гиперболический косинус. При этом абсолютная величина намагниченности не меняется. Используя (2) и постоянство λ вычисляются значения L_x^+ и L_x^- . Для предотвращения прилипания частиц к поверхности феррит-гранатовой пленки в среду с магнитомаркированными клетками вводится поверхностно активное вещество, которое покрывает тонким отталкивающим слоем поверхность клеток и феррит-гранатовой пленки. Со стороны магнитного поля на движущуюся клетку действует сила, в которой присутствует вертикальная составляющая, направленная к плёнке. Поэтому в работе предполагается, что центр шарообразной клетки (с радиусом R) перемещается вдоль оси X на постоянной высоте $z_0 = R + \Delta z$, где Δz — расстояние от плёнки до клетки. Уравнения, описывающие движение частицы, имеют вид

$$\dot{x} = v_x, \quad m\dot{v}_x = F_x^m - 6\pi R\mu v_x.$$

Здесь v_x — проекция скорости на ось X , второе слагаемое второго уравнения описывает сопротивление среды по закону Стокса (μ — динамическая вязкость среды с клетками), а первое слагаемое описывает воздействие магнитного поля. Парамагнитная клетка, помещённая над ПДС, в общем случае, изменяет поле, и напряжённость поля в парамагнитной клетке не равна напряженности поля над ПДС. Этим различием принято пренебрегать при малых магнитных восприимчивостях парамагнитных клеток, т.е. полагать напряжённость в парамагнитной клетке равной напряженности без неё. В этом случае плотность силы, действующей на парамагнитную клетку с магнитной восприимчивостью χ со стороны магнитного поля с напряженностью \mathbf{H} , имеет вид

$$\mathbf{f} = \frac{\mu_0\chi}{2} \nabla \mathbf{H}^2,$$

где χ — объемная магнитная восприимчивость магнитомаркированной клетки. Сила, действующая на парамагнитную клетку, выразится через интеграл $\mathbf{F}^m = \int_V \mathbf{f} dv$, где интегрирование выполняется по всему объёму V , парамагнитной клетки. Считая, что поле слабо изменяется в пределах парамагнитной клетки и градиент можно взять в средней точке сферической клетки, получим

$$\mathbf{F}^m = \int_V \mathbf{f} dv = \frac{\mu_0\chi V}{2} \nabla \mathbf{H}^2.$$

Более подробно изложенная выше модель описана в [3].

Материалы и методы. Для проверки возможностей, описанной выше модели по предсказанию особенностей движения магнитомаркированных клеток при изменении параметров внешнего магнитного поля и оценке магнитных свойств магнитомаркированных клеток были проведены два вида исследований при различных параметрах внешнего управляющего магнитного поля на установке, описанной в работе [2]. В исследованиях первого вида внешнее магнитное поле имело постоянную вертикальную составляющую $H_z^e = 2387,3$ А/м и импульсную горизонтальную составляющую, направленную вдоль оси X в виде знакопеременного меандра: $H_x^e = H_x^{\max} \operatorname{sgn}(2\pi vt)$ с амплитудой $H_x^{\max} = 2387,3$ А/м и частотами ν в диапазоне от

0,2 до 10 Гц. В этих экспериментах в качестве домен-содержащей подложки с ПДС была использована плёнка $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$, толщиной $h = 6,8$ мкм, намагниченностью $M_s = 20530,99$ А/м, выращенная на галлий-гадолиниевой подложке. В качестве парамагнитных биологических клеток, перемещаемых над ПДС, использовались дрожжевые клетки, магнитомаркированные наночастицами магнетита, полученные по методике, описанной в [4]. Эксперименты и численные расчеты по исследуемой модели показали, что при таком режиме управляющего магнитного поля клетки совершают колебательные движения в пределах ширины домена и амплитуда таких колебаний уменьшается с увеличением частоты управляющего поля. При этом оказалось, что характер уменьшения амплитуды колебаний ММ клеток от частоты внешнего управляющего магнитного поля зависит от величины магнитной проницаемости ММ клеток (рис. 2). При моделировании полагалось, что магнитомаркированные клетки имеют форму шара с диаметром 5 мкм. В расчётах использовались значения динамической вязкости $\mu = 1,004 \times 10^{-3}$ Па·с и плотность клеток — $1,1$ г/см³.

Методика подготовки суспензии магнитомаркированных клеток и проведения исследований особенностей их перемещения над ПДС описана в работе [2]. Колебания магнитомаркированных клеток записывались на видео и при обработке полученных видеофайлов оценивались амплитуды этих колебаний.

Результаты и обсуждение. Результаты моделирования зависимостей амплитуды колебаний магнитомаркированных клеток от частоты горизонтальной компоненты внешнего управляющего поля H_x^e приведены на рис. 2 сглаженными линиями. Результаты экспериментальных измерений амплитуд колебаний ММ клеток для нескольких частот приведены на рис. 2 в виде квадратных символов. В экспериментах при низких частотах H_x^e (0,2–2 Гц) амплитуда колебаний слабо изменяется (лишь уменьшается время нахождения клетки в крайних положениях).

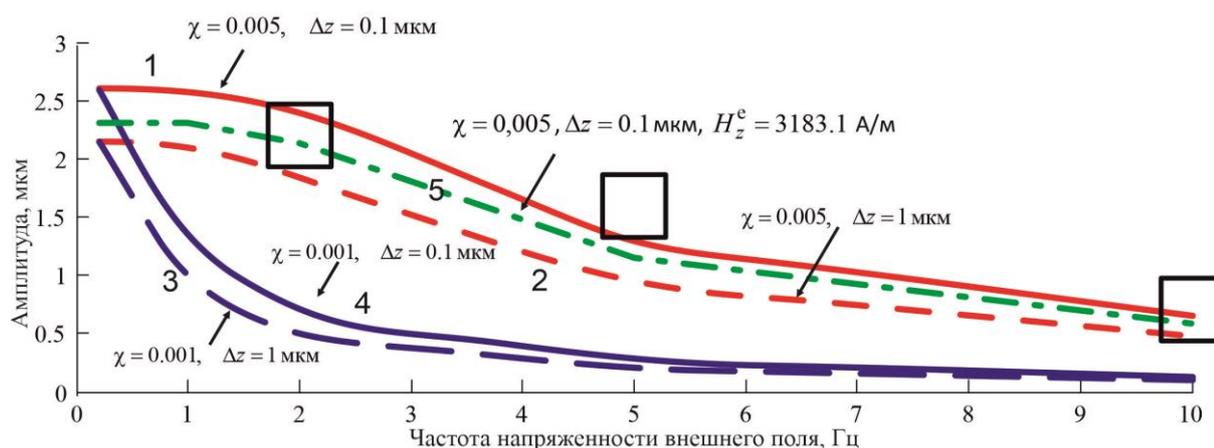


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний магнитомаркированных клеток от частоты горизонтальной компоненты внешнего управляющего поля (H_x^e): символы — экспериментальные значения, линии — результаты моделирования для двух значений магнитной восприимчивости клеток χ и двух значений Δz ; штрихпунктирной линией показана зависимость для увеличенной величины H_z^e

Моделирование показало, что слабое убывание амплитуды колебаний клеток при низких частотах наблюдается для восприимчивости χ клеток приблизительно равной 0,005 (кривые 1 и 2 на рис. 2). С уменьшением значения χ заметное убывание амплитуды колебаний ММ клеток начинается при более низких частотах, чем для клеток с более высокими значениями магнитной восприимчивости. Для иллюстрации этого факта на рис. 2 приведено сопоставление результатов моделирования для $\chi = 0,001$ (кривые 3 и 4 на рис. 2) и $\chi = 0,005$ (кривые 1 и 2 на рис. 2) при двух значениях Δz . Результаты измерения величины χ магнитомаркированных клеток, использованных при описанных выше экспериментах, с помощью метода «весов Фарадея» [4], дают значение $\chi_s = 0,0046 \pm 0,0006$, что достаточно близко к оценочному значению магнитной восприимчивости, полученному при моделировании.

Эксперименты показывают, что при увеличении значения H_z^e и сохранении остальных параметров эксперимента наблюдается уменьшение амплитуды колебаний ММ клеток. Моделирование также подтверждает этот факт. На рис. 2 штрихпунктирной линией (кривая 5) построена зависимость амплитуды колебаний клеток от частоты для увеличенного значения $H_z^e = 3183,1$ А/м ($\chi = 0,005$, $\Delta z = 0,1$ мкм). Эта зависимость (кривая 5) лежит ниже зависимости для $H_z^e = 2387,3$ А/м (кривая 1) при одинаковых значениях остальных параметров.

Исследования второго вида состояли в определении магнитной восприимчивости магнитомаркированных клеток по оценке максимальной частоты, при которой наблюдается изменение характера движения клеток над ПДС с направленного через множество границ доменов на локализованное в пределах ширины полосового домена, в области которого в данный момент времени находятся ММ клетки. В этих исследованиях, проведенных на той же феррит-гранатовой пленке и суспензии магнитомаркированных дрожжевых клеток, описанных в разделе «материалы и методы», использовался треугольный вид временной зависимости компоненты H_z^e внешнего управляющего магнитного поля с амплитудой 1591,5 А/м и знакопеременный меандр H_x^e с амплитудой 2387,3 А/м (см. рис. 3, а). Экспериментальные наблюдения и моделирование траекторий магнитомаркированных клеток показали, что при таких параметрах внешнего управляющего магнитного поля при увеличении частоты управляющего поля от 0,1 Гц сначала наблюдается скачкообразное поступательное движение ММ клеток через множество границ, которое (при достижении критической частоты в диапазоне 3–4 Гц) прекращалось, то есть наблюдался переход в колебательный режим движения клеток в пределах ширины полосового домена.

В экспериментах установлено, что при этом часть клеток продолжала движение с пересечением границ доменов, тогда как другая часть не преодолевала границ доменов. Это может быть связано с наличием разброса значений магнитной восприимчивости индивидуальных клеток в пределах образца используемой суспензии магнитомаркированных клеток и не идеальностью доменной структуры. На рис. 3, б приведены, полученные при моделировании зависимости координаты центра перемещающейся клетки от времени для трех различных частот внешнего поля при значении величины $\Delta z = 0,1$ мкм и $\chi = 0,005$. Моделирование также показало, что для частоты 5 Гц и выше наблюдалось колебание клеток в пределах ширины одного домена.

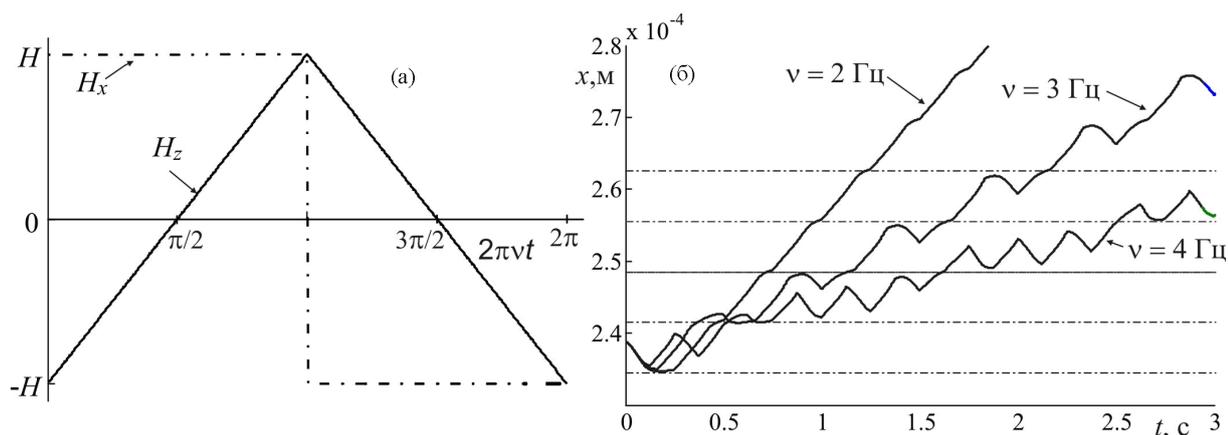


Рис. 3. а) зависимость компонент напряженности внешнего поля от времени; б) зависимости координат центра движущейся ММ клетки от времени для трёх частот внешнего поля ($\chi = 0,005$, $\Delta z = 0.1$ мкм); штрихпунктирные линии — границы доменов без внешнего магнитного поля

На рис. 4 для сравнения приведены траектории для нескольких значений частот внешнего поля и двух значений восприимчивости.

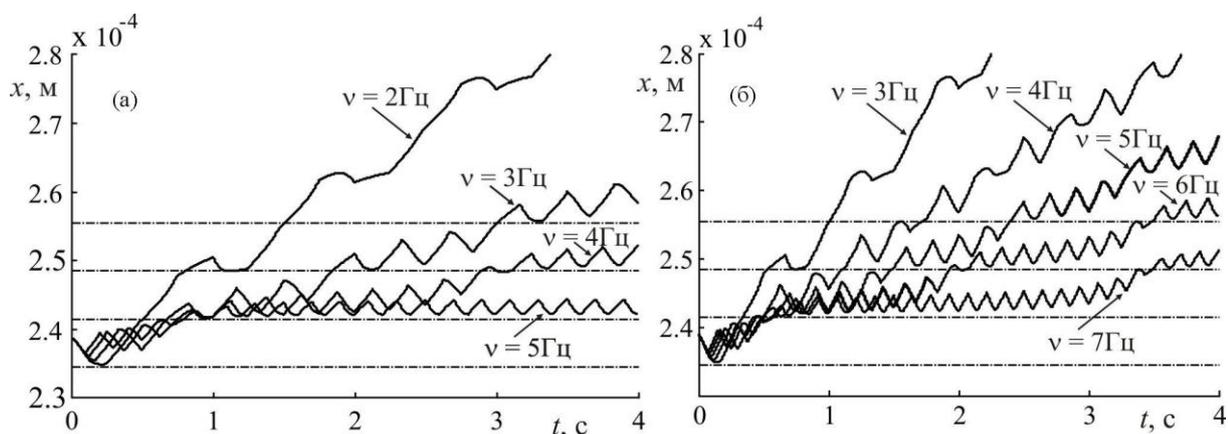


Рис. 4. Зависимости координат центра ММ клеток от времени для нескольких частот (подписаны на рисунке) внешнего поля и двух значениях восприимчивости ММ клеток: а) $\chi = 0,004$, б) $\chi = 0,006$

Необходимо отметить, что зависимость средней скорости движения частиц от частоты внешнего поля имеет немонотонный характер: средняя скорость растёт с частотой до её некоторого значения ν_c . После превышения значения ν_c средняя скорость убывает. На участке (роста средней скорости) от 0 до ν_c зависимость координаты клетки от времени (за исключением, быть может, начального участка) монотонно возрастает. На участке от ν_c до некоторой максимальной частоты эта зависимость становится немонотонной. На рис. 3, б (за исключением $\nu = 2$ Гц) и рис. 4 построены траектории для частот участка убывания средней скорости от частоты.

Из анализа рис. 3 и 4 видно, что при $\chi = 0,004$ траектория для частоты внешнего поля 2 Гц близка по характеру к траектории клетки с восприимчивостью $\chi = 0,005$ и частотой внешнего поля 3 Гц и траектории клетки с восприимчивостью $\chi = 0,006$ и частотой внешнего поля 3 Гц. Клетки с восприимчивостью $\chi = 0,006$ испытывают движение через множество доменных границ даже при частоте 7 Гц (см. рис. 4, б), а

клетки с восприимчивостью $\chi = 0,004$ переходят в колебательный режим практически при частоте 5 Гц. Таким образом, так как в эксперименте для большинства клеток исследуемой суспензии переход в колебательный режим движения наблюдается при частоте управляющего поля в диапазоне 3–4 Гц, следовательно магнитная восприимчивость ММ клеток в этой суспензии лежит между значениями $\chi = 0,004$ и $\chi = 0,006$. Результаты прямых измерений величины χ магнитомаркированных клеток, использованных при описанных выше экспериментах, с помощью метода «весов Фарадея» [4], дают значение $\chi_s = 0,0046 \pm 0,0006$. Из анализа рис. 4 и сопоставления с экспериментальными наблюдениями видно, что эксперимент подтверждает полученные при моделировании данные.

Выводы. В работе экспериментально и методами численного моделирования исследованы особенности движения магнитомаркированных биологических клеток при их перемещении в магнитном поле, созданном суперпозицией поля полосовой доменной структуры и внешнего управляющего магнитного поля. Показано, что модель, разработанная авторами, правильно описывает изменения характера движения ММ клеток при изменении параметров внешнего управляющего поля, наблюдаемые экспериментально. Это позволяет оценить величины, используемых в модели некоторых неизвестных параметров при наличии данных о большинстве остальных параметров. Оцененные таким образом по результатам моделирования двух серий экспериментов значения магнитной восприимчивости магнитомаркированных клеток хорошо согласуются между собой и удовлетворительно согласуются с результатами независимого эксперимента по измерению магнитной восприимчивости методом «весов Фарадея». Полученные результаты могут быть использованы при разработке микрофлюидных устройств с магнитным управлением движения парамагнитных микрообъектов живой и не живой природы с целью их сепарации или локализации в заданных областях этих устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leyva, S.G. Hydrodynamic synchronization and clustering in ratcheting colloidal matter / S.G. Leyva, R.L. Stoop, I. Pagonabarragaatall, P. Tierno // *Sci. Adv.* – 2022. – Vol. 8. – eabo4546. – P. 1–8.
2. Павлов, В.Н. Использование магнитного храповика для перемещения магнитомаркированных клеток над полосовой доменной структурой / В.Н. Павлов, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова // *Вестник Донецкого национального университета, Серия А: Естественные науки.* – 2024. – № 1. – С. 113–123.
3. Губарев, А.А. Численное моделирование перемещения парамагнитных частиц над полосовой структурой магнитных доменов / А.А. Губарев, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова // *Вестник Донецкого национального университета, Серия А: Естественные науки.* – 2023. – № 4. – С. 39–49.
4. Влияние низкочастотного переменного магнитного поля на жизнеспособность магнитомаркированных клеток *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* / С.В. Беспалова, Д.В. Кладько, Ю.А. Легенький и др. // *Актуальные вопросы биологической физики и химии.* – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 335–339.
5. Bidirectional particle transport and size selective sorting of Brownian particles in a flashing spatially periodic energy landscape / F. Martinez-Pedrero, H. Massana-Cid, T. Ziegler, et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 18. – P. 26353–26357.
6. Tierno, P. Transport and selective chaining of bidisperse particles in a travelling wave potential / P. Tierno, A.V. Straube // *Eur. Phys. J. E.* – 2016. – Vol. 39, No 54. – P.1–7.
7. Nano/micro-scale magnetophoretic devices for biomedical applications / B. Lim, P. Vavassori, R. Sooryakumar, C. Kim // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2017. – Vol. 50, No 3. – 033002 (25 p).
8. Tierno, P. Magnetic assembly and annealing of colloidal lattices and superlattices / Pietro Tierno // *arXiv: 1908.09109 [cond-mat.soft].* – 2019. – DOI :10.1021/la501273b.

9. Spatial manipulation of particles and cells at micro- and nanoscale via magnetic forces / L.V. Panina, A. Gurevich, A. Beklemisheva et al. // *Cells*. – 2022. – Vol. 11. – P. 950 (23 p)
10. Tierno, P. A tunable magnetic domain wall conduit regulating nanoparticle diffusion / P. Tierno, T.H. Johansen, J.M. Sancho // *Nano Lett.* – 2016. – Vol. 16. – P. 5169–5175.
11. Stoop, R.L. Enhancing nanoparticle diffusion on a unidirectional domain wall magnetic ratchet / R.L. Stoop, A.V. Straube, P. Tierno // *Nano Lett.* – 2019. – Vol. 19. – P. 433–440.

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

MOVEMENT OF MAGNETIC MARKED CELLS OVER THE A STRIP DOMAIN STRUCTURE. EXPERIMENT AND SIMULATION

A.A. Gubarev, V.N. Pavlov, Y.A. Legenkiy, S.V. Bespalova

The paper verifies the model of magnetically labeled cells moving over the surface of a film with a strip domain structure under the action of an external magnetic field. The values of cell oscillation amplitudes estimated by the results of experiments and the maximum frequency at which the transition from cell movement with the intersection of multiple domain boundaries to cell vibrations over one of the domains occurs allow modeling using the magnetic susceptibility of cells as an unknown. The independently measured value of the magnetic susceptibility of cells is in satisfactory agreement with the one found as a result of modeling.

Keywords: magnetically labeled cells, films with stripe domain structure.

Губарев Андрей Анатольевич
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: Gubarev_A_A_@mail.ru

Gubarev Andrey Anatolievich
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Павлов Владимир Николаевич
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

Pavlov Vladimir Nikolaevich
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Легенький Юрий Анатольевич
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

Legenkiy Yuri Anatolevich
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Беспалова Светлана Владимировна
доктор физико-математических наук, профессор;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

Bespalova Svetlana Vladimirovna
Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

**РЕСУРСЫ ФЛОРЫ ЮГА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ.
АБОРИГЕННЫЕ ВИДЫ ЗЛАКОВ ДЛЯ ПРИДОРОЖНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ
ДОНЕЦКО-МАКЕЕВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ**

© 2024. *И.Ф. Пирко, В.О. Корниенко*

Среди представителей семейства Poaceae Barnhart аборигенной флоры выделены 62 многолетних вида, которые могут быть рекомендованы в качестве базового ассортимента злаков для регионального озеленения. Проанализирован их экологический, биоморфологический, феноритмотипический состав и основные габитуальные характеристики. Показана перспективность использования представленного ассортимента в газонах лугового типа для оформления придорожных полос Донецко-Макеевской агломерации на основе современной концепции формирования устойчивых придорожных сообществ, воспроизводящих структуру естественных фитоценозов. Представлены комбинации видов рекомендуемые в качестве основы (эдификаторов) искусственных флорокомплексов различной функциональности, моделирующих фитоценологическую структуру.

Ключевые слова: Poaceae Barnhart, степная зона, урбоэкосистемы, экоморфа, биоморфа, экотоп, искусственные флорокомплексы.

Введение. Ведущей тенденцией экологической и эстетической оптимизации урбанизированного пространства в настоящее время является включение видов аборигенной флоры окружающих природных экосистем или спонтанной флоры антропогенно трансформированных территорий в качестве базовой составляющей регионального ассортимента декоративных растений, а также формирование на их основе устойчивых долговременных объектов озеленения, по своим характеристикам максимально приближенных к природным ландшафтам [1–7]. Такой подход является целесообразным и обоснованным по ряду причин: существенным снижением ресурсоёмкости содержания подобных зеленых насаждений [8–11]; возможностью сохранения наиболее ценных аборигенных видов, как минимум, в пределах культигенного ареала [12, 13]; стабилизации баланса местной энтомофауны и других животных, трофические цепочки которых, так или иначе, связаны с растениями [14, 15]; а также с возрастающей потребностью человека видеть в городских ландшафтах элементы, максимально сохранившие или имитирующие природные черты [16].

Традиционно используемые в озеленении стриженные газоны имеют свои преимущества и недостатки. Выровненная монотипная поверхность с эстетической точки зрения является идеальным фоном для цветников, древесно-кустарниковых растений и архитектурных элементов. Они отличаются отсутствием или ограниченным количеством опасных насекомых, клещей и прочих животных, но в то же время препятствуют распространению представителей фауны, важных для нормального функционирования экосистемы. За счёт устойчивости к вытаптыванию, стриженные газоны удобны и безопасны для передвижения по ним, что имеет значение для рекреационных объектов, но противоречит функциональной нагрузке придорожных полос. Главный их недостаток – высокая ресурсоёмкость. Несмотря на то, что из-за постоянного и достаточно интенсивного воздействия стресс-факторов отрастание газонов вдоль дорожной сети происходит медленнее в 2–4 раза, чем на других участках, регулярная стрижка огромных по протяжённости территорий составляет существенную долю в общей стоимости их эксплуатации. Луговое разнотравье по стоимости составляет менее 1/10 от содержания стриженного газона [9].

Поэтому интерес исследователей к изучению и преобразованию придорожных экосистем, возникший ещё во второй половине прошлого века, существенно усилился [8]. В настоящее время в озеленении придорожных полос часть привычных газонов во многих регионах, в том числе и в России, активно заменяется сложными композициями местных растений, имитирующими луговые сообщества, основу которых составляют злаки. Эффективность и актуальность подобного подхода показана на примере его использования в различных природно-климатических условиях [5, 6, 8, 17, 18].

В связи с этим цель работы – анализ ресурсов аборигенной флоры юга Восточно-Европейской равнины как источника эволюционно адаптированных декоративных видов семейства *Roaseae* для формирования базового ассортимента, позволяющего оптимизировать систему озеленения дорожных сетей в городах Донецко-Макеевской агломерации на основе современной концепции формирования устойчивых придорожных флорокомплексов. В рамках этой концепции для повышения устойчивости и эстетичности травянистого покрова придорожных территорий предлагается создание разнотравных сообществ лугового типа и снижение числа покосов до 1–2-х раз в год.

Материалы и методы исследования. Подбор видов для придорожного озеленения проведён на основе изучения региональных флористических списков и научных работ по исследованию местной флоры [19–24]. Латинские названия таксонов приведены в соответствии с последними данными таксономических исследований по международной онлайн-базе мировой флоры World Flora Online (2024) [25]. Биоэкологические характеристики определены по общепринятым методикам: биоморфы по Х. Раункиеру (1905) и И.Г. Серебрякову (1962), экоморфы представлены по классификациям А.Л. Бельгарда (1971) и Н.М. Матвеева [26–27], феноритмотипы по И.В. Борисовой (1972), фенофазы приведены по литературным данным. В связи с тем, что в биоэкологических характеристиках, приводимых в литературных источниках, как правило, приводятся только гидроморфы, реже гелио- и трофоморфы, остальные экоморфы изучаемых видов определены нами по описаниям экологических условий типичных для них мест произрастания.

Согласно геоботаническому районированию, города Донецко-Макеевской агломерации находятся в пределах Донецкого лесостепного округа, Черноморско-Азовской подпровинции Евразийской степной области в полосе разнотравно-типчачово-ковыльных и луговых степей, специфику растительности которых обуславливает значительное распространение обнажений и выходов каменноугольных отложений, сланцев, песчаников, известняков и т.д. [22]. По классификации природно-территориальных комплексов это юг Восточно-Европейской равнины. Климат региона умеренно континентальный с резкими колебаниями температур воздуха по временам года, с жарким сухим летом и малоснежной холодной зимой с частыми оттепелями [28]. На фоне зональных природно-климатических условий необходимо учитывать также специфические особенности микроклимата городской среды, который находится в большей зависимости от антропогенных, чем от природных факторов. Это отражается в более высокой температуре, пониженном уровне радиации, в том числе ультрафиолетового спектра, повышенной облачности, но более низкой влажности воздуха по сравнению с зональными метеорологическими условиями [29].

Анализ результатов. По данным флористического списка сосудистых растений за 2010 год [21] региональная флора насчитывает 2070 таксонов, относящихся к 685 родам, 144 семействам 74 порядков, 9 классов. По информации Госкомэкополитики ДНР за 2021 год – 2060 таксонов, относящихся к 713 родам и 143 семействам [30]. Так или иначе, семейство *Roaseae* Varnhart по представленности в местной флоре находится на

втором месте после Asteraceae Giseke и по данным флористического списка насчитывает 175 таксонов видового ранга, 26 % из которых (46 видов) составляет адвентивная фракция. Основными критериями при отборе злаков для формирования газонов лугового типа послужили следующие:

1. Происхождение – отобраны виды исключительно аборигенной фракции, с целью предотвращения распространения вдоль дорожной сети нежелательных, зачастую агрессивных компонентов адвентивной флоры.

2. Жизненная форма – независимо от декоративности исключены однолетники (терофиты) и двулетники (малолетние монокарпики) непригодные для газонов (или – моделирования долговременных растительных сообществ).

3. Декоративность – учитывали габитуальные характеристики на вегетативной и генеративной стадии.

4. Доступность семенного/посадочного материала. Ресурсный потенциал семейства давно и достаточно хорошо изучен, многие виды имеют ряд хозяйственно-полезных признаков и используются в хозяйственной деятельности, что гарантирует регулярное воспроизводство их семенного/посадочного материала, поэтому предпочтение отдавали видам, которые уже используются в качестве газонных, декоративных, либо пищевых, кормовых или пастбищных растений.

На основании этих критериев нами выделено 62 вида (из 26 родов), потенциально пригодных для использования в искусственных флорокомплексах лугового типа. Культурные формы некоторых видов – *Agrostis capillaris* L., *Agrostis gigantea* Roth, *Agrostis stolonifera* L., *Beckmannia eruciformis* (L.) Host, *Dactylis glomerata* L., *Poa nemoralis* L., *Poa palustris* L., *Poa pratensis* L., *Poa trivialis* L. широко используются в различных смесях для традиционных стриженных газонов. Наиболее устойчивые виды – *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., *Bromus inermis* Leyss., *Festuca rubra* L., *Festuca rupicola* Heuff., *Phleum pratense* L., *Poa angustifolia* L., *Poa compressa* L., *Psathyrostachys juncea* (Fisch.) Nevski, хорошо переносящие повышенную концентрацию солей в почве, применяются в специальных смесях для придорожного озеленения. К ним относится и *Elymus repens* (L.) Gould, ранее рассматривавшийся как газонный сорняк, но в отличие от большинства культурных форм характеризующийся высокой приспособленностью к засушливым условиям региона и техногенной нагрузке. Остальные виды, обладая рядом хозяйственно полезных свойств, в том числе и декоративностью, в той или иной мере используются в декоративном садоводстве и, реже, в городском озеленении, но для стриженных газонов не пригодны. Однако весь представленный ассортимент аборигенных злаков может послужить основой для формирования многокомпонентных либо малокомпонентных разнотравных искусственных сообществ лугового типа, которые помимо эстетичности имеют много других преимуществ. Это сезонная динамичность; гармоничность включения в городской ландшафт узнаваемой на региональном уровне растительности; расширение среды обитания для мелких млекопитающих, певчих птиц и насекомых местной фауны; сохранение в культуре видового состава разнотравно-типчачково-ковыльных степей и других растительных сообществ, которые большей частью распаханы; предотвращение инвазии за счет замены интродуцентов в озеленении дорожной сети, являющейся мощным коридором перемещения видов, на представителей местной флоры; снижение ресурсоёмкости за счет сокращения числа покосов.

На основании проведенных исследований установлено, что основные требования к травянистым растениям для озеленения городской придорожной сети в условиях Донецко-Макеевской агломерации, помимо эстетичности, обусловлены тремя наиболее важными критериями.

1. Экологический:

– пластичность в отношении структуры, состава, защелачивания и засоления почв, которые на участках, как правило, малоплодородные, уплотнённые, щелочные, с большим содержанием солей из-за постоянного применения в зимний период противогололедных реагентов;

– ветро-, газо-, пыле-, засухоустойчивость;

– зимостойкость (способность переносить в зимний период резкие колебания температуры и избыток влаги в почве);

– устойчивость к местным вредителям и патогенам.

2. Функциональный:

– максимальная продолжительность вегетации с сохранением декоративности;

– способность к поглощению и удержанию пыли и газа;

– почвозащитная противоэрозионная функция;

– шумоподавление;

– декарбонизация атмосферы за счет увеличения объема фотосинтетической продуктивности.

3. Экономический:

– низкая ресурсоемкость при закладке и эксплуатации.

– продолжительный период эксплуатации.

Соответствие растений вышеуказанным требованиям определяется комплексом экологических, биоморфологических, феноритмотипических и габитуальных признаков.

На основании анализа экологических характеристик, рекомендуемых для придорожного озеленения декоративных многолетних злаков аборигенной флоры, показано, что несмотря на доминирование экоморф типичных для степной зоны (светолюбивых, засухоустойчивых, не требовательных к плодородию, кислотности и структуре почв, но не переносящих засоление), предлагаемый ассортимент характеризуется широким экоморфологическим спектром по всем основным экологическим факторам (рис. 1), что позволяет подобрать соответствующий ассортимент для участков с различными условиями. Недостаток составляют только сциофиты (Sc), так как эта гелиоморфа не характерна ни для флоры степной зоны, ни для представителей семейства Poaceae.

Некоторые виды с широкой экологической амплитудой на протяжении значительного периода времени могут существовать в экстремальных условиях. Так ряд видов, относящихся к ксерофильным гидроморфам – *A. cristatum* (Ks), *B. inermis* (MsKs), *F. rubra* (MsKs), *D. glomerata* (KsMs) способны переносить в весенний период временное подтопление до 1 месяца, *Phalaroides arundinacea* (L.) Rauschert (KsMs) – до 2–3-х, а *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., являясь гидрофитом, достаточно хорошо переносит засушливые периоды. В отношении к гранулометрическим показателям почвы большинство видов приспособлены к достаточно широкому диапазону значений и способны произрастать в разных экотопах, близких по этому фактору.

В то же время по комплексу экоморф среди исследуемых растений выделено 32 экологические группы (табл. 1), что свидетельствует о широком спектре их экологической приуроченности. Несмотря на то, что принадлежность к экологическим группам носит относительный характер и определяется по экологическим условиям основных мест произрастания, часто без учета всего диапазона возможностей вида, объединение растений в соответствии с их экологическими особенностями является одним из наиболее надежных способов идентификации функциональных групп для конкретных экотопов.

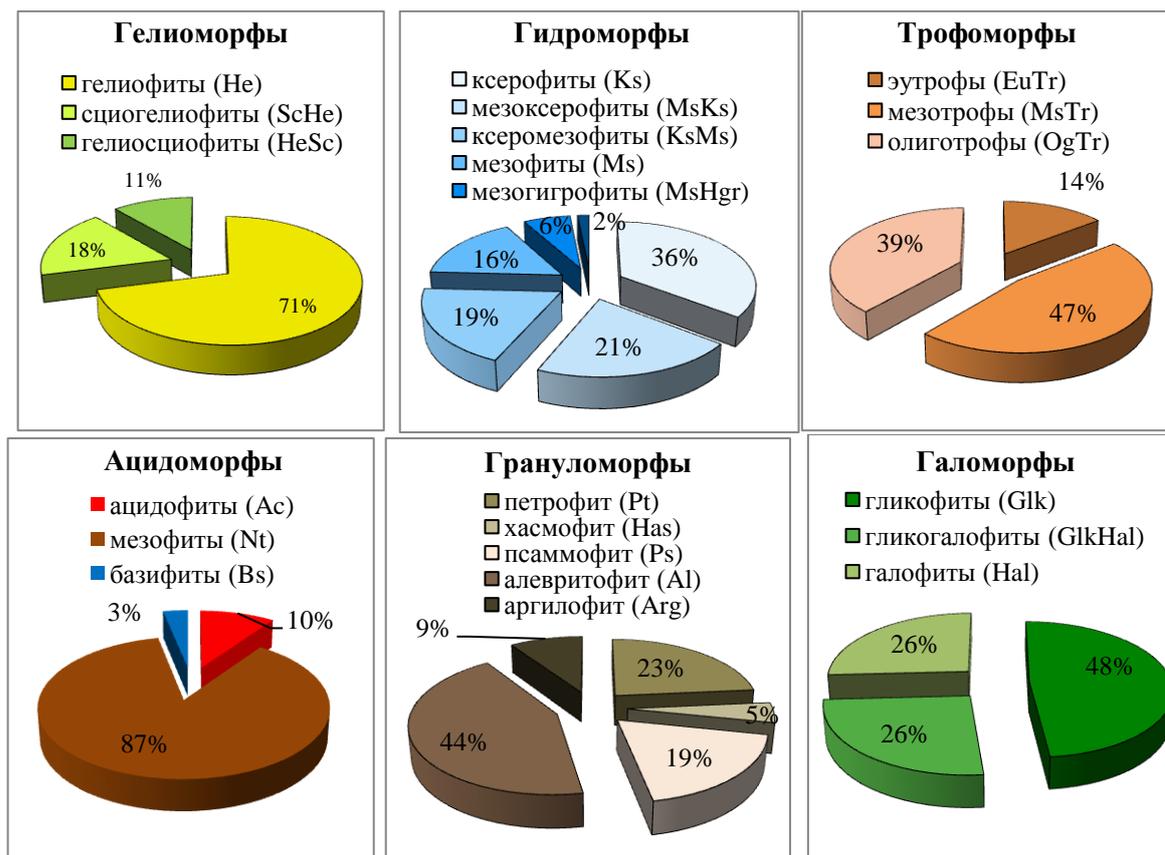


Рис. 1. Соотношение экоморф аборигенных видов семейства Poaceae Barnhart, рекомендуемых для придорожного озеленения Донецко-Макеевской агломерации

Таблица 1

Экологический спектр аборигенных видов семейства Poaceae Barnhart, рекомендуемых для придорожного озеленения Донецко-Макеевской агломерации

Вид	Экоморфы по основным экологическим факторам					
	гелио-морфы	гидро-морфы	трофо-морфы	ацидо-морфы	гало-морфы	грануло-морфы
Низкорослые (до 65 см)						
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	HeSc	Ms	MsTr	Nt	Glk Hal	Al
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	ScHe	Ms	OgTr	Ac	Glk	Al
<i>Festuca beckeri</i> (Hack.) Trautv.	He	Ks	OgTr	Nt	Glk Hal	Ps
<i>Festuca cretacea</i> T.I.Popov ex Proskor.	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt
<i>Festuca pseudodalmatica</i> Krajina	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt Al
<i>Festuca rupicola</i> Heuff.	He	MsKs	OgTr	Nt	Hal	Pt Ps Al
<i>Festuca valesiaca</i> Schleich. ex Gaudin	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt Ps Al
<i>Koeleria brevis</i> Steven	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt
<i>Koeleria delavignei</i> Czern. ex Domin	He	MsKs	EuTr	Nt	Glk	Al
<i>Koeleria glauca</i> (Spreng.) DC.	ScHe	MsKs	MsTr	Ac	Glk	Ps
<i>Koeleria macrantha</i> (Ledeb.) Schult.	He	MsKs	OgTr	Nt	Glk Hal	Pt Has Ps
<i>Leymus ramosus</i> (K.Richt.) Tzvelev	He	Ks	MsTr	Nt	Hal	Ps Al
<i>Poa bulbosa</i> L.	He	KsMs	OgTr	Nt	GlkHal	Has Ps Al
<i>Poa compressa</i> L.	He	Ks	OgTr	Nt	GlkHal	Pt Ps
<i>Stipa adoxa</i> Klokov & Osychnyuk	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt
<i>Stipa fallacina</i> Klokov & Osychnyuk	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt Ps
<i>Stipa ucrainica</i> P.A.Smirn.	He	Ks	EuTr	Nt	Glk	Pt Al

Продолжение табл. 1

Среднерослые (до 100 см)						
<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn.	He	Ks	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Agrostis capillaris</i> L.	ScHe	KsMs	OgTr	Ac	Glk	Pt Ps Al
<i>Alopecurus arundinaceus</i> Poir.	He	MsHgr	OgTr	Nt	Glk Hal	Has Ps
<i>Anthoxanthum nitens</i> (Weber) Y.Schouten et al.	He	Ms	MsTr	Nt	Hal	Ps Al
<i>Cynosurus cristatus</i> L.	He	KsMs	EuTr	Ac	Glk	Arg
<i>Festuca rubra</i> L.	He	MsKs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) P.Beauv.	He	Ks	MsTr	Nt	Glk Hal	Pt Ps Al
<i>Melica picta</i> K.Koch	HeSc	Ks	MsTr	Bs	Glk	Al Arg
<i>Poa angustifolia</i> L.	He	KsMs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Poa nemoralis</i> L.	HeSc	KsMs	MsTr	Nt	Glk	Arg
<i>Poa pratensis</i> L.	HeSc	KsMs	EuTr	Nt	Hal	Al
<i>Stipa asperella</i> Klokov & Osychnyuk	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt Has
<i>Stipa capillata</i> L.	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt Ps
<i>Stipa dasyphylla</i> (Lindem.) Czern. ex Trautv.	He	MsKs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt
<i>Stipa tirsia</i> Steven	He	MsKs	MsTr	Nt	Glk	Pt Al
<i>Stipa zalesskii</i> Wilensky ex Grossh.	He	Ks	OgTr	Nt	Glk Hal	Pt Al
Высокорослые (до 150 см)						
<i>Agrostis gigantea</i> Roth	ScHe	Ms	MsTr	Ac	Glk Hal	Pt Ps Al
<i>Alopecurus pratensis</i> L.	ScHe	Ms	MsTr	Nt	Glk Hal	Al
<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J. Presl & C. Presl.	ScHe	Ms	MsTr	Nt	Glk Hal	Al
<i>Beckmannia eruciformis</i> (L.) Host	He	MsHgr	MsTr	Nt	Glk Hal	Arg
<i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) P. Beauv.	HeSc	Ms	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Bromus inermis</i> Leys.	ScHe	MsKs	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth.	He	Ks	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Calamagrostis canescens</i> (Weber) Roth	He	Ms	MsTr	Bs	Glk	Al
<i>Dactylis glomerata</i> L.	He	KsMs	EuTr	Nt	Hal	Al
<i>Elymus repens</i> (L.) Gould	He	Ks	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Festuca orientalis</i> (Boiss.) B.Fedtsch.	He	KsMs	MsTr	Nt	Glk Hal	Al
<i>Glyceria maxima</i> (Hartm.) Holmb.	He	Hdr	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Leersia oryzoides</i> (L.) Sw.	He	MsHgr	MsTr	Ac	Glk	Al
<i>Leymus racemosus</i> (Lam.) Tzvelev	He	MsKs	MsTr	Nt	Hal	Ps Al Arg
<i>Melica altissima</i> L.	ScHe	KsMs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Melica transsilvanica</i> Schur	He	MsKs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Milium effusum</i> L.	HeSc	KsMs	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench	HeSc	Ms	EuTr	Nt	Hal	Al
<i>Phalaroides arundinacea</i> (L.) Rauschert	ScHe	KsMs	MsTr	Nt	Glk	Al
<i>Phleum phleoides</i> (L.) H.Karst.	He	MsKs	MsTr	Nt	GlkHal	Arg
<i>Phleum pratense</i> L.	He	KsMs	OgTr	Nt	Hal	Al
<i>Poa palustris</i> L.	ScHe	MsHgr	EuTr	Nt	Glk	Arg
<i>Poa trivialis</i> L.	ScHe	Ms	EuTr	Nt	Glk	Arg
<i>Psathyrostachys juncea</i> (Fisch.) Nevski	He	Ks	MsTr	Nt	Hal	Al
<i>Stipa borysthena</i> Klokov ex Prokudin	He	Ks	OgTr	Nt	GlkHal	Ps
<i>Stipa donetzica</i> Chuprina	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt
<i>Stipa pennata</i> L.	He	Ks	OgTr	Nt	Hal	Pt Ps
<i>Stipa pulcherrima</i> K.Koch	He	Ks	OgTr	Nt	Glk	Pt

Примечания: гелиоморфы: He – гелиофит, ScHe – сциогелиофит, HeSc – гелиосциофит; гидроморфы: Ks – ксерофит, MsKs – мезоксерофит, KsMs – ксеромезофит, Ms – мезофит, MsHgr – мезогигрофит; трофоморфы: EuTr – эутроф, MsTr – мезотроф, OgTr – олиготроф; ацидоморфы: Ac – ацидофит, Nph – нейтрофит, Bs – базофит; галоморфы: Hal – галофит, GlkHal – гликогалофит, Glk – гликофит; грануломорфы: Al – алевритофит, Arg – аргилофит, Pt – петрофит, Ps – псаммофит, Has – хасмофит.

Не менее важной для определения функциональных возможностей растения является его биоморфа. Биоморфологический спектр исследуемой группы по X. Раункиеру:

8 геофитов, 54 гемикриптофита; по И.Г.Серебрякову – все виды являются поликарпиками и представляют 4 группы: длиннокорневищные (20 видов), надземностолонообразующие (2), короткокорневищные (15), плотнодерновинные (25). Все корневищные и столонообразующие виды – хорошие закрепители грунта. Они прочно связывают корневой системой верхние слои, надежно прикрывают дерниной его поверхность, задерживая при этом до 10–11 % осадков и улучшая структуру и водопроницаемость почвогрунтов, т.е. в целом среди всех травянистых растений наиболее эффективно выполняют противоэрозионную функцию, что особенно актуально для придорожного озеленения.

Разнообразие по феноритмотипам в пределах исследуемой группы незначительное: эфемероиды – 1 вид, летне-зимнезеленые – 7, весенне-летне-осеннезелёные – 54. Многие виды злаков из весенне-летне-осеннезелёной группы должны быть отнесены к летне-зимнезелёной, так как в зимний период у них сохраняются листья осенней либо позднелетней генерации, но поскольку они прикрыты отмершими остатками генеративных побегов и листьев весенней генерации, визуально их состояние воспринимается как биологический покой и с точки зрения функционального использования таких видов в озеленении целесообразнее их выделять как весенне-летне-осеннезеленые.

Все представленные виды благодаря своим эволюционно закрепленным адаптивным признакам (структурным, физиологическим) характеризуются достаточно высокой ветро-, газо- и пылеустойчивостью, что обуславливает в то же время их защитную функцию от негативного влияния этих факторов, которая усиливается за счет повышения высоты травостоя. По имеющимся сведениям листья злаков, особенно *B. inermis* и *D. glomerata*, хорошо осаждают растворимую и нерастворимую фракции пылевых частиц [31]. Помимо санитарно-гигиенической (защитной), злаки выполняют и оздоровительную функцию. Они характеризуются достаточно высокой интенсивностью фотосинтеза, которая в 5–8 раз выше, чем у деревьев, и испарения, что существенно повышает относительную влажность приземного слоя воздуха, а злаки с ионизирующим и фитонцидным действием (*Agrostis stolonifera* L., *F. rubra*, *P. pratensis* и др.) способны его очищать [31]. Естественный травостой по сравнению со стриженными газонами однозначно выполняет эти функции более эффективно.

С эстетической точки зрения, исследуемые растения являются достаточно ценными, так как большинство из них способны сохранять декоративность на протяжении длительного времени – от начала отрастания, колошения и до диссеминации. Период цветения у злаков непродолжительный – 10–15 дней, но генеративные побеги сохраняют декоративный эффект в течение 2–3 месяцев до созревания и осыпания плодов. У некоторых высокорослых видов (*B. inermis*, *Calamagrostis canescens* (Weber) Roth, *G. maxima*, *Molinia caerulea* (L.) Moench и др.) побеги в мумифицированном состоянии сохраняются на протяжении всей зимы, придавая объектам линейно-полостных структур ландшафтно-средозащитного озеленения объемность, структурированность и декоративность, в отличие от монотонной стриженной поверхности. Помимо габитуального разнообразия, обусловленного строением и окраской генеративных побегов, злаки отличаются достаточной вариабельностью по окраске листьев – от различных оттенков зелёного до сизовой и голубоватой, что расширяет возможности их комбинирования, как в разнотравных, так и в чисто злаковых искусственных растительных сообществах.

На основании анализа экологических и биоморфологических особенностей исследуемых видов выявлено, что они характеризуются широким спектром

хозяйственно ценных признаков, позволяющим подобрать оптимальный ассортимент для участков различной функциональности и разных экотопов. Среди объектов придорожного озеленения внутригородской и межгородской дорожной сети можно выделить 7 категорий таких участков (табл. 2).

1. Открытые горизонтальные придорожные полосы внутригородских дорог – участки между дорогой и тротуаром, разделительные полосы, на которых предусмотрено только травяное покрытие. Экологические условия: полная освещённость, низкая влажность уплотнённый, засоленный, часто малоплодородный грунт с нейтральной, либо близкой к щелочной кислотностью, повышенное газо- и пылезагрязнение. Соответствующие экоморфы: гелиофиты; ксерофиты, ксеромезофиты и мезоксерофиты; псаммофиты, алевритофиты, аргилофиты и петрофиты; галофиты и гликогалофиты; мезотрофы, олиготрофы; нейтрофилы, базифилы. В тех случаях, когда газон лугового типа отделен от проезжей части только бордюром, для обеспечения безопасности движения его край должен быть выстрижен на ширину, равную высоте травостоя, поэтому на узких полосах газоны такого типа неприменимы.

2. Затенённые горизонтальные придорожные полосы внутригородских дорог – участки, аналогичные п. 1, но с древесными насаждениями. Экологические условия: тень, полутень, низкая влажность, уплотнённый, засоленный, но плодородный грунт с нейтральной, кислотностью, умеренное газо- и пылезагрязнение. Соответствующие экоморфы: сциофиты, гелиосциофиты и сциогелиофиты; ксерофиты, ксеромезофиты и мезоксерофиты; гликогалофиты; алевритофиты и аргилофиты; мезотрофы; нейтрофилы и базифилы. В силу особенностей экологической структуры местной флоры, количество видов, соответствующих данным критериям ограничено. Из всего многообразия декоративных многолетних злаков нами выделено только два вида: *B. inermis*. и *M. effusum*.

Таблица 2

Хозяйственно ценные характеристики и группы по использованию аборигенных видов семейства Poaceae Barnhart, рекомендуемых для придорожного озеленения Донецко-Макеевской агломерации

Виды	Группы по использованию							БМ	Феноспектр		Цвет вегетативной части
	1	2	3	4	5	6	7		НВ	К-Д	
Низкорослые (до 65 см)											
<i>Agrostis stolonifera</i>				+	+	+	нсг	V	VI–VIII	светло-зелёный	
<i>Avenella flexuosa</i>				+	+	+	нсг	IV–V	V–IX	ярко-зелёный	
<i>Festuca beckeri</i>	+						пдг	III–IV	IV–VIII	темно-зелёный	
<i>Festuca cretacea</i>			+				ккг	IV–V	V–VIII	сизый	
<i>Festuca pseudodalmatica</i>			+				пдг	III–IV	IV–VI	изумрудно-зелёный	
<i>Festuca rupicola</i>	+		+		+	+	пдг	III–IV	IV–VII	темно-зелёный	
<i>Festuca valesiaca</i>			+				пдг	III–IV	IV–VI	сизовато-зелёный	
<i>Koeleria brevis</i>			+				пдг	IV–V	V–VII	сизовато-зелёный	
<i>Koeleria delavignei</i>			+				ккк	IV–V	V–VIII	бледно-зеленоватый	
<i>Koeleria glauca</i>					+	+	пдг	IV–V	V–VIII	сизовато-зелёный	
<i>Koeleria macrantha</i>	+		+				пдг	IV–V	V–VIII	сизовато-зелёный	
<i>Leymus ramosus</i>	+						дкг	IV–V	V–VII	голубоватый	
<i>Poa bulbosa</i>	+			+			ккг	IV	V	серовато-зелёный	
<i>Poa compressa</i>	+		+		+		дкг	IV–V	V–VII	сизовато-зелёный	
<i>Stipa adoxa</i>			+				пдг	IV–V	V–VII	сизовато-зелёный	
<i>Stipa fallacina</i>			+				пдг	IV	V–VI	насыщенно-зелёный	
<i>Stipa ucrainica</i>			+				пдг	III–IV	IV–V	зелёный	
Итого низкорослых:	6	–	11	3	2	16	15				

Продолжение табл. 2

Среднерослые (до 100 см)										
<i>Agropyron cristatum</i>	+			+	+		дкг	IV–V	V–VIII	темно-зелёный
<i>Agrostis capillaris</i>				+	+	+	ккг	IV–V	V–VIII	зелёный
<i>Alopecurus arundinaceus</i>	+			+	+		дкг	V	V–VII	сизовато-зелёный
<i>Anthoxanthum nitens</i>				+	+		дкг	III–IV	IV–VIII	зелёный
<i>Cynosurus cristatus</i>				+	+		пдг	V	VI–VIII	зелёный
<i>Festuca rubra</i>				+	+	+	ккг	IV–V	V–VII	светло-зелёный
<i>Koeleria pyramidata</i>	+					+	пдг	IV–V	V–VIII	сизовато-зелёный
<i>Melica picta</i>						+	пдг	IV–V	V–VII	зелёный
<i>Poa angustifolia</i>	+			+	+	+	ккг	IV–V	V–VI	ярко-зелёный
<i>Poa nemoralis</i>				+	+		дкг	IV–V	V–VIII	насыщенно-зелёный
<i>Poa pratensis</i>				+	+		дкг	IV–V	V–VI	темно-зелёный
<i>Stipa asperella</i>						+	пдг	IV–V	V–VI	серебристо-зелёный
<i>Stipa capillata</i>						+	пдг	V–VI	VI–VII	серовато-зелёный
<i>Stipa dasyphylla</i>						+	пдг	IV–V	V–VI	сизовато-зелёный
<i>Stipa lessingiana</i>						+	пдг	IV–V	V–VII	зелёный
<i>Stipa tirsia</i>						+	пдг	V–VI	VI–VII	голубовато-зелёный
<i>Stipa zalesskii</i>						+	пдг	IV–V	V–VI	зелёный
Итого среднерослых:	4	-	-	8	5	17	11			
Высокососые (до 150 см)										
<i>Agrostis gigantea</i>				+	+	+	ккг	IV–V	V–VIII	темно-зелёный
<i>Alopecurus pratensis</i>				+	+		ккг	IV–V	V–VII	зелёный
<i>Arrhenatherum elatius</i>				+	+		пдг	IV–V	V–VIII	зелёный
<i>Beckmannia eruciformis</i>	+			+	+		дкг	IV–V	V–IX	светло-зелёный
<i>Brachypodium sylvaticum</i>				+	+	+	ккг	IV	VI–IX	темно-зелёный
<i>Bromus inermis</i> Leyss.	+	+		+	+	+	дкк	IV–V	VI–X	зелёный
<i>Calamagrostis epigeios</i>	+					+	дкк	V–VI	VI–IX	серовато-зелёный
<i>Calamagrostis canescens</i>				+	+	+	дкк	IV–V	VI–X	зелёный
<i>Dactylis glomerata</i>	+			+	+		ккг	IV–V	V–IX	серовато-зелёный
<i>Elymus repens</i>	+			+	+		дкк	IV–V	V–IX	темно-зелёный
<i>Festuca orientalis</i>	+			+	+	+	пдг	IV–V	V–VII	темно-зелёный
<i>Glyceria maxima</i>				+			дкг	IV–V	VI–X	зелёный
<i>Leersia oryzoides</i>				+	+		дкк	V–VI	VI–IX	желтовато-зелёный
<i>Leymus racemosus</i>	+			+		+	дкг	IV–V	V–VIII	голубоватый
<i>Melica altissima</i>				+	+	+	дкк	IV–V	VI–VIII	зелёный
<i>Melica transsilvanica</i>						+	ккг	IV–V	V–VII	светло-зелёный
<i>Milium effusum</i>		+		+	+	+	ккг	IV	V–VIII	светло-зелёный
<i>Molinia caerulea</i>				+	+	+	ккг	V–VI	VI–X	изумрудно-зелёный
<i>Phalaroides arundinacea</i>				+	+	+	дкк	IV–V	V–VIII	темно-зелёный
<i>Phleum phleoides</i>	+					+	дкг	IV–V	V–VIII	зелёный
<i>Phleum pratense</i>	+			+	+	+	дкг	III–IV	V–VIII	голубовато-зелёный
<i>Poa palustris</i>				+	+	+	ккг	V–VI	VI–VIII	темно-зелёный
<i>Poa trivialis</i>				+	+		дкг	V–VI	VI–VIII	зелёный
<i>Psathyrostachys juncea</i>	+					+	пдг	V–VI	VI–VII	серовато-зелёный
<i>Stipa borysthena</i>						+	пдг	IV–V	V–VI	сизовато-зелёный
<i>Stipa donetzica</i>						+	пдг	IV–V	V–VII	серовато-зелёный
<i>Stipa pennata</i>	+					+	пдг	IV–V	V–VI	серовато-зелёный
<i>Stipa pulcherrima</i>						+	ккг	IV–V	V–VI	темно-зелёный
Итого высокосослых:	11	2	-	20	8	25	19			
Всего видов:	21	2	11	31	15	58	45			

Примечания: 1 – открытые горизонтальные придорожные полосы, 2 – горизонтальные полосы с древесными насаждениями, 3 – откосная часть насыпи и выемки, 4 – грунтовые кюветы, биодренажные каналы, 5 – приобочная полоса обочин, 6 – полоса отвода до снегозащитных древесно-кустарниковых насаждений; 7 – рекреационные и декоративные объекты; БМ – биоморфа, дкг – длиннокорневищный гемикриптофит, ккг – короткокорневищный гемикриптофит, нсг – надземно-столонообразующий гемикриптофит, пдг – плотнoderновинный гемикриптофит, дкк – длиннокорневищный криптофит, ккк – короткокорневищный криптофит; НВ – начало вегетации, К – колошение, Д – диссеминация.

3. **Откосная часть насыпи или выемки окружных и межгородских магистралей.** Экологические условия: полная освещённость, полутень, низкая влажность, неустойчивый плодородный либо малоплодородный незасоленный грунт с нейтральной, либо слабощелочной реакцией, газо- и пылезагрязнение от сильного до слабого, в зависимости от транспортной нагрузки. Соответствующие экоморфы: гелиосциофиты, сциогелиофиты и гелиофиты; ксерофиты, ксеромезофиты и мезоксерофиты; алевритофиты, аргилофиты и петрофиты; гликофиты и гликогалофиты; мезотрофы и олиготрофы; нейтрофилы и базифилы. Для определения функциональной пригодности растений, при подборе ассортимента для участков подобного типа, их экоморфологические характеристики необходимо учитывать в комплексе с биоморфологическими особенностями. Обязательным доминантным компонентом травосмесей являются длиннокорневищные и столонообразующие геофиты и гемикриптофиты, корни (столон) которых, проникая на большое расстояние и достаточную глубину, создают естественную армирующую сеть, удерживающую почву. В целом дернинообразующие виды, улучшая дренирование верхних слоёв почвы и защищая её от прямого воздействия осадков, ветра и постоянных потоков воздуха, существенно снижают риск поверхностной эрозии. Среди выделенных нами декоративных многолетних злаков аборигенной флоры насчитывается только 14 таких видов, 13 из которых средне- и высокорослые, что с эстетической точки зрения в рамках предлагаемой концепции (сокращение покосов до 1–2 в год) для озеленения откосов неприемлемо. Единственный низкорослый длиннокорневищный вид – *K. delavignei*. По своим габитуальным и экологическим характеристикам могут быть предложены ещё 10 короткокорневищных и плотнодерновинных злаков, для формирования многокомпонентных сообществ с длиннокорневищными и столонообразующими видами из представителей других семейств.

4. **Грунтовые кюветы, биодренажные канавы.** Используются для отвода и постепенной инфильтрации талых и ливневых вод на уровень грунтовых, что предотвращает эрозию почв. Экологические условия: полная освещённость либо полутень, длительный застой воды, повышенная засоленность, повышенная концентрация различных загрязнителей в талых и дождевых водах, уплотнённый плодородный (намывной) грунт с нестабильной кислотностью, повышенное газо- и пылезагрязнение. Соответствующие экоморфы: гелиосциофиты, сциогелиофиты и гелиофиты; ксеромезофиты и мезоксерофиты; алевритофиты, аргилофиты, петрофиты, хазмофиты и псаммофиты; гликофиты и гликогалофиты; мезотрофы и олиготрофы; нейтрофилы и базифилы. Для озеленения кюветов и биодренажных канав пригодны влаголюбивые или хорошо переносящие временное подтопление виды, характеризующиеся высокой устойчивостью к антропогенным нагрузкам, в том числе и в условиях придорожных полос. На теневых участках может быть использован *M. effusum*, в полутени – *M. caerulea*, *B. inermis* [32]. Последний, наряду с другими видами (*D. glomerata*, *Ph. pratense* L., *E. repens*, *F. Rubra*) во многих странах используется для фиторемедиации – очистки почвы от тяжёлых металлов и органических соединений за счёт поглощения и удержания в своих тканях вредных веществ либо стимуляции развития симбиотических микроорганизмов, принимающих участие в процессе очистки [33–34].

5. **Прибровочная полоса обочин** – грунтовая (неукреплённая) часть обочин шириной 0,5 м, служащая переходной зоной от обочины к откосу. Экологические условия: полная освещённость, низкая влажность, неустойчивый плодородный либо малоплодородный засоленный уплотнённый грунт с нейтральной, либо слабощелочной

реакцией, повышенное газо- и пылезагрязнение. Соответствующие экоморфы: гелиофиты; ксерофиты, ксеромезофиты и мезоксерофиты; алевритофиты, аргилофиты, петрофиты и хазмофиты; гликофиты и гликогалофиты; мезотрофы и олиготрофы; нейтрофилы и базифилы. По техническим требованиям полоса должна задерняться стриженным газоном, либо низкими почвопокровными растениями, поэтому в данном случае применимы виды, обычные для придорожного озеленения. В составе аборигенной флоры насчитывается 7 таких видов.

6. Полоса отвода до снегозащитных древесно-кустарниковых насаждений.

Экологические условия: полная освещённость, эдафические условия аналогичные, либо близкие к зональным, повышенное газо- и пылезагрязнение. Соответствующие экоморфы: гелиофиты; ксерофиты, ксеромезофиты и мезоксерофиты; алевритофиты, аргилофиты, петрофиты и хазмофиты; гликофиты и гликогалофиты; мезотрофы и олиготрофы; нейтрофилы и базифилы. Самая оптимальная локация для газонов лугового типа, где в качестве основы могут быть использованы практически все виды декоративных многолетних злаков аборигенной флоры для моделирования близких к естественным разнотравным сообществам.

7. Рекреационные и декоративные объекты. Обустраиваются в дорожных карманах, где техногенная нагрузка от движения автотранспорта и противогололедных реагентов минимизирована. Экологические условия: освещённость, режим увлажнения, плодородие и гранулометрический состав почвы регулируются искусственно под планируемый ассортимент, который отбирается в первую очередь по декоративным качествам и целевому назначению конкретного объекта рекреации.

Используемая классификация придорожных территорий может быть учтена при последующем проведении общих флористических описаний таких экотопов [23, 24]. Анализ спонтанной растительности придорожных экосистем позволит выявить наиболее устойчивые к техногенным нагрузкам виды не только семейства Poaceae, но и других семейств (Asteraceae Giseke, Fabaceae Lindl., Lamiaceae Martinov, Ranunculaceae Juss., Rosaceae Juss. и др.) представители которых используются при формировании газонов лугового типа, что позволит оптимизировать ассортимент видов, рекомендуемых для придорожного озеленения.

Основные агротехнические мероприятия при закладке и содержании газонов лугового типа это предпосевная многократная обработка неизбирательными гербицидами в течение 1,5–4,5 месяцев и точечное опрыскивание для борьбы с сорняками весной и в начале лета, обязательное первые 2 года после посева, а также 1–2 скашивание в зависимости от функциональной нагрузки объекта озеленения и выбранного ассортимента.

Заключение. Среди представителей семейства Poaceae Barnhart аборигенной флоры насчитывается 62 (35 %) многолетних вида, пригодных для использования в качестве основных элементов при формировании газонов различного типа. Культурные формы 18 видов в настоящее время широко используются при создании стриженных газонов, 9 из них по своим экобиоморфологическим характеристикам пригодны для озеленения придорожных полос. Для устройства искусственных флорокомплексов лугового типа могут быть использованы все 62 вида. Такие флорокомплексы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционным стриженным газоном: природную эстетичность, усиление санитарно-гигиенической функции – пыле-, газопоглощение, шумоподавление, синтез кислорода, ионизация приземных слоев воздуха, выделение фитонцидов, испарение воды и локальное повышение влажности за счет увеличения высоты травостоя; усиление противоэрозионной функции за счет более эффективного

влагозадержания; существенное снижение ресурсоемкости. Использование аборигенных видов добавляет им экологичности: поддержание естественной среды для местной фауны, возможность сохранения в культуре видового состава аборигенных растительных сообществ, возможность вытеснения рудералов, в том числе инвазивных видов (эргазиофитов и ксенофитов) за счет формирования флорокомплексов, близких к характеристикам природных фитоценозов по структуре и способности на конкурентной основе сохранять автохтонность флористического состава. Показано, что 62 исследуемых вида имеют широкий экоморфологический и габитуальный спектр, а также биоморфологические характеристики, соответствующие функциональной нагрузке требуемой от растений для придорожного озеленения. Такое разнообразие позволило выделить среди них 7 функциональных групп, на основании которых могут быть подобраны комбинации многолетних злаков, являющиеся основой для разнотравных сообществ на придорожных участках различных категорий по их морфологии и целевому использованию.

Несмотря на то, что семенной/посадочный материал представленного ассортимента предлагается для реализации в торговой сети (в разной степени доступности), более целесообразным по нашему мнению является формирование регионального питомника по репродукции, всестороннему изучению, селекционному улучшению и широкому внедрению в региональное озеленение эволюционно адаптированных к местным условиям видов аборигенной флоры. Это касается не только представителей семейства Poaceae, но и других хозяйственно полезных видов и в первую очередь реликтовых, эндемичных и/или имеющих тот или иной соэкологический статус.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории “Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса” (номер госрегистрации 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tredici P. The Flora of the Future: Celebrating the Botanical Diversity of Cities // Places Journal. – 2014. – P. 198–217. – DOI: 10.22269/140417.
2. Tredici P. Del Spontaneous Urban Vegetation: Reflections of Change in a Globalized World // Nature and Culture. – 2010. – Vol. 5. – P. 299–315.
3. Guo P., Yu F., Ren Y., Liu D., Li J., Ouyang Z., Wang X. Response of Ruderal Species Diversity to an Urban Environment: Implications for // Conservation and Management International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2018. – Vol. 15. – No. 12. – P. 28–32. DOI: 10.3390/ijerph15122832.
4. Iuliana P., Adelina D., Valentine S., Doina C., & Georgel M. Ecological And Aesthetic Role Of Spontaneous Flora In Urban Sustainable Landscapes Development // Journal of Plant Developmet. – 2011. – Vol. 18. – P. 169–177.
5. Kuhn N. Intentions for the unintentional spontaneous vegetation as the basis for innovative planting design in urban areas // Journal of Landscape Architecture. – 2006. – Vol. 1. – № 2. – P. 46–53. DOI: 10.1080/18626033.2006.9723372.
6. Владыкина В.Д., Тукова Д.Е., Третьякова А.С., Петрова И.В. Возможность использования аборигенных видов растений в озеленении г. Екатеринбурга // Ботанические сады в современном мире. – 2023. – Т. 4. – С. 46–49.
7. Корниенко, В. О. Мониторинг состояния древесных растений центральной части города Донецка / В. О. Корниенко, Л. В. Хархота // Самарский научный вестник. – 2023. – Т. 12, № 2. – С. 46–51. – DOI: 10.55355/snvt2023122107. – EDN: BATLWA
8. Вознячук И. П., Власова А. Б., Степанович И. М., Годнева А. Т., Решетников В. Н. Формирование устойчивых придорожных растительных сообществ высокой ботанической и эстетической ценности: основные положения концепции и экспериментальное обоснование // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2019. – Т. 64. – № 2. – С. 238–254. – DOI: 10.29235/1029-8940-2019-64-2-238-254.

9. Susan Barton, Cecilia Souza Gontijo Garcia Roadside Landscapes – A potential environmental resource // *Ornamental Horticulture*. – 2015. – Vol. 21. – N 3. – P. 277–290. DOI:10.14295/oh.v21i3.844
10. Древаль И.В., Лысых О.Ю. Использование экологического подхода при формировании современных ландшафтных объектов // *Коммунальное хозяйство городов*. – 2011. – Вып. 97. – С. 408–412.
11. Жесткова Д. Б. Состав и структура травянистого покрова придорожных территорий автомагистралей крупного промышленного города: 03.02.08 Экология (по отраслям): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Нижний Новгород, 2016. – 22 с.
12. Антонюк Н. Є., Бородіна Р. М., Собко В. Г., Скворцова Л. С. Рідкісні рослини флори України в культурі. – К.: Наукова думка, 1982. – 216 с.
13. Гриценко В.В. Рідкісні види рослин у степовому культурфітоценозі: систематичний склад, соціологічна характеристика, історичні аспекти інтродукції та сучасний стан // *Інтродукція рослин*. – 2012. – № 2. – С. 13–21.
14. Wilde, H.D., Kamal, J.K.G. & Colson, G. State of the science and challenges of breeding landscape plants with ecological function // *Horticulture Research*. – 2015. – Vol. 2. – DOI: 10.1038/hortres.2014.69.
15. Anderson A.G., Messer I., Langellotto G.A. Gardeners' Perceptions of Northwestern US Native Plants Are Influenced by Ecological Information and Garden Group Affiliation // *Horticulture Technology*. – 2021. – Vol. 31. – No 4. – P. 458–469. – DOI: 10.21273/HORTTECH04770-20
16. Лаврова О.П. Природные зрительные элементы как важный фактор формирования комфортной визуальной среды урбанизированных пространств // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 133–141. – DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-133-141.
17. Bretzel F., Vannucchi F., Romano D., Malorgio F., Benvenuti S., Pezzarossa B. Wildflowers: from conserving biodiversity to urban greening – a review // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2016. – Vol. 20. – P. 428–436.
18. Волкова Л.Б., Соболев Н.А. Разнотравный газон в современной концепции озеленения городов (на примере Москвы) // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. Научно-информационный журнал*. – 2015. – Т. 19, № 5. – С. 145–152.
19. Бурда Р.І. Анотований список флори промислових міст на південному сході України. – Донецьк: Б.в., 1997. – 49 с.
20. Бурда Р.И. Урбанофлора комплекса Донецк – Макеевка // VII съезд Укр. ботан. о-ва: Тезисы докладов. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 11.
21. Остапко В.М., Бойко А.В., Мосякин С.Л. Сосудистые растения юго-востока Украины. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 247 с.
22. Рева М.Л., Хархота А.И., Дмитриенко П.П. Растительность техногенных земель в Донбасе // *Растения и промышленная среда*. – Свердловск: УрГУ, 1978. – Вып. 5. – С. 33–43.
23. Калинина А.В., Сафонов А.И. Травянистые фитоценозы придорожной территории г. Макеевки // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. – 2023. – № 3. – С. 6-11. – EDN RMXEAQ.
24. Калинина А.В. Таксономический и эколого-ценотический анализ раннецветущих растений некоторых трансформированных экотопов Донецко-Макеевской агломерации // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. – 2023. – № 1-2. – С. 23-28. – EDN СВИYEG.
25. World Flora Online (WFO) – 2024. – URL: <http://www.worldfloraonline.org>
26. Матвеев Н. М. Биоэкологический анализ флоры и растительности (на примере лесостепной и степной зоны). – Самара: Самарский университет, 2006. – 311 с.
27. Матвеев Н. М. Основы степного лесоведения профессора А. Л. Бельгарда и их современная интерпретация // *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии*. – 2014. – Т. 23 – № 1. – С. 5–92.
28. Корниенко, В. О. Влияние экологических факторов на физико-механические свойства, морфометрию и аллометрию древесных растений урбоэкосистем (на примере города Донецка): специальность 15.15.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Корниенко Владимир Олегович, 2022. – 166 с. – EDN: QYUEPJ
29. Литвенкова И.А. Экология городской среды: Урбоэкология: Курс лекций – Витебск: Издательство УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2005.– 163 с.
30. Доклад о состоянии окружающей среды на территории Донецкой Народной Республики за 2021 год / Госкомэкополитики ДНР. – Донецк, 2022. – 89 с.
31. Бухарина И. Л., Журавлева А. Н., Большова О. Г. Городские насаждения: экологический аспект. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 206 с.
32. Кабанов А.В., Пирко И.Ф., Погорелова И.А. Декоративные злаки для городского озеленения в степной зоне / *Субтропическое и декоративное садоводство*. – 2023. – № 86. – С. 1–34. – DOI: 10.31360/2225-3068-2023-86-9-34. – EDN: LAEKXX

33. Зайнутдинова Э.М., Шамеутдинова Е.А., Ягафарова Г.Г., Мазитова А.К. Фиторемедиация технонарушенных территорий // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 157–159.
34. Шавалда Е.С. Таксономический состав и экологическая характеристика придорожной флоры (на примере автомобильных дорог г. Минска и Минской области) // Организмы, популяции и сообщества в трансформирующейся среде. Сборник материалов XVII Международной научной экологической конференции. Под редакцией Ю.А. Присного (Белгород, 22–24 ноября 2022 г.) – Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 240–243.

Поступила в редакцию 14.08.2024 г.

PLANT RESOURCES OF THE SOUTH OF THE EAST EUROPEAN PLAIN. NATIVE TYPES OF CEREALS FOR LANDSCAPING OF ROADSIDE TERRITORIES OF THE DONETSK-MAKEYEVKA AGGLOMERATION

I.F. Pirko, V.O. Kornienko

Among the representatives of the Poaceae Barnhart family of native flora, 62 perennial species have been identified, which can be recommended as a basic range of cereals for regional landscaping. Their ecological, biomorphological, phenorhythmotypic composition and basic habitual characteristics are analyzed. The prospects of using the presented assortment in meadow-type lawns for the design of roadside lanes of the Donetsk-Makeyevskaya agglomeration on the basis of the modern concept of the formation of stable roadside communities reproducing the structure of natural phytocenoses are shown. Combinations of species recommended as the basis (edifiers) of artificial flora complexes of various functionality modeling the phytocenotic structure are presented.

Keyword: Poaceae Barnhart, steppe zone, urban ecosystems, ecomorph, biomorph, ecotope, artificial flora complexes.

Пирко Инна Фёдоровна

кандидат биологических наук,
ведущий инженер научно-исследовательской части
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.

Pirko Inna Fyodorovna

candidate of biological sciences,
lead engineer of Research Department,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Корниенко Владимир Олегович

кандидат биологических наук,
заведующий научно-исследовательской частью,
доцент кафедры биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.

Kornienko Vladimir Olegovich

candidate of biological sciences,
head of Research Department,
associate professor of Biophysics Department,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

**БИОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КУЛЬТИВИРУЕМОЙ
ДЕНДРОФЛОРЫ ЮГО-ВОСТОЧНОГО БЕРЕГА КРЫМА**© 2024. *И.Л. Потапенко, Н.И. Клименко, В.Ю. Летухова*

В статье представлена биоморфологическая структура дендрофлоры зеленых насаждений Юго-Восточного берега Крыма. (ЮВБК). Мы изучили видовой состав и формовое разнообразие древесных растений парков, скверов, учебных, административных, медицинских учреждений и уличных насаждений. Древесные растения культурфитоценозов ЮВБК включают 322 вида и культивара, которые представлены широким спектром жизненных форм. В биоморфологической структуре преобладают деревья и кустарники – 53,7 % и 41,9 % соответственно от общего количества видов, гибридов и культиваров; лианы составляют 4,1 %, бамбук – 0,3 %. Из общего спектра жизненных форм преобладают листопадные деревья (31,1 %), листопадные кустарники (25,5 %) и хвойные деревья (15,5 %). Листопадные растения доминируют в зеленых насаждениях ЮВБК и охватывают 200 (62,1 %) видов, гибридов и культиваров. Вечнозеленые растения (в том числе полувечнозеленые) представлены 122 (37,9 %) видами и культиварами. При создании зеленых насаждений следует учитывать соотношение растений различных жизненных форм, что позволит добиться не только устойчивых культурфитоценозов, но и максимального декоративного эффекта.

Ключевые слова: зеленые насаждения, декоративные древесные растения, жизненные формы, Юго-Восточный берег Крыма.

Введение. Значение габитуса, внешнего облика организмов, в познании их сущности осознано на начальных этапах изучения растений. В России ведущая роль в изучении внешнего облика растений принадлежит И.Г. Серебрякову, который не только описал специфику габитуса многих растений, но и заложил основные направления изучения их внешнего облика в рамках новой науки – экологической морфологии, объектом исследования которой стали жизненные формы этих организмов. Жизненная форма определена [1] как общий облик – габитус растения, обусловленный своеобразием его системы подземных и надземных вегетативных органов, формирующихся в онтогенезе в результате роста и развития растений в условиях среды. В настоящее время биоморфология не только развивается как самостоятельная наука, но и интегрируется в другие области изучения растений. При внедрении новых сведений об особенностях формирования габитуса и структурной организации биоморф в прикладные исследования станет возможно по-новому оценить данные по экологическому мониторингу и введению в культуру новых видов растений, характеризовать и сравнивать флоры регионов, формулировать подходы к рациональному природопользованию [2].

Материал и методика исследования. Территориально район исследований представляет собой восточный район физико-географической области Южного берега Крыма и включает прибрежную полосу южного склона Главной гряды Крымских гор от горы Кастель на западе до мыса Ильи на востоке [3, 4]. В отличие от горного и равнинного Крыма эта часть полуострова является областью распространения восточного варианта крымского субсредиземноморья [5, 6]. Исследования проводились в населенных пунктах, расположенных восточнее города Алушта по побережью до города Феодосия включительно (город Судак и поселки Солнечногорское, Малореченское, Рыбачье, Морское, Новый Свет, Солнечная Долина, Щебетовка, Курортное, Коктебель, Орджоникидзе). Изучались объекты зеленого строительства общего пользования (парки, скверы), ограниченного пользования (территории учебных,

административных заведений), уличные насаждения, а также парки рекреационных комплексов. Дендрологическая инвентаризация зеленых насаждений ЮВБК была проведена путем экспедиционных выездов на протяжении 2018–2023 годов.

В соответствии с классификацией [7] все древесные растения, используемые в озеленении района исследований, разделяются на следующие группы: деревья (листопадные и вечнозеленые), кустарники (листопадные и вечнозеленые), лианы (листопадные и вечнозеленые). Между кустарниками и настоящими деревьями существуют промежуточные формы растений, напоминающие кустовидные деревья [8]. Для таких растений, которые можно отнести к высокому кустарнику или маленькому (часто многоствольному) дереву, мы посчитали целесообразным ввести категорию «дерево или кустарник». К таковым мы отнесли, например, некоторые виды рода *Crataegus* L. (*Crataegus orientalis* Pall. ex Vieb., *Crataegus rhipidophylla* Gandoger и другие). Среди жизненных форм культивируемой дендрофлоры ЮВБК также встречаются: суккулентно-стеблевой безлиственный кустарник (опунция), ветвящееся розеточное дерево (юкка), пальма. По ритму развития листвы все растения исследуемого района подразделяются на листопадные, вечнозеленые и полувечнозеленые [9].

Анализ результатов. Древесные растения культурфитоценозов ЮВБК включают 322 вида и культивара, они представлены широким спектром жизненных форм (табл. 1). Для удобства их дальнейшего анализа все жизненные формы объединены в более крупные группы [10].

Таблица 1

Распределение растений культивируемой дендрофлоры ЮВБК по жизненным формам

Жизненные формы (Биоморфа)	Количество видов, гибридов, культурваров	% от общего количества видов, гибридов, культурваров
Дерево		
Листопадное	100	31,1
Листопадное дерево или кустарник	9	2,8
Хвойное	50	15,5
Хвойное листопадное	1	0,3
Хвойное дерево или кустарник	1	0,3
Вечнозеленое лиственное	6	1,9
Юкка (ветвящееся розеточное дерево)	4	1,2
Пальма	2	0,6
Всего	173	53,7
Кустарник		
Листопадный	82	25,5
Хвойный	3	0,9
Вечнозеленый лиственный	37	11,5
Вечнозеленый или полувечнозеленый	1	0,3
Полувечнозеленый	4	1,2
Вечнозеленый кустарничек	5	1,6
Опунция (суккулентно-стеблевой безлиственный кустарник)	3	0,9
Всего	135	41,9
Лиана		
Вечнозеленая	5	1,6
Листопадная	8	2,5
Всего	13	4,1
Бамбук		
Бамбук	1	0,3
Итого	322	100

Деревья – наиболее мощная долголетняя и выразительная форма растений. Своеобразие этой формы настолько велико, что нередко ее присутствие определяет характер целых природных местностей. Характер большинства садово-парковых ландшафтов также определяется в первую очередь древесными формами. Деревья составляют основу почти всякого садово-паркового ландшафта и определяют его физиономическое восприятие [11]. Деревья также играют важную роль в охране окружающей среды: поглощают парниковые газы и загрязняющие вещества, выделяют кислород, снижают объем и загрязнение поверхностного стока, поглощают шум и ветер, корректируют микроклимат, а также играют большую роль в поддержании биологического разнообразия и экологического равновесия урбоэкосистем.

Деревья составляют более половины (53,7 %) культивируемой дендрофлоры ЮВБК, среди которых преобладают листопадные лиственные (33,9 %) и хвойные (16,1 %). Доля других деревьев (вечнозеленые лиственные, юкки, пальмы) незначительна – 3,7 %.

Листопадные деревья выполняют различные функции в ландшафтном дизайне: создают тень в жаркий летний период, снижают скорость ветра, обеспечивают весеннее и летнее цветение, дают красивую осеннюю окраску листвы. Листопадные лиственные деревья, такие как *Aesculus hippocastanum* L., *Albizia julibrissin* Durazz., *Morus alba* L., *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, *Platanus × acerifolia* (Aiton) Willd., *P. orientalis* L., *Robinia pseudoacacia* L. широко используются как в городском озеленении, так и в парках рекреационных комплексов. Они применяются для создания групп, аллей, создания искусственных ландшафтов, часто – в солитерных посадках. Некоторые листопадные деревья часто меняют жизненную форму, растут в виде многоствольного дерева: *Acer campestre* L., *Carpinus orientalis* Mill., *Cydonia oblonga* Mill., *Elaeagnus angustifolia* L., *Ficus carica* L., *Morus alba* L., *Prunus duclis* (Mill.) D.A. Webb, *Punica granatum* L., *Robinia hispida* L., *Salix caprea* L.

В декоративном садоводстве Крыма хвойные деревья занимают ведущее место. Ценность их в том, что они отличаются стойкостью, долговечностью, высокими эстетическими свойствами, имеют много декоративных форм [12–14]. Кроме того, хвойные насаждения играют важную почвозащитную, водоохранную и санитарно-гигиеническую роль, смягчая климат, насыщая воздух кислородом и фитонцидами. Они имеют большое значение в художественном оформлении парковых пейзажей, украшая ландшафт в любое время года. Наряду с представителями аборигенной флоры (*Juniperus excelsa* M.Bieb., *J. sabina* L., *Pinus brutia* Ten., *P. nigra* J.F. Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe) многие интродуцированные в разные времена хвойные деревья прочно вошли в культуру Крыма (*Cupressus arizonica* Greene, *C. sempervirens* L., *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière, *C. deodara* (Roxb. ex D. Don) G. Don, *C. libani* A. Rich., *Pinus pinea* L.). В настоящее время эти деревья, которые произрастают практически повсеместно, формируют культурный ландшафт ЮВБК. Такие вечнозеленые лиственные деревья, как *Arbutus andrachne* L., *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl., *Magnolia grandiflora* L., *Olea europaea* L., *Quercus ilex* L. используются ограниченно, в основном, в более теплой западной части исследуемого района. При этом они часто меняют жизненную форму и растут в виде многоствольного дерева (рис. 1).

В зеленых насаждениях ЮВБК отмечено 4 вида юкк: *Yucca aloifolia* L., *Yu. filamentosa* L., *Yu. flaccida* Haw., *Yu. gloriosa* var. *tristis* Carrière. Юкки являются необычными по облику экзотическими растениями с ярким и продолжительным цветением, что делает их украшением южных парков. Кроме декоративных качеств они

комплексно устойчивы к неблагоприятным экологическим факторам, вредителям и болезням [15–17], что делает их перспективными растениями для зеленого строительства.



Рис. 1. *Magnolia grandiflora* L. в дендропарке Карадагской научной станции (слева) и *Olea europaea* L. в зеленых насаждениях п. Малореченское (справа).

В культурфитоценозах ЮВБК отмечено два вида пальм: *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H. Wendl. и *Chamaerops humilis* L. Они являются высокодекоративными экзотическими интродуцентами, однако обладают слабой морозо- и зимостойкостью, поэтому их применение на ЮВБК ограничено западным наиболее теплым районом.

В эстетическом восприятии современного садово-паркового ландшафта большую роль играют кустарники, особенно красивоцветущие с длительным периодом цветения. Декоративность им придает также летняя и осенняя окраска листьев, яркие плоды и разнообразная форма кустов. Они являются важным элементом при создании новых и реконструкции старых парков, где применение деревьев затруднено или невозможно. Среди жизненных форм культивируемой дендрофлоры ЮВБК кустарники уступают деревьям по количеству видов и форм и составляют 41,9 %. Среди кустарников преобладают листопадные (25,5 %) и вечнозеленые лиственные (11,5 %). Доля других незначительна (4,9 %). Наибольшее распространение получили красивоцветущие виды: *Cercis siliquastrum* L., *Forsythia europaea* Degen & Bald., *Hibiscus syriacus* L., *Philadelphus coronarius* L., *Spartium junceum* L., *Spiraea* × *vanhouttei* (Briot) Zabel. Они часто используются во всех типах зеленых насаждений в виде мелких и крупных групп, зеленых изгородей.

Вечнозеленые лиственные кустарники применяются для создания групп и зеленых изгородей: *Berberis julianae* C.K.Schneid., *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, *Prunus laurocerasus* L., *Viburnum tinus* L.; повсеместно используются *Berberis aquifolium* Pursh и *Lonicera fragrantissima* Lindl. & J. Paxton.

Вечнозеленые кустарнички *Vinca major* L. и *V. minor* L. применяются в качестве почвопокровных растений во многих исследуемых объектах, что значительно усиливает их декоративный эффект, особенно во время их цветения, когда все пространство покрывается нежными сиренево-голубыми цветками. Помимо выраженной эстетической привлекательности, почвопокровные растения способствуют естественному возобновлению многих древесных растений (*Abies numidica* De Lan. ex

Carr., *A. cephalonica* Loud., *Cedrus atlantica* Manetti, *C. deodara* (D. Don) G. Don. fil., *Pinus brutia* Ten., *Cotoneaster horisontalis* Decne., *Pyracantha coccinea* Roem.) [18, 19], что подтверждается нашими данными.

Растения рода *Opuntia* Mill. являются сукулентно-стеблевыми безлистными кустарниками. Благодаря своей засухоустойчивости, нетребовательности к почвенным условиям и высокой декоративности они широко используются при создании рокариев, горок и других элементов искусственного ландшафта. В открытом грунте при озеленении ЮВБК используется 3 вида опунции, что составляет 0,9 % от общего числа видов, гибридов и культиваров: *Opuntia humifusa* (Raf.) Raf., *O. phaeacantha* Engelm. и *O. stricta* (Haw.) Haw. Благодаря экзотическому облику и длительному цветению опунции очень привлекательны, но имеют способность к агрессивному спонтанному размножению, поэтому следует избегать их применения в озеленении.

Древесные лианы все чаще используются в практике современного зеленого строительства. Кроме высокого эстетического эффекта, вертикальное озеленение играет защитную роль, предохраняя здания и сооружения от влияния солнечных лучей и осадков. Лианы незаменимы и в тех случаях, когда нет достаточного места для посадки деревьев и кустарников или необходимо задекорировать арки, перголы, беседки, балконы. Многие исследователи сообщают о шумопоглощающих свойствах вертикального озеленения. Зеленая масса лиан, покрывающих стены, увеличивает их звукопоглощающую способность в 6–8 раз, способствует рассеиванию звуковой энергии [20, 21]. Лианы составляет лишь 4,1 % от общего количества видов, гибридов, культиваров и представлены следующим образом: листопадные – 8 (2,5 %), вечнозеленые – 5 (1,6 %). Из листопадных лиан чаще других используются *Campsis radicans* (L.) Seem. и *Parthenocissus quinquefolia* Planch. Вечнозеленая лиана *Hedera helix* L. применяется, в основном, в качестве почвопокровного растения.

В озеленении южных районов часто используют однодольные растения – бамбуки. Их применяют при стилизации японских и китайских садов, озеленении водоемов и холмов, декорирования ограждений. Они ограниченно используются для озеленения курортов Черноморского побережья Кавказа и Южного берега Крыма [22, 23]. На ЮВБК бамбук (*Pseudosasa japonica* Makino) встречается редко, отмечен в единичных местах произрастания. Использование бамбуков в зеленых насаждениях исследуемого региона нуждается в дальнейших исследованиях.

Любое растительное сообщество продуктивней и более устойчиво, если состоит из видов с разными жизненными формами, т.к. полнее использует ресурсы среды и имеет более разнообразные внутренние связи. Поэтому при создании зеленых насаждений нужно учитывать соотношение растений различных жизненных форм. При их грамотном сочетании можно добиться не только устойчивых культурфитоценозов, но и максимального декоративного эффекта [24, 25].

Выводы. В биоморфологической структуре культивируемой дендрофлоры ЮВБК преобладают деревья и кустарники, что составляет 53,7 % и 41,9 % от общего количества видов, гибридов и культиваров соответственно; лианы составляют 4,1 %, бамбук – 0,3 %. Доминирование деревьев над кустарниками является следствием преимущества в большинстве парков лесного типа садово-паркового ландшафта, что способствует созданию устойчивых и долголетних насаждений.

В общем спектре жизненных форм преобладают листопадные деревья (31,1 %), листопадные кустарники (25,5 %) и хвойные деревья (15,5 %).

В целом, листопадные растения доминируют в зеленых насаждениях ЮВБК и охватывают 200 (62,1 %) видов, гибридов и культиваров. Вечнозеленые растения (в том

числе полувечнозеленые) представлены 122 (37,9 %) видами, гибридами и культиварами. Поэтому насыщение культурфитоценозов ЮВБК вечнозелеными видами и формами древесных растений может значительно повысить их эстетическую привлекательность.

Исследование проводилось по темам государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ госрегистрации 121032300023-7) и НБС-ННЦ (№ госрегистрации FNNS-2022-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений / И.Г. Серебряков. – М.: Высш. школа, 1962. – 377 с.
2. Савиных Н.П. Биоморфология: современное состояние и перспективы / Н.П. Савиных, В.А. Черёмушкина // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22, № 5. – С. 659–670.
3. Физико-географическое районирование Украинской ССР / под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. – Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1968. – 683 с.
4. Подгородецкий П.Д. Крым. Природа [справ. изд.] / П.Д. Подгородецкий. – Симферополь: Таврия, 1988. – 192 с.
5. Бобра Т.В. Крымское южнобережное субсредиземноморье (восточная часть) / Т.В. Бобра, Л.А. Багрова // Перспективы создания Единой природоохранной сети Крыма / ред. кол. В.А. Боков, Н.В. Багров, Л.А. Багрова и др. – Симферополь: Крымское учебно-педагогическое гос. изд-во, 2002. – С. 158–159.
6. Крымское субсредиземноморье / Л.А. Багрова, В.А. Боков, Л.Я. Гаркуша, Н.А. Драган // Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана. – 2003. – Вып. 13. – С. 95–105.
7. Серебряков И.Г. Жизненные формы растений и их изучение / И.Г. Серебряков // Полевая геоботаника. – М.–Л.: Наука, 1964. – Т. 3. – С. 146–208.
8. Куперман Ф.М. Морфофизиология растений / Ф.М. Куперман. – М.: Высш. школа, 1968. – 142 с.
9. Куликов Г.В. Биологические группы древесных растений по продолжительности жизни листа и периодичности листопада / Г.В. Куликов // Бюлл. ГБС АН СССР. – 1988. – №. 147. – С. 66–71.
10. Интродукция и селекция декоративных растений в Никитском ботаническом саду (современное состояние, перспективы развития и применение в ландшафтной архитектуре) / под общ. ред. Ю.В. Плугатаря. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. – 432 с.
11. Рубцов Л.И. Деревья и кустарники в ландшафтной архитектуре / Л.И. Рубцов. – Киев: Наук. думка, 1977. – 272 с.
12. Кравченко О.Г. Растущие в Крыму декоративные формы хвойных и их вегетативное размножение / О.Г. Кравченко, В.Г. Севастьянов, А.М. Захаренко. – Ялта: НБС–ННЦ, 2006. – 33 с.
13. Потапенко И.Л. Декоративные формы хвойных древесных растений для озеленения Юго-восточного Крыма / И.Л. Потапенко, Н.И. Клименко // Перспективы интродукции декоративных растений в ботанических садах и дендропарках (к 10-летию Ботанического сада Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского) / Матер. междунар. науч. конф. – Симферополь: Крымский федеральный ун-т им. В.И. Вернадского, 2014. – С. 40–43.
14. Потапенко И.Л. Хвойные деревья и кустарники в озеленении восточного района Южного берега Крыма / Потапенко И.Л., Кузнецов С.И., Клименко Н.И. // 100 лет Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского: сборник научных трудов / ред. А.В. Гаевская, А.Л. Морозова. – Симферополь: Н. Орианда, 2015. – С. 205–232.
15. Куликов Г.В. Интродукция представителей Agavaceae (*Yucca* L., *Nolina* Michx.) в Никитском ботаническом саду / Г.В. Куликов // Бюлл. Гос. Никитского ботан. сада. – 1986. – Вып. 60. – С. 15–18.
16. Перспективы внедрения видов юкки (*Yucca* L.) в озеленение / А.П. Максимов, В.М. Новикова, Т.Г. Мухортова, Ю.С. Волокитин // Бюлл. Гос. Никитского ботан. сада. – 1987. – Вып. 64. – С. 29–33.
17. Результаты первичного интродукционного испытания новых видов юкки (*Yucca* L.) в Крыму / А.П. Максимов, Ю.В. Плугатарь, А.Ф. Хромов и др. // Труды КНС им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН. – 2018. – Вып. 2 (6). – С. 3–29.
18. Казимилова Р.Н. О влиянии почвопокровных растений на рост интродуцентов / Р.Н. Казимилова, С.И. Кузнецов, А.П. Евтушенко // Бюлл. Гос. Никитского ботан. сада. – 1984. – Вып. 55. – С. 63–67.
19. Кузнецов С.И. Об особенностях естественного возобновления древесных интродуцентов в арборетуме Никитского ботанического сада при использовании почвопокровных растений / С.И. Кузнецов, Р.В. Галушко, В.Ф. Кольцов // Бюлл. Гос. Никитского ботан. сада. – 1978. – Вып. 2 (36). – С. 35–38.

20. Кучерявый В.А. Природная среда города / В.А. Кучерявый. – Львов: Вища школа, 1984. – 142 с.
21. Бескаравайная М.А. Клематисы – лианы будущего / М.А. Бескаравайная. – Воронеж: Кварта, 1998. – 176 с.
22. Максимов А.П. Особенности культивирования бамбуков (*Bambusa Schreb.*) на Южном берегу Крыма / А.П. Максимов, Н.Н. Трикоз, М.С. Ковалев // Вестник Нижневартковского гос. университета. – 2020. – № 1. – С. 26–33.
23. Головань Е.В. Жизненные формы растений, используемых в озеленении г. Владивостока / Е.В. Головань // Бюлл. БСИ ДВО РАН [Электронный ресурс]: науч. журн. / Ботан. сад – институт ДВО РАН. – Владивосток. – 2010. – Вып. 5. – С. 42–45. <http://botsad.ru/media/oldfiles/journal/number5/06.pdf>.
24. Головань Е.В. Ресурсы декоративных растений для озеленения внутриквартальных территорий (на примере г. Владивостока): автореф. дисс... канд. биол. наук. – Владивосток, 2015. – 24 с.
25. Храпко О.В. Основные принципы создания зеленых насаждений на придомовых территориях / О.В. Храпко, А.В. Копьева, Е.В. Головань // Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство: современные тенденции: матер. междунар. науч.-практич. конф. (г. Воронеж, 3–4 сентября 2010 г.). – Воронеж, 2010. – Т. 2. – С. 159–164.

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

BIOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CULTIVATED DENDROFLORA OF THE SOUTH-EASTERN COAST OF CRIMEA

I.L. Potapenko, N.I. Klimenko, V.Yu. Letukhova

The article presents the biomorphological structure of green spaces dendroflora of the South-Eastern Coast of Crimea (SECC). We studied the species composition and form diversity of arboreal plants in parks, squares, green areas of educational, administrative, medical institutions and street planting. Arboreal plants of the SECC cultural phytocenoses include 322 species and cultivars, which are represented by a wide range of life forms. The biomorphological structure is dominated by trees and shrubs – 53.7 % and 41.9 % respectively of the total number of species, hybrids and cultivars; vines make up 4.1 %, bamboo – 0.3 %. Deciduous trees (31.1 %), deciduous shrubs (25.5 %) and conifers (15.5 %) predominated of the total range of life forms. Deciduous plants dominate in the green spaces of the SECC and cover 200 (62.1 %) species, hybrids and cultivars. Evergreen plants (including semi-evergreens) are represented by 122 (37.9 %) species. The ratio of plants of different life forms should be taken into account when creating green spaces. It will allow achieving not only stable cultural phytocenosis but also the maximum decorative effect.

Keywords: green spaces, ornamental arboreal plants, life forms, South-Eastern Coast of Crimea.

Потапенко Ирина Леонидовна

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземкого – природный заповедник РАН, Феодосия, Республика Крым, РФ.
E-mail: ira_potapenko@mail.ru

Potapenko Irina Leonidovna

candidate of biological sciences, senior researcher, Karadag Scientific Station named after. T.I. Vyazemkogo – natural reserve of the RAS, Feodosia, Republic of Crimea, RF.
E-mail: ira_potapenko@mail.ru

Клименко Николай Иванович

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Крымский литературно – художественный мемориальный музей заповедник, Ялта, Республика Крым, РФ.
E-mail: klymenko.gnbs@mail.ru

Klimenko Nikolay Ivanovich

candidate of agricultural sciences, senior researcher, Crimean Literary and Art Memorial Museum Reserve, Yalta, Republic of Crimea, RF.
E-mail: klymenko.gnbs@mail.ru

Летухова Виктория Юрьевна

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземкого – природный заповедник РАН, Феодосия, Республика Крым, РФ.
E-mail: letukhova@gmail.com

Letukhova Victoria Yurievna

candidate of biological sciences, senior researcher, Karadag Scientific Station named after. T.I. Vyazemkogo – natural reserve of the RAS, Feodosia, Republic of Crimea, RF.
E-mail: letukhova@gmail.com

**ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НЕКОТОРЫХ
ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ В ДОНБАССЕ**© 2024. *А. И. Сафонов, Д. Н. Догадкин, В. Н. Неспирный*

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) были установлены особенности накопления 52 химических элементов в тканях растения-доминанта в ассоциациях на северо-восточных экспозициях семи терриконов в Донецко-Макеевской промышленной агломерации. *Phleum pratense* L. использован как фитомаркер системы антропотолерантности в условиях промышленного стресса и как вид, формирующий устойчивые популяционные структуры для целей фиторемедиации нарушенных местообитаний. По полученной выборке данных найдены эмпирические распределения концентраций различных элементов, выполнен расчет выборочных коэффициентов корреляции в данных для каждой пары химических элементов и для каждой пары терриконов, которые затем были использованы для иерархического кластерного анализа. Выделены главные компоненты в пространстве нормализованных концентраций химических элементов и определены весовые коэффициенты элементов в каждой из компонент. В результате проведенного статистического анализа установлена наиболее тесная связь в группах совместного накопления элементов: лантаноиды, Zr-Hf, Co-Eu, Li-Re-(Zn), Rb-Tl, Cd-Pb, Sc-Hg, Cr-Ni, Sb-U-(W-Cu).

Ключевые слова: биогеохимия, аналитический контроль, ингредиентный состав, Донбасс, Донецк, фитоиндикация, отвалы угольных шахт, терриконы

Введение. В системе оценки основных экологических последствий горнодобывающего производства [1–3] выделяют сопряженные процессы трансформации ландшафтов и загрязнения природных сред [4, 5]. Поэтому в техногенно напряженных [6, 7] и урбанизированных регионах [5, 8–10] формируется необходимость проведения оптимизационных работ по уменьшению неблагоприятных эффектов промышленного воздействия [11, 12]. Ключевым критерием часто используемой фитодиагностики [13–15] на сегодня остаётся биогеохимический [7, 16–18], т.е. детальный ингредиентный анализ специфики миграционных процессов и накопления элементов растениями конкретных локалитетов, что связано, как правило, с определенным антропогенным вмешательством в развитие локальных экосистем [3, 12, 19–22].

Донбасс (территория Центрального Донбасса) в аспекте фитоиндикационного мониторинга представлен геостратегическим полем широкомасштабного ботанико-эволюционного преобразования в контрастных геохимических условиях. Особую роль в трансформации природных геосистем играют факторы развитой инфраструктуры добычи и переработки полезных ископаемых, а также добавившийся с 2014 г. фактор военных действий. Урбанизированные и техногенные экотопы донецкого экономического региона на современном этапе с точки зрения ботанико-экологических исследований изучают в разных направлениях [23–26]. Однако биогеохимические разработки являются приоритетными, поскольку приобщены к общей сети мониторинговых наблюдений всей территории Центрального Донбасса [27–30].

Мероприятия по реализации специальной программы по установлению фитогеохимических особенностей отдельных терриконов городов Донецка и Макеевки были начаты в 2023 г. [31]. Целью настоящей работы является выявление специфики накопления отдельных элементов в фитомассе растения-доминанта на отвалах угольных шахт Донецко-Макеевской промышленной агломерации.

Материал и методика исследования. В качестве прототипов реализации эколого-ботанического мониторингового эксперимента использованы разработки отечественных ученых [6, 11, 18, 32, 33]. Система фитоиндикационного назначения принципиально связана с обнаружением достоверной разницы между параметрами в функциональном состоянии растительного организма в зависимости от геолокалитета [5, 7, 14, 34]. Поскольку экспертная оценка при определении основных миграционных потоков в биосистемах основывается на адаптированных видах-индикаторах [20, 35, 36], то в качестве основного маркерного вида был выбран *Phleum pratense* L., образующий во всех экспозициях в моновидовые сообщества.

Сбор образцов растительного материала осуществляли в сентябре 2023 г. на терриконах (террикониках) с северо-восточного склона для унификации и чистоты открытого ландшафтного эксперимента. Всего был собран материал с семи терриконов (рис. 1) в пятикратной повторности на учетных площадках 20 x 20 м.

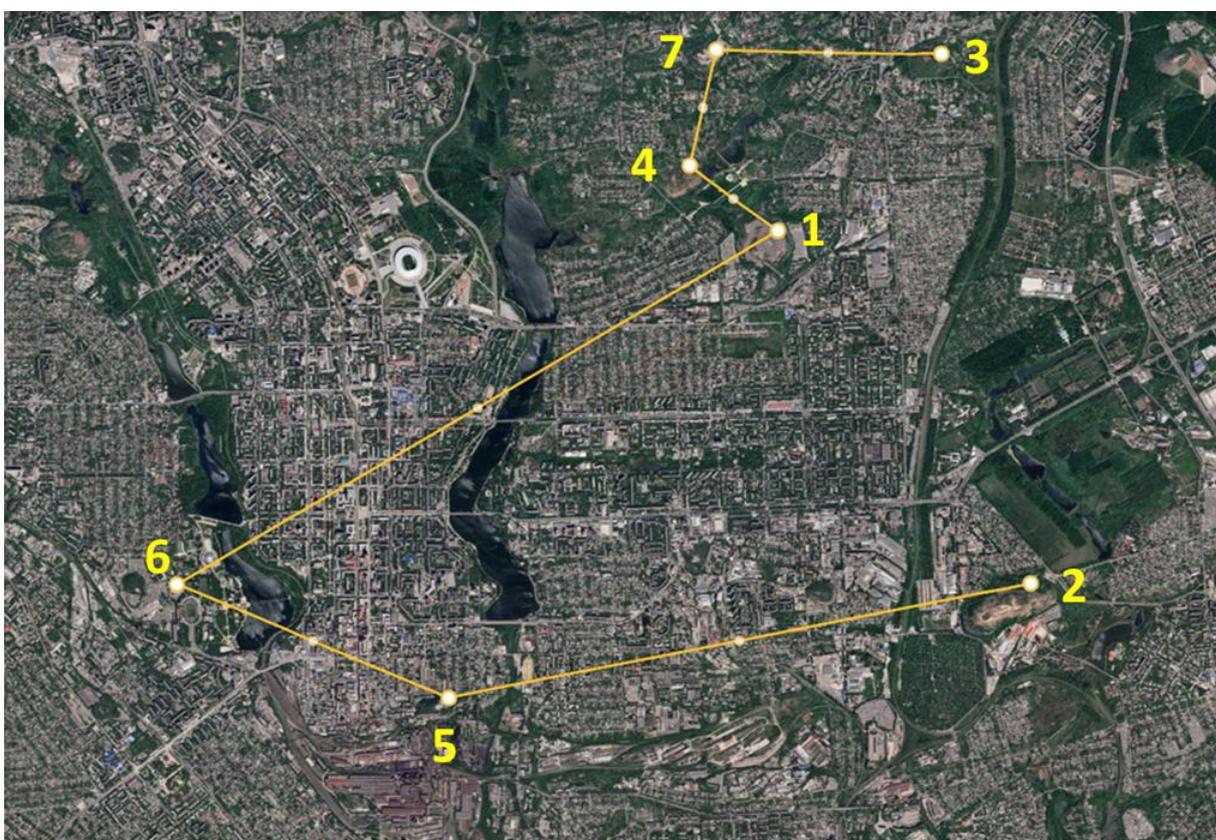


Рис. 1. Рабочая маршрутная схема локализации отбора проб (пояснения в тексте)

В представленном ниже перечне для каждой учетной площадки сбора материалов указано название отвала угольной шахты и координатный ориентир места локализации пробы:

- 1) террикон шахты (ш.) им. Калинина ($48^{\circ}01'23''\text{N}$; $37^{\circ}50'53''\text{E}$);
- 2) ш. Заперевальная ($47^{\circ}59'45''\text{N}$; $37^{\circ}52'49''\text{E}$);
- 3) ш. № 6/14 Берестовская, Ганзовка, Рогатый террикон ($48^{\circ}02'13''\text{N}$; $37^{\circ}52'09''\text{E}$);
- 4) ш. № 1-1 бис ($48^{\circ}01'42''\text{N}$; $37^{\circ}50'28''\text{E}$);
- 5) ш. Центрально-Заводская ($47^{\circ}59'16''\text{N}$; $37^{\circ}48'52''\text{E}$);
- 6) ш. Горького ($47^{\circ}59'47''\text{N}$; $37^{\circ}47'03''\text{E}$);
- 7) ш. Свято-Серафимовская ($48^{\circ}02'14''\text{N}$; $37^{\circ}50'37''\text{E}$).

Места отбора проб были также выбраны без явных признаков повреждений за последние 10 лет в результате военных событий. То есть в эксперимент вовлечены образцы растений, максимально соответствующие фоновым геохимическим циклам на рекультивируемых в 50–70-х годах XX века техногенных объектах, не подверженных специальным технологиям озеленения за последние 30 лет.

Опытным путем установлено, что северо-восточные склоны (рис. 2 и 3 приведены в качестве примеров) по признакам сукцессионного преобразования при самозарастании остывающего террикона являются наиболее успешными, что связано в первую очередь с губительным воздействием прямой инсоляции в летний период, когда поверхностная температура террикона в крайне аридных условиях становится лимитирующим фактором для выживания цветковых растений любой категории температурной выносливости.



Рис. 2. Локализация пробной площади на терриконе шахты им. Калинина, сентябрь 2023 г.



Рис. 3. Локализация пробной площади на терриконе шахты Заперевальная, сентябрь 2023 г.

Химический анализ образцов проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) в лаборатории методов исследования и анализа веществ и материалов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) по адаптированным методикам для растительных образцов [37, 38].

Определение содержания элементов в исследуемых образцах методом МС-ИСП проводили на спектрометре X Series II (Thermo Scientific), снабженном концентрическим распылителем и кварцевой циклонной распылительной камерой, охлаждаемой элементом Пельтье (2°C). Градуировочные зависимости элементов определяли, используя стандартный раствор 68 Element Standards ICP-MS-68A (Solution A и Solution B) производства High-Purity Standards (North Charleston, SC). Использовали спектрометр PlasmaLab и программу iPlasmaProQuad, разработанную и внедренную в практику лаборатории методов исследования и анализа веществ и материалов ГЕОХИ РАН [39].

Анализ результатов. Установлена доминирующая роль *Phleum pratense* в растительных микроассоциациях на северо-восточных экспозициях терриконов. Представители *Poaceae* в ряду толерантных видов занимают ведущее положение при анализе перспективных видов для необходимой технологии фиторемедиации в условиях техногенного воздействия на природные среды. Из числа видов, являющихся ассектаторами в период I-III декады сентября в 2023 г., выделены: *Plantago lanceolata* L., *Elytrigia stipifolia* (Czern.) Nevski, *Astragalus cicer* L., *Trifolium campestre* Schreb., *Echium vulgare* L., *Picris hieracioides* L., *Verbascum lychnitis* L., *Trifolium pratense* L., *Oenothera biennis* f. *stenopetala* (E.P.Bicknell) B.Boivin, *Cirsium vulgare* (Savi) Ten., *Setaria verticillata* (L.) P.Beauv. Условия, при которых образуется моновидовая заросль из *Phleum pratense*, явились основанием для отбора наземной вегетативной массы этого вида и проведения ингредиентного анализа.

Специфика ранжирования элементов в минеральной части фитопроб (на примере образцов вегетативной части доминирующего в ассоциациях *Phleum pratense*) на терриконе шахты им. Калинина отражается в следующем ряду концентраций: Mn (2100) > Ba (1700) > Zn (1500) > Sr (1000) > B (310) > Rb (250) > Ti (230) > Cu (190) > Li (54,1) > Mo (40,3) > Ni (36,1) > Pb (31,5) > Cr (25,9) > Ce (20,8) > V (16,7) > Sc (11,1) > La (10,4) > Nd (9,43) > Y (5,43) > Zr (4,79) > Co (4,4) > Se (4,1) > As (2,5) > Pr (2,37) > Th (2,24) > Ga (2,2) > Ge (1,7) > Sm (1,7) > Gd (1,64) > W (1,37) > Sb (1,26) > Cs (1,11) > Dy (1,09) > Nb (1,01) > Cd (0,97) > U (0,73) > Er (0,57) > Sn (0,5) > Yb (0,47) > Be (0,4) > Bi (0,27) > Eu (0,26) > Tl (0,25) > Tb (0,22) > Ho (0,19) > Hf (0,16) > Te (0,09) > Re (0,09) > Tm (0,073) > Lu (0,07) > Ta (0,05) > Hg (0,008).

В результате сравнения данных по концентрациям было установлено, что ранжированные характеристики элементного состава растительных образцов именно для сборов на терриконе шахты им. Калинина не имеют статистических выбросов и не содержат крайне максимальных значений, поэтому приведенный ряд концентраций были использован как наглядный пример максимального соответствия биогеохимического фона на техногенных объектах горнодобывающего производства городов Донецка и Макеевки.

Для получения представления о масштабах и разбросе величин концентраций отдельных элементов были рассчитаны ряд характеристик соответствующих выборок, в частности, их медианы, первый и третий квартили, минимальное и максимальное

значение. На основании этих величин построена диаграмма размаха (боксплот) для каждого элемента. С учетом того, что масштабы величин несоизмеримы (от порядка 0.01 для Hg до порядка 1000 для Mn, Zn, Sr, Ba), на вертикальной оси использована логарифмическая шкала. По горизонтали элементы упорядочены по медианному значению (рис. 4).

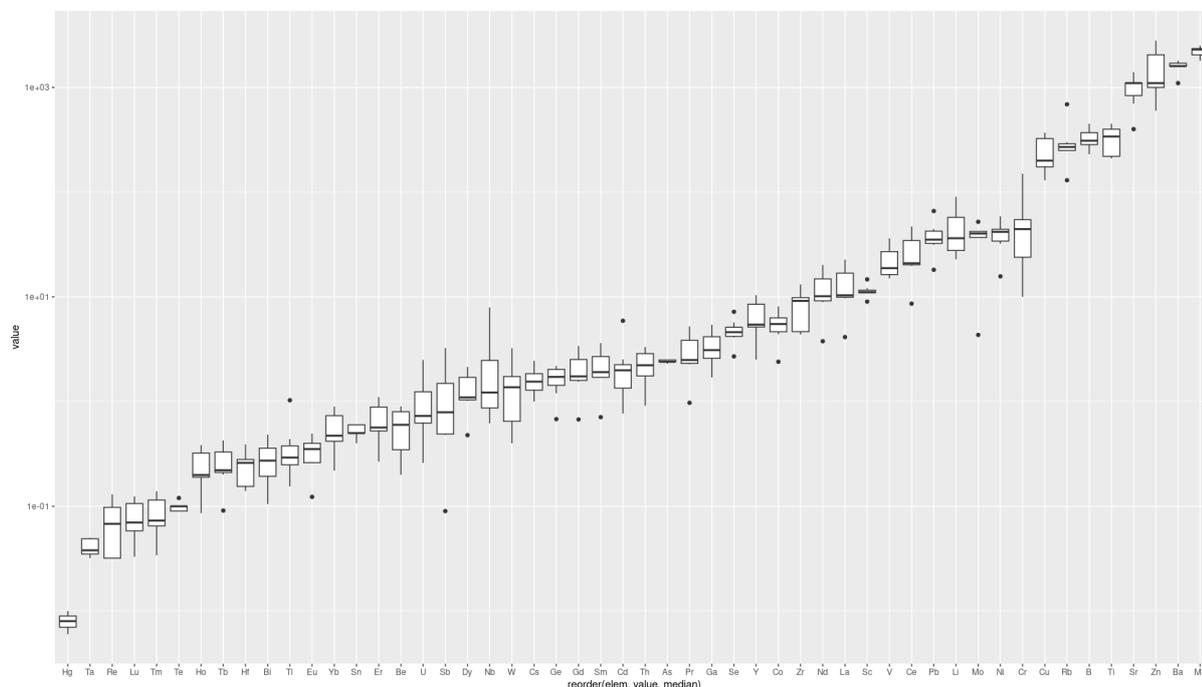


Рис. 4. Диапазоны варьирования концентраций отдельных элементов в вегетативной надземной массе *Phleum pratense* на терриконах

Порядок ранжирования медианных значений концентраций химических элементов оказывается достаточно близким к последовательности накопления, описанной выше на примере террикона шахты им. Калинина в г. Донецке.

Для установления специфики миграционных потоков и совместного поступления в растительный организм отдельных элементов и (или) групп элементов в связи с характером техногенеза выполнен расчет попарных выборочных коэффициентов корреляции между концентрациями различных химических элементов в биомассе *Phleum pratense*. Результаты расчета представлены в виде тепловой карты (рис. 5), где положительные значения отображаются синим цветом, отрицательные – красным, а насыщенность цвета соответствует абсолютной величине коэффициента корреляции. Из представленной диаграммы видно, что более чем 30 % пар элементов, имеют достаточно тесную связь между их концентрациями (коэффициент детерминации R^2 больше 0.5). Причем для большинства пар эта связь оказывается положительной, что кажется естественным, поскольку при увеличении загрязнения окружающей среды растение получает сразу несколько элементов.

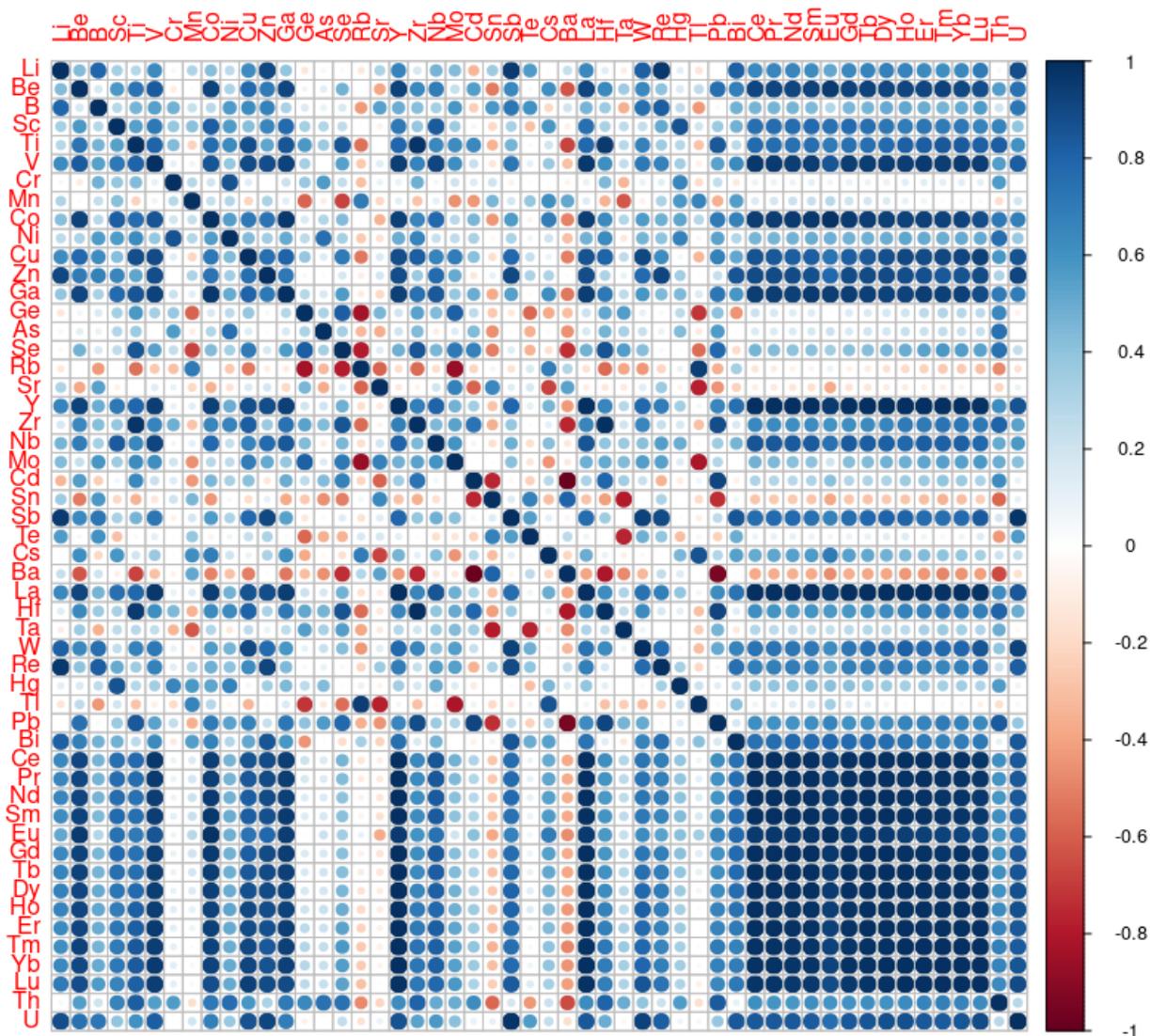


Рис. 5. Парный корреляционный анализ элементного состава *Phleum pratense* на терриконах Донбасса

В тепловой карте (рис. 5) визуально заметна большая группа элементов в конце списка, все коэффициенты корреляции между которыми почти равны 1. Таким образом, можно говорить о целом кластере элементов, которые, по-видимому, поступают в растение одновременно примерно в одних и тех же пропорциях. Для выделения других подобных групп с разными ограничениями на величину минимальной внутрикластерной корреляции выполнен иерархический кластерный анализ, где в качестве расстояния между элементами i и j использовано значение

$$d_{ij} = 1 - c_{ij},$$

где c_{ij} – коэффициент корреляции между концентрациями соответствующих элементов. Результат анализа представлен в виде дендрограммы (рис. 6).

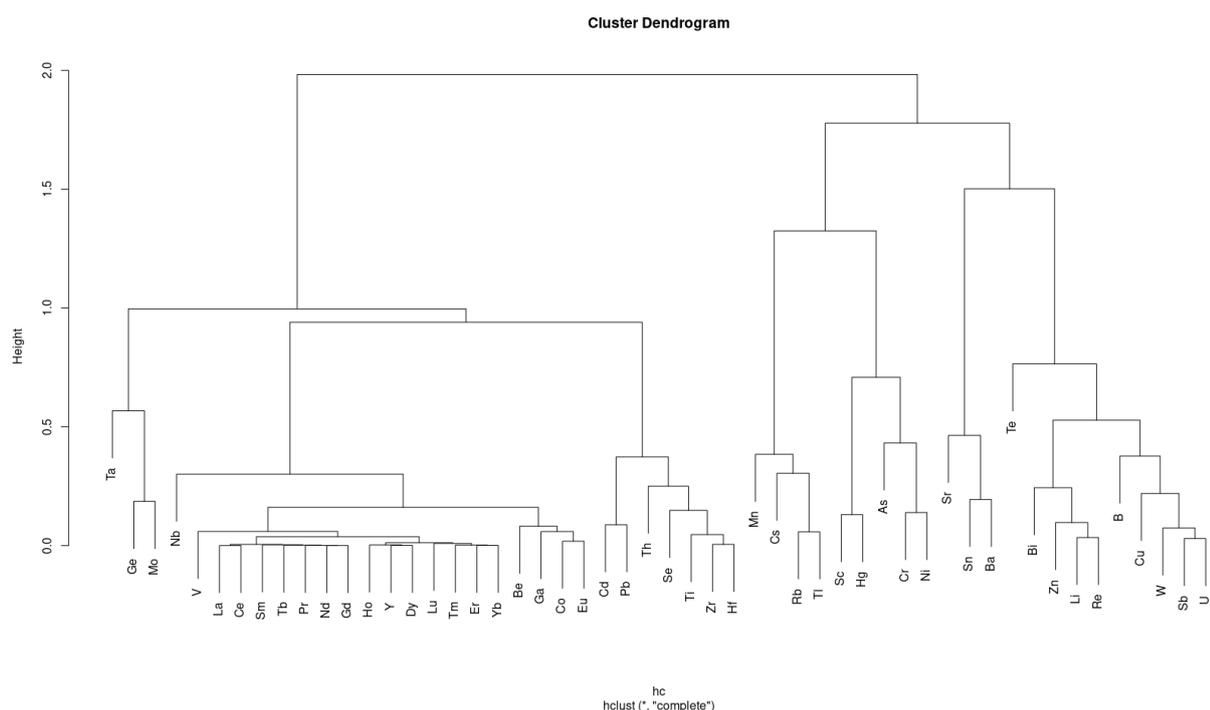


Рис. 6. Общая дендрограмма элементного состава *Phleum pratense* на терриконах Донбасса

Установлена наиболее тесная связь в группах совместного накопления элементов: лантаноиды, Zr-Hf, Co-Eu, Li-Re-(Zn), Rb-Tl, Cd-Pb, Sc-Hg, Cr-Ni, Sb-U-(W-Cu). Однако, учитывая небольшой объем исходной выборки, такие закономерности должны быть в дальнейшем дополнительно изучены при повторном пробоотборе, чтобы подтвердить или опровергнуть обозначенные тенденции.

При этом возникает необходимость более детального рассмотрения некоторых элементов по шкале реальных концентраций, поскольку ранее было установлено их индикаторное значение в эколого-ботаническом аспекте токсикологического мониторинга Донбасса [27–31, 40].

В группе элементов Li, Cr, Ni, Mo, Pb и Ce, имеющих сопоставимый масштаб величин концентрации, наибольший размах по значениям характерен для Cr и Li, самыми консервативными являются Ni и Mo, если исключить выбросы, что требует дополнительного анализа при проведении повторного эксперимента. Наличие единичных примеров резкого отклонения значения от среднего арифметического по всем техногенным объектам формирует специфику геохимического профиля терриконов. Так, для террикона ш. Запореваляная приоритетными загрязнителями, включенными в биогеохимические циклы, являются Cu, Zn, W, Cd и U; для ш. № 6/14 Берестовская – Mn, Rb и Tl; ш. № 1-1 бис – Cs; ш. Центрально-Заводская – Co, Zn, Y, Nd, Mo, La, Ce, Nd, Sm и Dy; ш. Горького – Zr, Cd, Pb и Th; ш. Свято-Серафимовская – Cr и Ni (в системе сравнения полученных данных по семи объектам техногенного происхождения). Составление матриц диаграмм рассеяния (рис. 7, Б) имеет принципиальное значение в поиске нелинейных зависимостей в парах анализируемых элементов. Наиболее перспективными для детального изучения являются группы зависимостей при совместном накоплении Cr и Ni как синергетиков (рис. 7), а в парах Cd-Ba и Ba-Pb (рис. 5) как пример антагонистов в физиологических процессах при неблагоприятных условиях произрастания.

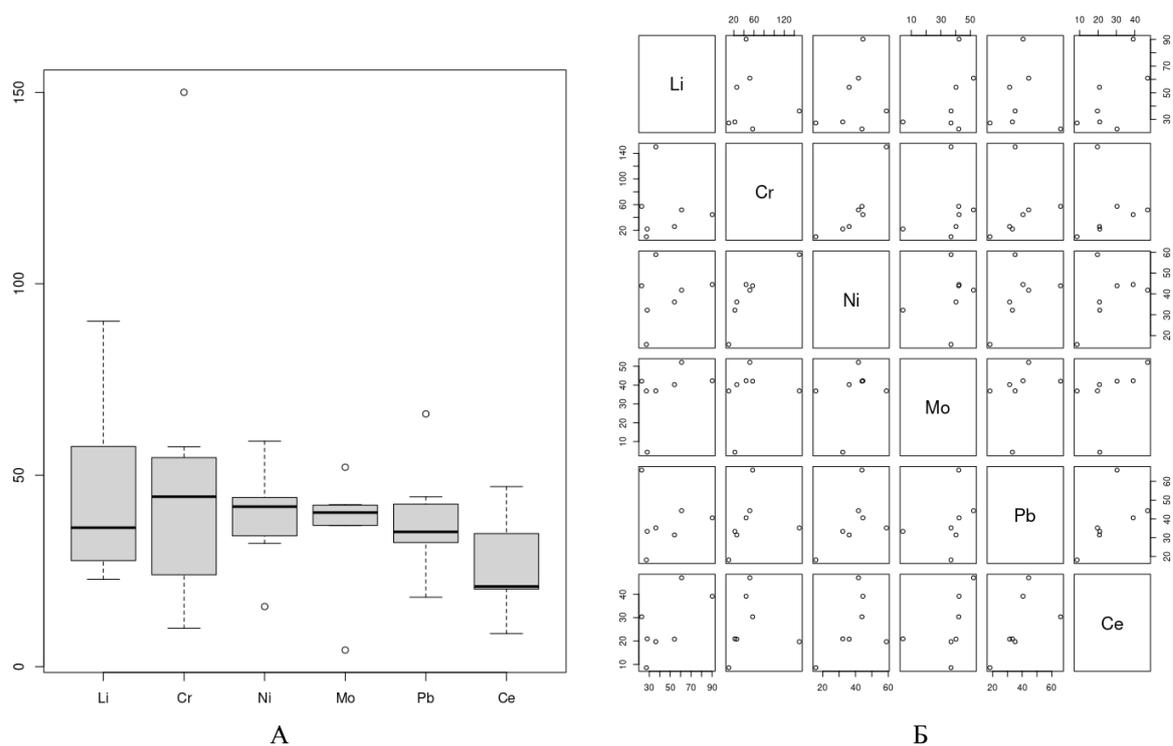


Рис. 7. Боксплоты концентраций отдельных технофильных элементов в *Phleum pratense* на терриконах (А) и матрицы диаграмм рассеяния этих элементов (Б)

Для исследования геохимической сопряженности изучаемых терриконов также использованы корреляционный и кластерный анализ (рис. 8).

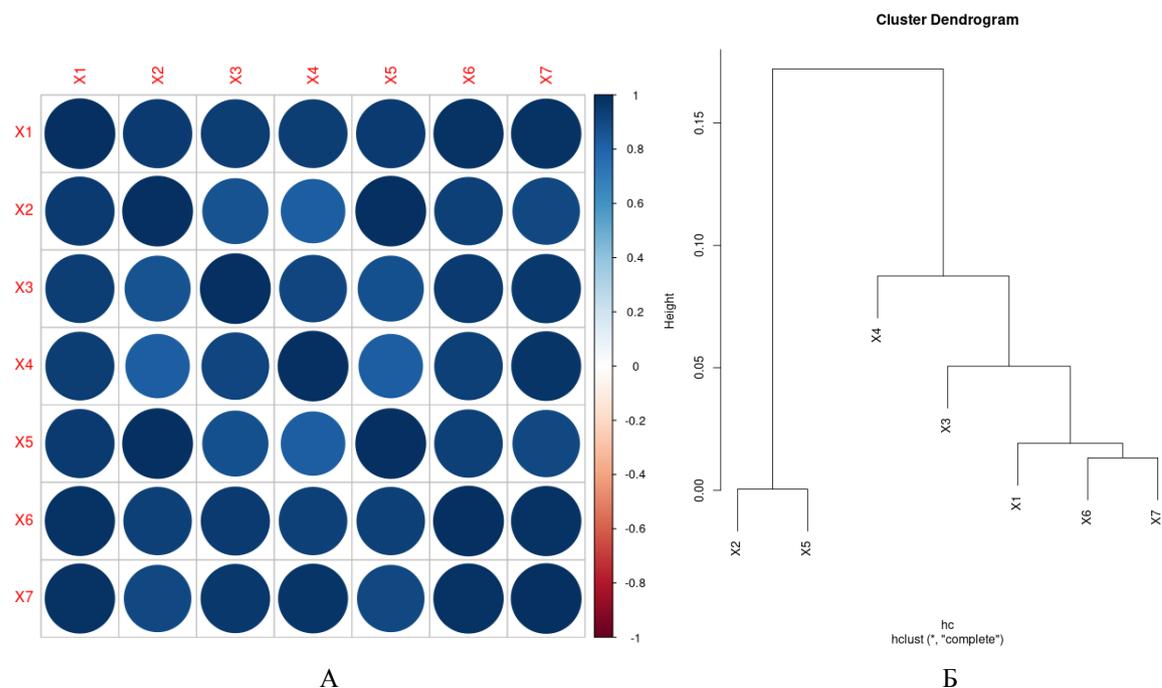


Рис. 8. Сравнительные корреляты между ингредиентными характеристиками терриконов Донбасса: А – при парном корреляционном сравнении массивов данных, Б – в кластерной диаграмме общих связей по концентрациям химических элементов в растениях-доминантах

В работах [28–30, 40–42] для анализа данных по ингредиентному составу мохообразных в Донбассе успешно использовался метод главных компонент. В настоящей работе данный подход применен для выявления наиболее информативных линейных комбинаций нормализованных концентраций различных химических элементов на терриконах (рис. 9).

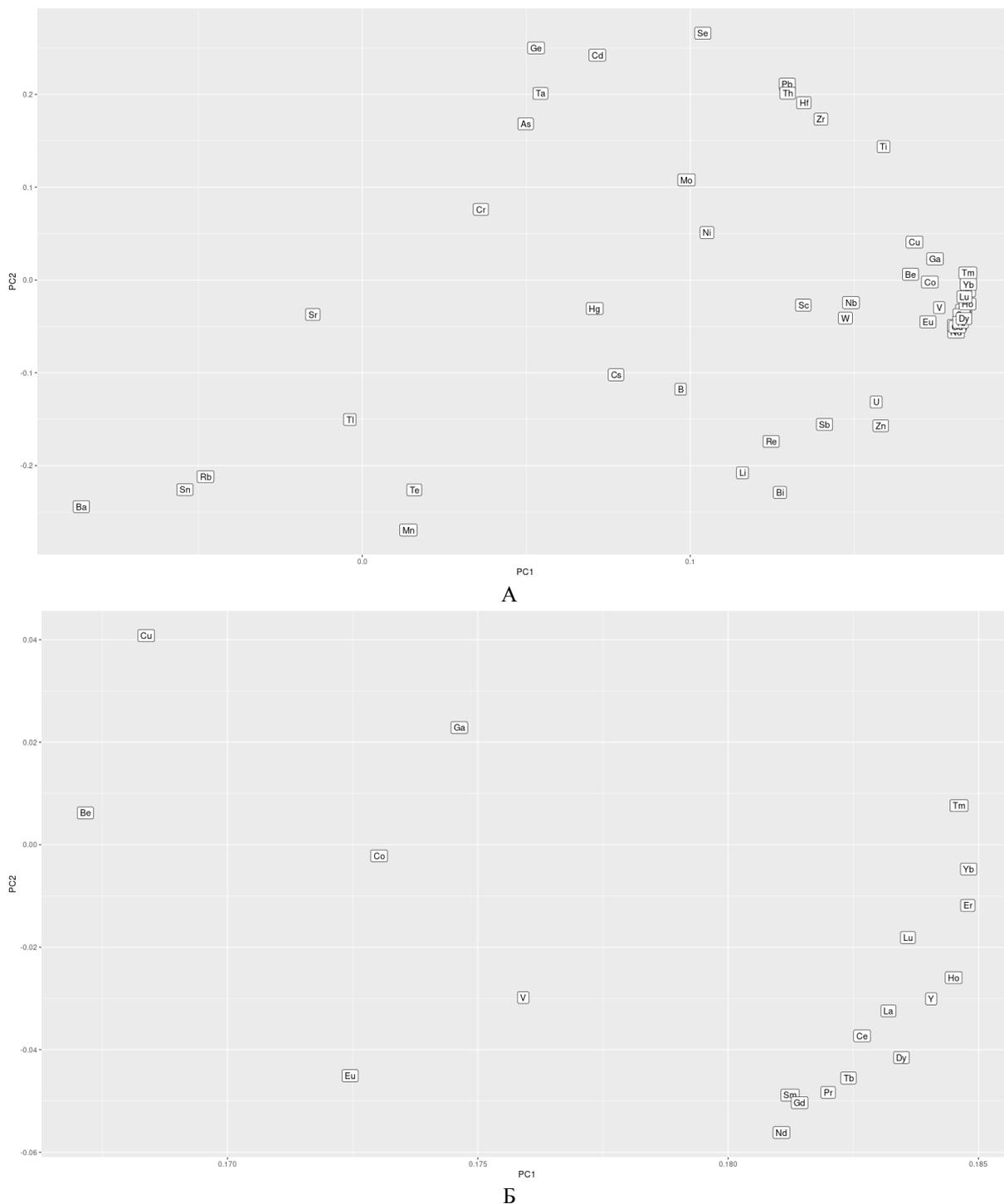


Рис. 9. Направления увеличения концентраций элементов в плоскости двух главных компонент (А) и детализация наиболее плотно заполненного фрагмента (Б)

Для всех элементов рассчитаны весовые коэффициенты, определяющие величину их вклада в первые две главные компоненты. Результаты расчета представлены на рис. 9А, где каждая метка определяет проекцию конца базисного вектора, соответствующего некоторому элементу в пространстве нормализованных концентраций, на плоскость двух главных компонент. В представленном масштабе на правой части диаграммы значительное число меток накладывается друг на друга. Для большей наглядности и исключения эффектов наложения на рис. 9Б более детально показана область $0.165 \leq PC1 \leq 0.185$, $-0.06 \leq PC2 \leq 0.04$.

Общая закономерность иметь единый геохимический профиль для всех изучаемых терриконов подчеркивает соответствие единой системе антропогенеза в регионе, поскольку рассматриваются характеристики одной программы индустриального производства – горнодобывающего комплекса.

Наиболее плотная корреляция установлена в парах центральных заводских районов и шахт восточных микрорайонов г. Донецка на границе с г. Макеевкой. Получить историческую справку об источниках породы при формировании конкретного террикона в Донецкой Народной Республике в период ведения военных действий не представляется возможным, поэтому для сравнительного анализа метод фитогеохимического мониторинга на современном этапе остается единственной технологией опосредованной идентификации процессов техногенеза в Донбассе.

Поскольку изучаемые природно-антропогенные комплексы не являются частью продовольственной программы и миграционные потоки в системе «технозёмы – растительный организм» не вовлечены в контролируемую систему аграрных технологий, то рассматривать вопросы с точки зрения соответствия полученных данных для отдельных элементов по предельно-допустимым концентрациям не представляется целесообразным. Однако, сам процесс вовлечения особо токсичных элементов из агрессивной среды в растительные организмы, безусловно, является важным при анализе эффективности фиторемедиационных и рекультивационных работ, которые должны быть частью проводимых способов оптимизации и восстановления нарушенного баланса в экосистемах.

Проведенный эксперимент рассматривается как первичный анализ сведений о фитогеохимических особенностях терриконов в Донбассе. Благодаря этим данным, определены группы химических элементов, объединенных совместными миграционными и накопительными процессами в растительном организме, характеризующимся высоким уровнем толерантности к сложившимся условиям произрастания и образующим моновидовые заросли, что было важно для чистоты опыта.

Дальнейший интерес в рамках фитоцентрических наблюдений за устойчивыми субпопуляциями аборигенных видов растений может быть реализован с точки зрения установления анатомо-морфологических эффектов и физиологических процессов, обуславливающих широкую экологическую амплитуду и высокий адаптационный потенциал растений в условиях хронического фактора техногенеза и полемостресса в регионе. Также заслуживает внимания задача установления сопряженных процессов в реализации растениями разных типов стратегий выживания и возможных связей этого фундаментального процесса с отдельными химическими элементами или группами элементов в экологически неблагоприятных условиях реализации жизни.

Выводы.

1. Терриконы Донбасса, рассмотренные на модельных примерах, по биогеохимическим (как начальное звено миграции – фитохимическим) характеристикам являются неотъемлемой частью антропогенно трансформированного

ландшафта как отвалы угольных шахт, имеющих специфический ингредиентный состав (установлен для 52 химических элементов), формирующий предпосылки токсического импакта на природные среды.

2. Установить фитогеохимический профиль каждого террикона и провести сравнительный анализ между ними становится возможным при отборе растительного сырья в соответствии с принципами ботанико-экологического мониторинга, использования современного метода химико-аналитического контроля (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) и разных способов статистической обработки данных, позволяющих визуализировать специфику и закономерности взаимодействий как совместного накопления отдельных элементов, так и территориальных отличий в анализе этого процесса.

3. С точки зрения ботанико-токсикологической экспертизы наибольший интерес для последующих геохимических изысканий в местах влияния терриконов на окружающую среду представляют группы элементов: Li-Re-(Zn), Sb-U-(W-Cu), Cd-Pb, Co-Eu, La-Ce-Sm-Tb-Pr-Nd-Gd и Ho-Y-Dy-Lu-Tm-Er-Yb, Zr-Hf, Rb-Tl, Zr-Hf, Sc-Hg, Cr-Ni. При детальном изучении это указывает на наличие потенциальных геохимических аномалий в условиях техногенных ландшафтов и требует повторного аналитического контроля.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность ведущему научному сотруднику, доктору биологических наук, профессору ГЕОХИ РАН *Вадиму Викторовичу Ермакову* за помощь в разработке идеологии эксперимента и инициирование актуальных биогеохимических разработок в Донбассе, учредителю автономной неправительственной организации «Центр Ноосистема» (г. Москва), члену Русского географического общества *Антону Юрьевичу Хлынову* за содействие экспериментам и успешную транспортировку образцов для анализа, научному сотруднику ГЕОХИ РАН *Валентине Николаевне Даниловой* за подготовку растительных образцов к анализу, студенту ДонГУ *Роману Андреевичу Сафонову* за помощь в осуществлении отбора проб и разработки безопасного маршрута при реализации первичной части эксперимента.

Исследование выполнено в рамках работы Азово-Черноморского математического центра (соглашение от 29 февраля 2024 г. № 075-02-2024-1446), молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (регистрационный номер: 124051400023-4), а также инициативной темы кафедры ботаники и экологии ДонГУ «Ботаника антропогенеза: индикация и оптимизация».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История зарождения и развития горного дела / С.М. Попов, В.И. Ефимов, А.В. Мясков, А.А. Рожков. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2021. – 326 с. – ISBN 978-5-6042752-6-9. – EDN ZYMVAD.
2. Особенности формирования техногенных отложений в районах добычи и переработки полезных ископаемых / А.И. Павловский, А. Н. Галкин, О. В. Шершнев [и др.] // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий. – Минск: Белорусский государственный университет, 2021. – С. 127–133. – EDN CIVGUV.
3. Петкогло О.В. Ретроспективный анализ интерьерной и ландшафтной фитооптимизации промышленной среды (к 100-летию профессора М.Л. Ревы) // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2022. – № 3. – С. 72–79. – EDN GTDLEL.
4. Колесников С.И. Сравнительная оценка экотоксичности химических элементов // Почвы и окружающая среда. – Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 635–637. – EDN HBTZNV.

5. Ecotoxicity of dust from different functional zones of Moscow / O.V. Nikolaeva, S.A. Kulachkova, A.A. Astaykina [et al.] // *Eurasian Soil Science*. – 2024. – Vol. 57, No. 2. – P. 337–348. – DOI 10.1134/S1064229323602779. – EDN WIPNSE.
6. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах / Н.С. Касимов, М.Ю. Лычагин, С.Р. Чалов, Г.Л. Шинкарева // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. – 2019. – № 6. – С. 20–28. – EDN XGCNJD.
7. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. Биогеохимическая индикация микроэлементов. – Москва: РАН, 2018. – 386 с. – ISBN 978-5-906906-91-5. – EDN YNHZUT.
8. Урбоэкодиагностика промышленных городов Центрального Черноземья / С.А. Куролап, О.В. Клепиков, Т.И. Прожорина [и др.]. – Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. – 255 с. – ISBN 978-5-907669-06-2. – EDN HEQQGA.
9. Результаты контроля радона в жилых домах вблизи разработки Шкурлатовского месторождения гранита / О.В. Клепиков, Ю.И. Степкин, С.А. Епринцев, М.К. Кузмичев // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. – 2024. – Т. 33, № 1. – С. 84–96. – DOI 10.21870/0131-3878-2024-33-1-84-96. – EDN WRCBOY.
10. Remote monitoring of factors determining the environmental safety of urban areas / S. Yeprintsev, S. Kurolap, O. Klepikov, P. Vinogradov // *E3S Web of Conferences*. – Vol. 389. EDP Sciences, 2023. – P. 03030. – DOI 10.1051/e3sconf/202338903030. – EDN WPFKSG.
11. Назаренко Н.Н., Долгонос К.А. Естественное формирование растительного покрова на отвалах добычи каменных углей в окрестностях г. Копейска (Челябинская область) // *Самарский научный вестник*. – 2023. – Т. 12, № 4. – С. 71–77. – DOI 10.55355/snv2023124110. – EDN DVFGBW.
12. Плотников И.В. Тяжелые металлы в зеленой массе кустарников южных тундр полуострова Ямал // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. – 2024. – № 1. – С. 128–134. – DOI 10.17308/geo/1609-0683/2024/1/128-134. – EDN KFSGSU.
13. Шихова Н.С. Биогеохимические критерии оценки экологической эффективности видов в городском озеленении // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2022. – № 2(222). – С. 17–36. – DOI 10.37102/0869-7698_2022_222_02_2. – EDN VRPJFM.
14. Biogeochemistry of impact regions: the role of edaphic and phytocoenotic environmental factors / V.S. Bezel', T.V. Zhuikova, V.A. Gordeeva, E.V. Goloushkina // *Geochemistry International*. – 2020. – Vol. 58, No. 10. – P. 1135–1144. – DOI 10.1134/S0016702920100043. – EDN TVCIVB.
15. Гермонова Е.А. Геоинформационная визуализация данных по атипичному морфогенезу растений экотопов Донбасса // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. – 2023. – № 1-2. – С. 13–22. – EDN QECLTU.
16. Ермаков В.В. Современное развитие биогеохимических идей В.И. Вернадского // *Геохимия*. – 2023. – Т. 68, № 10. – С. 995–1008. – DOI 10.31857/S0016752523100047. – EDN YHRINA.
17. Characteristics of the accumulation of metals by plants and the activity of soil enzymes in metallogenic territories of the Northern Caucasus / V.V. Ermakov, S.F. Tyutikov, A.P. Degtyaryov [et al.] // *Geochemistry International*. – 2022. – Vol. 60, No. 8. – P. 772–778. – DOI 10.1134/s0016702922070023. – EDN HCOKUZ.
18. Geochemistry of plant-soil-permafrost system on landslide-affected slopes, Yamal, Russia as an indicator of landslide age / N. Ukraintseva, M. Leibman, T. Mikhaylova, I. Streletskaya // *Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)*. – 2014. – P. 107-131. – DOI 10.1007/978-3-319-00867-7_9. – EDN SREFMY.
19. Characteristics and prospecting significance of the phytogeochemistry in Duobaoshan copper metallogenic field, Daxing'anling area, NE China / D. Jia, T. Jiang, S. Chen [et al.] // *Jilin Daxue Xuebao (Diqu Kexue Ban)*. – 2013. – Vol. 43, No. 1. – P. 76–86. – EDN PZPLML.
20. Assessment of sources, environmental, ecological, and health risks of potentially toxic elements in urban dust of Moscow megacity, Russia / A.I. Ivaneev, A.S. Brzhezinskiy, V.K. Karandashev [et al.] // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 321. – P. 138142. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2023.138142. – EDN COGYBT.
21. Jovanović L., Ermakov V.V., Ostroumov S.A. The role of green economy transition in green growth and environmental protection (2nd International thematic monograph). – Academic editions Belgrade, Serbia, 2023. – 277 p.
22. Фрунзе О.В. Сорбционная способность декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома // *Экосистемы*. – 2023. – № 33. – С. 152–159. – EDN DMWIJH.
23. Корниенко В.О. Ретроспективный анализ антропогенного загрязнения города Донецка. Вибрационно-акустическое шумление // *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки*. – 2024. – № 1. – С. 93–100. – DOI 10.5281/zenodo.12532574. – EDN TSWEOL.

24. Korniyenko V.O., Kalaev V.N. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees in the city of Donetsk // Contemporary Problems of Ecology. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – P. 806-816. – DOI 10.1134/s1995425522070150. – EDN EUVZMY.
25. Калинина А.В., Жуков С.П. Терриконы Донбасса как объект экологического туризма // Экологические проблемы использования горных лесов. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2023. – С. 204–208. – EDN UBEYUX.
26. Сафонов А.И. Ландшафтно-индикационные разработки как элемент оптимизации техногенных экотопов (к 100-летию профессора М.Л. Ревы) // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2022. – № 3–4. – С. 7–15. – EDN UALPJJ.
27. Алемасова А.С., Сафонов А.И. Тяжелые металлы в фитосубстратах – индикаторы антропогенного загрязнения воздуха в промышленном регионе // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 5–13. – DOI 10.18698/2542-1468-2022-6-5-13. – EDN XRXDNV.
28. Морфогенетические аномалии бриобионтов в условиях геохимически контрастной среды Донбасса / А.И. Сафонов, А.С. Алемасова, И.И. Зиньковская [и др.] // Геохимия. – 2023. – Т. 68, № 10. – С. 1032–1044. – DOI 10.31857/S0016752523100114. – EDN NURQVW.
29. Neutron activation analysis of rare earth elements (Sc, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb) in the diagnosis of ecosystems of Donbass / I. Zinicovscaia, A. Safonov, A. Kravtsova [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Vol. 21, No. 2. – P. 186–200. – DOI 10.1134/S1547477124020158. – EDN XTYWUI.
30. *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid в оценке техногенного загрязнения (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, Sm) трансформированных экотопов Донбасса / И.И. Зиньковская, К.Н. Вергель, А.И. Сафонов [и др.] // Трансформация экосистем. – 2023. – Т. 6, № 3(21). – С. 22–38. – DOI 10.23859/estr-220726. – EDN GHVAZY.
31. Dogadkin D., Safonov A., Danilova V., Degtyarev A. Biogeochemical monitoring of terricones of Central Donbass, screening of 2023 // International Scientific Conference Green economy and adaptation of industry to climate changes. – 22-24 April 2024. – Beograd: Naučno-stručno društvo za zaštitu životne sredine Srbije Ecologica. (Zemun: Akademska izdanja), 2024. – P. 52.
32. Патент № 2794761 С1 РФ, МПК G01N 33/24. Способ диагностики техногенного загрязнения почвогрунтов металлами, преимущественно Мо и W: № 2022119770: заявл. 19.07.2022; опубл. 24.04.2023 / В.В. Ермаков, С.Ф. Тютиков, В.Н. Данилова; заявитель ГЕОХИ РАН. – EDN ZFNNTN.
33. Тютиков С.Ф., Ермаков В.В., Данилов В.Н. Способ выявления техногенной составляющей загрязнения почвогрунтов молибденом и вольфрамом // Почвы и окружающая среда. – Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2023. – С. 687–690. – EDN HLGVBQK.
34. Zhuykova T.V., Meling E.V., Bezel V.S. Dynamics of alpha diversity during the restoration succession of grass communities of fallow lands and pits // Russian Journal of Ecology. – 2022. – Vol. 53, No. 3. – P. 158–168. – DOI 10.1134/S1067413622030134. – EDN RGMOMB.
35. Mosses as a biomonitor to identify elements released into the air as a result of car workshop activities / P. Świsłowski, K. Vergel, I. Zinicovscaia [et al.] // Ecological Indicators. – 2022. – Vol. 138. – P. 108849. – DOI 10.1016/j.ecolind.2022.108849. – EDN HSWJSL.
36. Moss as a biomonitor to identify atmospheric deposition of minor and trace elements in Macedonia / R. Šajn, K. Bačeva Andonovska, T. Stafilov, L. Barandovski // Atmosphere. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – P. 297. – DOI 10.3390/atmos15030297. – EDN VPZHUE.
37. Выбор внутреннего стандарта при анализе методом МС-ИСП растений и почв в местах добычи полиметаллических руд / Д.Н. Догадкин, И.Н. Громьяк, Ф.В. Голубев [и др.] // IV Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2023. – С. 115. – EDN NMDAIL.
38. Анализ биологических образцов малой массы методом МС-ИСП с использованием кислотного микроволнового разложения нескольких образцов в общей атмосфере стандартного автоклава / В.П. Колотов, Д.Н. Догадкин, В.Е. Зайчик [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2023. – Т. 78, № 3. – С. 216–222. – DOI 10.31857/S0044450223030064. – EDN FUIMUN.
39. Kolotov V.P., Zhilkina A.V., Khludneva A.O. iPlasmaProQuad: A computer system based on a relational DBMS for processing and monitoring the results of routine analysis by the ICP-MS method / Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences: Special Publication commemorating the 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS / Eds. V.P. Kolotov, N.S. Bezaeva. – Springer. – 2023. – P. 555–562. – DOI 10.1007/978-3-031-09883-3_1
40. Зиньковская И.И., Сафонов А.И., Юшин Н.С., Неспирный В.Н., Гермонова Е.А. Ингредиентный фитомониторинг в Донбассе для идентификации новых геохимических аномалий // Экологическая химия. – 2024. – 33(1). – С. 19–32.

41. Неспирный В.Н., Сафонов А.И. Алгоритм восстановления пропущенных данных в выборке фитоиндикационного мониторинга с использованием метода главных компонент // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 1. – С. 15–26.
42. Неспирный В. Н., Сафонов А.И. Метод главных компонент в экологической диагностике Донбасса // Актуальные проблемы экологии и природопользования. – М.: РУДН, 2024. – Т. 1. – С. 391–396.

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

PHYTOGEOCHEMICAL FEATURES OF SOME COAL MINE DAMPS IN THE DONBASS

A. I. Safonov, D. N. Dogadkin, V. N. Nespirnyi

Using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the features of the accumulation of 52 chemical elements in the tissues of the dominant plant in associations on the northeastern exposures of seven waste heaps in the Donetsk-Makeevka industrial agglomeration were established. *Phleum pratense* L. was used as a phytomarker of the anthropotolerance system under conditions of industrial stress and as a species that forms stable population structures for the purposes of phytoremediation of disturbed habitats. Using the obtained data sample, the empirical distribution of concentration for each element was found. Sample correlation coefficients were calculated for each pair of chemical elements and for each pair of waste heaps. These coefficients were used as distances when performing the hierarchical cluster analysis. The principal components in the normalized concentration space were constructed and the weight vectors for all elements were determined. As a result of the statistical analysis, the closest connection was established in the groups of joint accumulation of elements: lanthanides, Zr-Hf, Co-Eu, Li-Re-(Zn), Rb-Tl, Cd-Pb, Sc-Hg, Cr-Ni, Sb-U-(W-Cu).

Keywords: biogeochemistry, analytical control, ingredient composition, Donbass, Donetsk, phytomarker, coal mine dumps, waste heaps.

Сафонов Андрей Иванович

кандидат биологических наук, доцент;
заведующий кафедрой ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: andrey_safonov@mail.ru

Safonov Andrey

candidate of biological sciences, docent;
head of the department of Botany and Ecology,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Догадкин Денис Николаевич

кандидат химических наук,
научный сотрудник лаборатории методов
исследования и анализа веществ и материалов
ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН», г. Москва, РФ.
E-mail: denisnd@mail.ru

Dogadkin Denis

candidate of chemistry sciences,
Researcher, Laboratory of Methods for Research
and Analysis of Substances and Materials
Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical
Chemistry, RAS, Moscow, RF.

Неспирный Виталий Николаевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник;
заведующий отделом информационных технологий
в экономических исследованиях,
ГБУ «Институт экономических исследований»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: vetal_n@mail.ru

Nespirnyi Vitalii

candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
head of the Department of Information Technology
in Economic Research,
Economic Research Institute, Donetsk, DPR, RF.

**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ
МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА И БРЫЖЕЕЧНЫХ АРТЕРИЙ
У САМЦОВ КРЫС ЛИНИИ SHR И WISTAR KYOTO
ПРИ ИНДУЦИРОВАНИИ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО СИНДРОМА
ФРУКТОЗНОЙ ДИЕТОЙ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗВИТИЯ**

© 2024. *И.А. Царева, Г.Т. Иванова, Г.И. Лобов*

В нашем исследовании изучены ранние функциональные изменения в сосудах микроциркуляторного русла и брыжеечных артериях у крыс линии SHR и Wistar Kyoto (WK) при моделировании метаболического синдрома (МС) фруктозной нагрузкой в питьевой воде. У диетных крыс выявлены: артериальная гипертензия (АГ), повышение уровня гликемии натощак, дислипидемия, сопровождающаяся повышением концентрации триглицеридов (ТГ), увеличение уровня общего холестерина (ХС), увеличение концентрации холестерина липопротеинов низкой плотности (ХС-ЛПНП), увеличение концентрации мочевой кислоты (МК). Стоит отметить, что уровень систолического (САД) и диастолического давления (ДАД) был достоверно выше у крыс линии SHRFr (крысы SHR, получавшие фруктозу). У всех крыс, получавших фруктозу, наблюдается снижение показателя микроциркуляции (ПМ) в сосудах микроциркуляторного русла (МЦР). Применение ионофореза, для неинвазивного введения ацетилхолина (АХ) и нитропрусида натрия (НП) в кожу спины животных, выявило снижение ПМ у всех групп животных, получавших фруктозную нагрузку. У крыс SHRFr, по сравнению с линией WKFr (крысы Wistar Kyoto, получавшие фруктозу), отмечено наибольшее снижение данного показателя. Отмечено нарушение эндотелийзависимой и эндотелийнезависимой регуляция микроциркуляторного кровотока, что свидетельствует об ослаблении продукции (биодоступности) эндотелиального NO и нарушении сигнального пути NO-цГМФ в гладкомышечных клетках сосудов МЦР. Выявлено снижение амплитуды АХ- и НП-индуцированной дилатации брыжеечных артерий у групп, получавших фруктозу, наибольшее снижение отмечено у SHRFr группы животных. В брыжеечных артериях крыс, получавших фруктозу, сократительная реакция на фенилэфрин (ФЭ) была повышена, что может свидетельствовать об увеличении плотности α -адренергических рецепторов на мембране артериальных гладкомышечных клеток (ГМК) или стимуляции сигнальных путей, активируемых α -адренергическими рецепторами в ГМК. Результаты исследования демонстрируют, что потребление 20 % раствора фруктозы, на ранних этапах развития, приводит к развитию признаков МС у крыс.

Ключевые слова: метаболический синдром; артерии; микроциркуляторное русло; эндотелий; лазерная доплеровская флоуметрия; фруктозная диета.

Клинически, МС включает в себя группу кардио-метаболических нарушений. Диагноз метаболического синдрома предполагает положительные результаты по следующим показателям: инсулинорезистентность (ИР), гипергликемия, АГ, ожирение, атерогенная дислипидемия. Данные факторы риска, действуя совместно, являются «ядром» МС и ускоряют развитие сердечно-сосудистых заболеваний [1].

Использование животных в эксперименте значимо для медицинских исследований, т.к. имеет следующие преимущества: дает возможность получить данные о функциональных, регуляторных, биохимических и морфологических изменениях в организме при индуцировании того или иного патологического состояния [2], в нашем исследовании – МС. Что при исследовании на человеке может быть затруднительно, или, в большинстве случаев – невозможно.

В поисках адекватной модели МС человека в ряде исследований были проанализированы метаболические характеристики крыс линии Wistar после применения разных вариантов фруктозной диеты [3]. Другие авторы использовали в

исследованиях крыс линии SHR – крысы со спонтанной гипертензией [4]. Где было отмечено, что индуцированная фруктозой АГ переменчива и зависит от длительности диеты и концентрации фруктозы в рационе животных [5]. Крысы линии SHR являются наиболее широко используемой животной моделью эссенциальной гипертензии и связанных с ней метаболических нарушений. В линии SHR «отображены» многочисленные локусы количественных признаков, связанные с гемодинамическими и метаболическими показателями [6].

Инбредные штаммы крыс Wistar Kyoto и SHR являются хорошо зарекомендовавшими себя моделями для исследований МС и расширяют возможности данных исследований, повышая их научную ценность [7].

Актуальность данных исследований неоспорима, так как в последнее время весьма ощутима тенденция к распространенности предгипертензии и артериальной гипертензии в более молодом возрасте, а именно у детей и подростков [8].

Стоит отметить, что в настоящее время растет не только численность взрослого населения с подтвержденным диагнозом – МС [8, 9], но и среди детей и подростков этот недуг выходит на лидирующие позиции [10]. Постепенно повышающееся артериальное давление, начиная с детского возраста, вероятнее всего, приведет к сердечно-сосудистой патологии во взрослом состоянии [11, 12]. Отметим, что до настоящего времени причины роста распространенности повышенного артериального давления в молодом возрасте полностью не изучены, и спорными остаются многие вопросы. Но доминирует мнение, что диетические привычки в молодом возрасте связаны с началом, тяжестью, прогрессированием и дальнейшим прогнозом приобретенной АГ [13]. Установлено, что потребление фруктозы коррелирует с избыточным весом, ИР, накоплением липидов в клетках печени и гипертриглицеридемией [14].

Чрезмерное потребление фруктозы, распространенного подсластителя в напитках и десертах, продемонстрировано в ряде клинических исследований, где отмечается, что ежедневный дополнительный прием фруктозы в течение 2 недель у здоровых взрослых мужчин приводил к повышению АД, синхронизированному с повышением уровня инсулина в крови натощак, индекса оценки модели гомеостаза (НОМА) и уровня ТГ в крови [15, 16]. Более того, АГ, индуцированную фруктозой, связывают с aberrантной регуляцией симпатической активности, включая увеличение частоты сердечных сокращений, силы сердечного выброса, устойчивости повышенного артериального давления и снижения чувствительности кардиовагального барорефлекса, [12, 17]. Кроме того, опосредованная фруктозой гиперактивность симпатической системы способствует развитию АГ, есть данные свидетельствующие о том, что чрезмерное потребление фруктозы в повседневной жизни может являться причиной повышения АД за счет «перегрузки» симпатической нервной системы уже в молодом возрасте [18].

В то же время хорошо известно, что и генетические факторы определяют начало и развитие АГ. Наследственность объясняет примерно 30–60 % распространенности эссенциальной гипертензии в различных популяциях [19, 20]. Наследственные гены, в этиологии АГ, связаны с патологическими путями МС и гиперактивностью симпатической нервной системой. Учитывая несколько общих факторов риска, влияет ли потребление высокофруктозной диеты на развитие наследственной АГ, в настоящее время достоверно неизвестно и требует дальнейшего внимательного изучения [21, 22].

Учитывая популяционный рост и ранние проявления МС у детей и подростков, целью данной работы было исследование ранних функциональных изменений в

сосудах микроциркуляторного русла и артериях брыжейки самцов крыс линии Wistar Kyoto и SHR при индуцировании МС фруктозной нагрузкой.

Методы исследования. Крысы были получены из Центра «Биоколлекция» Института физиологии им. И.П. Павлова РАН. 40 самцов линии Wistar Kyoto и SHR в возрасте 4 недель были разделены на 4 группы: Wistar Kyoto Control (WKC) – получали обычную питьевую воду на протяжении 16 недель; Wistar Kyoto Fructose (WKFr) – получали 20 % раствор фруктозы вместо питьевой воды на протяжении 16 недель; SHR Control (SHRC) – получали обычную питьевую воду на протяжении 16 недель; SHR fructose (SHRFr) – получали 20 % раствор фруктозы вместо питьевой воды на протяжении 16 недель. Крысы имели свободный доступ к пище и воде/раствору фруктозы.

Животных содержали в стандартной клетке по 5 штук, при температуре 20–22 °С и световом режиме 12 ч свет / 12 ч темнота. На протяжении 16 недель один раз в месяц измеряли уровень глюкозы в плазме натошак следующим образом: после 12-ти часового голодания, под местной анестезией (крем EMLA; 2.5 % лидокаин, 2.5 % прилокаин, Швеция) у животного надрезали скальпелем кончик хвоста, каплю крови помещали на тестовую полоску глюкометра Accu Chek Active (Германия) и считывали результат.

На 16-й неделе исследования проводили тесты на толерантность к глюкозе (ГТТ) и инсулинорезистентность (ИР). ГТТ проводили по следующей схеме: После 12-часового голодания измеряли концентрацию глюкозы в крови вышеуказанным способом. Затем животным внутривенно вводили 40 % раствор глюкозы из расчета 2 г глюкозы/кг массы и через 30, 45, 60, 90, 120 и 240 минут забирали кровь для исследования уровня глюкозы. По окончании теста животные получали доступ к пище и воде/раствору фруктозы. Тест на ИР проводили по следующей схеме: после 3-часового голодания измеряли базальную концентрацию глюкозы, затем внутривенно вводили инсулин (Инсуман Рапид ГТ, Sanofi Aventis, Germany) в дозе 0.75 Ед/кг массы. Через 15, 30, 45, 60, 90, 120 и 180 минут с момента введения инсулина проводили измерение уровня глюкозы в крови. По окончании теста животные получали доступ к пище и воде/раствору фруктозы.

Артериальное давление (АД) у бодрствующих крыс измеряли манжеточным методом на хвосте, используя систему «Систола» («Нейроботикс», РФ). Предварительно, на протяжении недели, с целью адаптации, ежедневно, крыс на 10 минут помещали в камеру для измерения АД. Для получения итогового значения для каждой крысы выполняли 3 замера АД и рассчитывали среднее значение.

В конце 16-й недели измеряли и оценивали кровоток в микроциркуляторном русле (МЦР) кожи спины методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью анализатора «ЛАКК-ОП» (НПП «Лазма», Россия). Датчик помещали на предварительно побритую кожу спины наркотизированных крыс (20 мг/кг золетил (Золетил 100, Virbac Sante Animale, Франция). ЛДФ регистрировали в три этапа, каждый продолжительностью по 8 минут: в исходном состоянии, после 2-х минутного ионофореза ацетилхолина (АХ, 1 %, (Sigma-Aldrich, США) с помощью прибора для гальванизации и лекарственного ионофореза «ЭЛФОР-ПРОФ» (Россия), после 2-х минутного введения нитропруссид натрия (НП, 1 %, (ICN Biomedicals, США). В результате исследования были зарегистрированы: ПМ, максимальные значения колебаний перфузии в эндотелиальном (Аэ), нейрогенном (Ан) и миогенном (Ам) диапазонах и среднее квадратическое отклонение. В последующем, рассчитывали эндотелиальный, нейрогенный и миогенный компоненты сосудистого тонуса, которые характеризуют активные механизмы контроля микрогемодинамики.

Расчёт компонентов микрососудистого тонуса проводили по формуле:

$$\text{Эндотелиальный тонус (ЭТ)} = \frac{\sigma \times P (\text{ср})}{A_{\text{э}} \times M},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение показателя микроциркуляции; P (ср) – среднее артериальное давление; $A_{\text{э}}$ – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в эндотелиальном диапазоне; M – среднее значение показателя микроциркуляции. Нейрогенный и миогенный компоненты сосудистого тонуса рассчитывали по такой же формуле, заменяя $A_{\text{э}}$ на $A_{\text{н}}$ и $A_{\text{м}}$.

Реактивность брыжеечных артерий у всех групп крыс оценивали *in vivo*. Исследование проводили на установке, включающей подогреваемый столик, подогреваемую камеру, микроскоп (МСП-2, ЛОМО, Россия) и видеокамеру (Basler, Germany). Обработку результатов проводили в программе MultiMedia Catalog (ММС, Россия). У наркотизированной крысы через разрез брюшной стенки выводили петлю тонкой кишки и помещали ее в специальный жёлоб с протекающим физиологическим солевым раствором (PSS) следующего состава (ммоль/л): NaCl – 120.4; KCl – 5.9; CaCl₂ – 2.5; MgCl₂ – 1.2; NaH₂PO₄ – 1.2; NaHCO₃ – 15.5; глюкоза – 5.5. PSS сатурировали газовой смесью, состоящей из 95 % O₂ и 5 % CO₂. Температуру в камере поддерживали на уровне +37±0,1 °С. Исходный диаметр артерий, выбранных для исследования, составлял 160–230 мкм (третий порядок ветвления верхней брыжеечной артерии).

Вначале измеряли исходный диаметр артерий, затем осуществляли предконтрактирование посредством введения в раствор фенилэфрина (ФЭ, 1×10⁻⁶ М (Sigma-Aldrich, США)). К концу второй минуты воздействия ФЭ приводил к максимальной вазоконстрикции, вновь измеряли диаметр артерий и затем в камеру добавляли раствор АХ (1×10⁻⁶ М), НП (1×10⁻⁶ М).

При завершении исследования, крыс декапитировали, осуществляли забор крови для определения липидного профиля плазмы и уровня МК. Биохимический анализ был выполнен на анализаторе ARCHITECT с8000 (США). Выделяли висцеральный жир, взвешивали, и рассчитывали индекс массы висцерального жира (ИМВЖ) по формуле: ИМВЖ=масса жира/масса крысы, мг/г.

При статистической обработке результатов использовали программу Statistica v.12. Полученные данные представлены в виде среднего значения ± стандартная ошибка среднего. Для сравнения выборок с нормальным распределением использовали t-критерий Стьюдента. В случае распределения вариант в выборке, отличном от нормального, при исследовании реактивности сосудов брыжейки, при сравнении независимых групп, применяли U-критерий Манна–Уитни. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования. Самцы линии SHR во всех группах в конце исследования имели массу тела достоверно ниже, чем в группах Wistar Kyoto. Максимальный вес имела группа WKFr, у них же наблюдался самый высокий ИМВЖ. Наименьшее значение ИМВЖ отмечено в группе SHRC. В группе крыс SHRFr зарегистрировано достоверное повышение САД и ДАД, данные показатели являются самыми высокими по сравнению с другими группами крыс. Результаты тестов на ИР и толерантность к глюкозе показали, что во всех группах, получавших фруктозную нагрузку, наблюдается достоверное повышение уровня гликемии натощак. Максимальное значение отмечено у группы SHRFr, наименьший уровень гликемии наблюдался в группе WKFr. Анализы на липидный профиль показали выраженную дислипидемию, а именно, повышение уровня ТГ и ХС в группах: SHRFr, WKFr по

сравнению с контролем. Уровень ХС-ЛПНП был выше во всех диетных группах животных. Отмечено повышение уровня МК в группах WKFr и SHRFr (табл. 1).

Таблица 1
Основные биохимические и физиологические показатели у крыс SHR и Wistar Kyoto

Показатель	SHRC (n 10)	SHRFr (n 10)	WKC (n 10)	WKFr (n 10)
Вес, г	348±8	367±10*	501±5*	512±9*
Индекс массы висцерального жира (ИМВЖ), мг/г	5.5±0.8	11±1*	13.2±2	20.1±3*
Глюкоза при тесте на инсулинорезистентность, ммоль/л	5.3±0.4	7.8±0.5*	4.4±0.3	7.4±0.5*
Глюкоза при тесте на толерантность к глюкозе, ммоль/л	5.4±0.3	7.8±0.2*	4.6±0.2	7.4±0.5*
АД систолическое, мм рт.ст.	161±4	195±5*	129±4	157±7*
АД диастолическое, мм рт.ст.	101±5	115±7*	78±4	111±6*
Уровень ТГ, ммоль/л	0.61±0.2	1.22±0.2*	0.62±2	1.2±0.3*
ХС общий, ммоль/л	1.32±0.2	1.43±0.1	1.3±0.1	1.5±0.1
ХС-ЛПВП, ммоль/л	0.48±0.1	0.55±0.1	0.4±0.08	0.6±0.1
ХС-ЛПНП, ммоль/л	0.12±0.1	0.32±0.1*	0.6±0.1	1.03±0.09*
Мочевая кислота, мкмоль/л	59±0.2	79±0.2*	68±0.1	92.2±0.3*

Примечание: АД - артериальное давление, ТГ – триглицериды, ХС - общий холестерин, ЛПВП – липопротеины высокой плотности, ЛПНП – липопротеины низкой плотности, Wistar Kyoto Control (WKC), Wistar Kyoto Fructose (WKFr), SHR Control (SHRC), SHR fructose (SHRFr). Данные представлены в виде среднее ± стандартная ошибка. Различия достоверны: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю.

После 16 недель эксперимента, методом ЛДФ, было проведено исследование нутритивного кровотока в сосудах МЦР кожи спины у всех групп животных. Наименьший исходный ПМ наблюдался во всех группах, получавших фруктозную нагрузку, по сравнению с контрольными группами животных. У группы SHRFr ПМ имел самое низкое значение. После ионофореза АХ и НП во всех группах наблюдалось увеличение ПМ; у групп, получавших фруктозу, наблюдалось наименьшее значение ПМ после ионофореза АХ и НП. В группе WKC показатель микроциркуляции был выше после всех воздействий, по сравнению с другими группами животных (табл. 2).

Таблица 2
Показатель микроциркуляции в коже крыс после ионофореза ацетилхолина, нитропруссид натрия

Группы животных	Исходный ПМ (п.е.)	ПМ после ионофореза АХ (п.е.)	ПМ после ионофореза НП (п.е.)
SHRC (n10)	7.3±0.1	8.18±0.2*	9.29±0.3*
SHRFr (n 10)	6.22±0.1	7.56±0.3*	8.97±0.3*
WKC (n 10)	7.9±0.3	12.6±0.5*	11.01±0.09*
WKFr (n 10)	7.0±0.3	8.7±0.4*	9.73±0.2*

Примечание: SHRC – контрольная группа животных со спонтанной гипертензией, SHRFr – группа животных со спонтанной гипертензией, получавшая фруктозу, WKC – контрольная группа крыс Wistar Kyoto, WKFr – крысы Wistar Kyoto, получавшие фруктозу.

АХ – ацетилхолин, НП – нитропруссид натрия, п.е. – перфузионные единицы.

Данные представлены в виде среднее ± стандартная ошибка. Различия достоверны: * – $p < 0,05$ по отношению к контролю.

Анализ компонентов сосудистого тонуса показал, что у групп, получавших фруктозу, наблюдается усиление нейрогенного компонента, в сравнении с контрольными группами. В группах SHRC наблюдаются минимальные значения всех компонентов сосудистого тонуса (табл. 3).

Таблица 3

Компоненты сосудистого тонуса в микроциркуляторном русле кожи крыс

	SHRC (n=10)	SHRFr (n=10)	WKC (n=10)	WKFr (n=10)
ЭТ (y.e.)	63.6±3.5	78.6±2.8*	76.1.3±3.5	87.2±3.4*
НТ (y.e.)	58.3±4.2	85.2±3.1*	72.6±2.7	86.2±3.3*
МТ (y.e.)	21.5±3.1	78.4±4.0*	68.7±3.6	84.4±4.1*

Примечание: ЭТ – эндотелийзависимый тонус, НТ – нейрогенный тонус, МТ – миогенный тонус. Величины сосудистого тонуса представлены в условных единицах. Различия данных достоверны: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю.

Изучая реактивность брыжеечных артерий отмечено снижение амплитуды АХ- и НП-индуцированной дилатации в группах, получавших фруктозную нагрузку. Так, % дилатации после воздействия АХ составил в группе WKFr – 62.3 %, в группе SHRFr – 60.4 %; в контрольных группах значения были следующими: WKC – 85 %, SHRC – 80.2 %. Амплитуда НП-индуцированной дилатации в группах составила: WKC – 89.5 %, WKFr – 62.1 %, SHRC – 70 %, SHRFr – 57.3 %.

Обсуждение результатов. Метаболический синдром – это хроническое неинфекционное состояние, клинически характеризующееся и набором сосудистых факторов риска: АГ, атеросклерозом, протромботическим состоянием, а также метаболическими нарушениями: ИР, абдоминальным ожирением, нарушением метаболизма глюкозы и дислипидемией. Эти факторы обуславливают развитие провоспалительного состояния, окислительного стресса, и, как итог наблюдается гемодинамическая дисфункция и ишемия [23].

В нашем исследовании был сделан акцент на выявлении и сравнении признаков МС, индуцированного фруктозной нагрузкой, у крыс линий Wistar Kyoto и SHR, и выявлении функциональной сосудистой дисфункции в сосудах МЦР и артериях в данном состоянии.

Во всех группах животных, участвовавших в эксперименте и получавших фруктозу, была выявлена гипергликемия натощак. Известно, что гипергликемия способствует усилению окислительного стресса, клеточной и молекулярной дисфункции. В свою очередь окислительный стресс и воспаление связаны со старением клеток и прогрессирующими сердечно-сосудистыми заболеваниями [24].

Известно, что воспаление характеризуется повышением концентрации в сыворотке крови провоспалительных цитокинов, в основном интерлейкина -1 β (IL-1 β), IL-6 и фактора некроза опухоли- α (TNF- α), происходящих из хронически воспаленной жировой ткани и связанных с окислительным стрессом. Хронические воспалительные состояния часто сопровождаются метаболическими изменениями, непосредственно связанными с частотой сердечно-сосудистых заболеваний, сахарным диабетом, гипертонией и ожирением [25].

Анализ уровня МК показал повышение данного показателя у всех диетных групп животных. Известно, что МК синтезируется главным образом в печени, кишечнике и эндотелии сосудов как конечный продукт экзогенного пурина, поступающего с пищей, и эндогенно – из поврежденных, отмирающих и мертвых клеток. Когда выработка МК превышает её выведение, возникает гиперурикемия, которая в значительной степени

связана с развитием и тяжестью МС. Фруктоза стимулирует синтез МК из предшественников аминокислот, таких как глицин. В свою очередь, гиперурикемия может индуцировать накопление ТГ [12, 26]. Полученные в нашем эксперименте результаты, и данные ряда научных исследований, свидетельствуют о том, что гиперурикемия и ожирение печени являются распространенными осложнениями МС и сахарного диабета [27]. Данные, полученные в ряде фундаментальных исследований, свидетельствуют о патогенетической роли гиперурикемии в развитии сердечно-сосудистых заболеваний, вызывая воспаление, эндотелиальную дисфункцию, пролиферацию гладкомышечных клеток сосудов и активацию ренин-ангиотензиновой системы [28].

Наши данные свидетельствуют о выраженной дислипидемии, с достоверным увеличением уровня: ТГ, общего ХС, ХС-ЛПНП, и гиперурикемии в группах, получавших 20 % раствор фруктозы вместо обычной питьевой воды.

Снижение амплитуды АХ- и НП-индуцированной дилатации брыжеечных артерий крыс, получавших фруктозную нагрузку, свидетельствует о нарушении вазодилаторной функции эндотелия сосудов и снижении продукции вазодилаторов. Известно, что неповрежденный эндотелий сосудов продуцирует вазоконстрикторы и вазодилаторы, «соблюдая» баланс [29]. Основным эндотелиальным вазодилатором брыжеечных артерий является оксид азота II (NO), и ингибирование NO-cGMP сигнальной цепи в гладкомышечных клетках артерий, приводит к сниженным показателям дилатации [30]. Усиленная вазоконстрикция интактных брыжеечных артерий крыс с МС обусловлена снижением производства эндотелием вазодилаторов. Можем предположить, исходя из результатов нашего исследования, что компоненты МС способствовали развитию эндотелиальной дисфункции, проявляющейся в снижении способности эндотелия продуцировать NO. При этом, есть данные, что одновременно с уменьшением NO-опосредованной релаксации в артериях крыс, получавших фруктозу, может возрастать роль EDH (Endothelium-Derived Hyperpolarizing Factor). Установлено, что механизм EDH в брыжеечных артериях крыс реализуется преимущественно посредством открывания IKCa и SKCa-каналов на эндотелиальных клетках артерий, при этом часть EDH-релаксации обусловлена неклассическим механизмом эндотелиальной гиперполяризации. Снижение производства эндотелиальных вазодилаторов в артериях крыс, получавших фруктозу, играет важную роль в развитии АГ при МС, но не является единственной причиной [31, 32].

Выводы:

1. Оригинальность нашего исследования заключалась в том, что именно в возрасте 4 недель крысы начали потреблять фруктозу, эта модель потребления фруктозы людьми (дети/подростки) с раннего возраста в виде сладких напитков;
2. Потребление животными, начиная с раннего возраста, раствора с 20 % содержанием фруктозы, приводит к развитию признаков МС, негативным изменениям микроциркуляторного кровотока кожи, и АГ;
3. Уменьшается перфузия, что продемонстрировано снижением ПМ у диетных животных;
4. АХ- и НП-индуцируемая дилатация в группах с фруктозной нагрузкой была ослаблена, что может свидетельствовать о нарушении продукции эндотелием вазодилаторов;
5. Наиболее негативные изменения в функциональном состоянии сосудов МЦР и артерий наблюдались у группы SHRFr.

Соблюдение этических стандартов. Все манипуляции с животными соответствовали этическим стандартам, утвержденными актами РФ, принципами

Базельской декларации. Протокол исследования одобрен этической комиссией Института физиологии им. И.П. Павлова, РАН по контролю над содержанием и использованием лабораторных животных № 03/13 от 13 марта 2023 по проекту «Функциональное состояние брыжеечных артерий и сосудов микроциркуляторного русла кожи крыс при развитии метаболического синдрома».

Источник финансирования. Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН (№ 1021062411784-3-3.1.8). This study was supported by the State Program "Scientific and Technological Development of the Russian Federation» (№ 1021062411784-3-3.1.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bovolini A. Metabolic Syndrome Pathophysiology and Predisposing Factors // *Int. J. Sports Med.* – 2021. – Vol. 42, No. 3. – P. 199–214. – DOI: 10.1055/a-1263-0898.
2. Fuchs T. et al. Animal models in metabolic syndrome // *Rev. Col. Bras. Cir.* – 2018. – Vol. 45, No. 5. – P. e1975. – DOI: 10.1590/0100-6991e-20181975.
3. Moura R.F. Metabolic syndrome signs in Wistar rats submitted to different high-fructose ingestion protocols // *Br. J. Nutr.* – 2009. – Vol. 101, No. 8. – P. 1178–1184. – DOI: 10.1017/S0007114508066774.
4. Wu K. L. H. Effects of high fructose intake on the development of hypertension in the spontaneously hypertensive rats: the role of AT1R/gp91PHOX signaling in the rostral ventrolateral medulla // *J. Nutr. Biochem.* – 2017. – Vol. 41. – P. 73–83. – DOI: 10.1016/j.jnutbio.2016.11.013.
5. Dai S., McNeill J. H. Fructose-induced hypertension in rats is concentration- and duration-dependent // *J. Pharmacol. Toxicol. Methods.* – 1995. – Vol. 33, No. 2. – P. 101–107. – DOI: 10.1016/1056-8719(94)00063-a.
6. Pravenec M., Kurtz T.W. Recent advances in genetics of the spontaneously hypertensive rat // *Curr. Hypertens. Rep.* – 2010. – Vol. 12, No. 1. – P. 5–9. – [https://doi: 10.1007/s11906-009-0083-9](https://doi.org/10.1007/s11906-009-0083-9).
7. Garcia Diaz A. I. New Wistar Kyoto and spontaneously hypertensive rat transgenic models with ubiquitous expression of green fluorescent protein // *Dis. Model. Mech.* – 2016. – Vol. 9, No. 4. – P. 463–471. – DOI: 10.1242/dmm.024208.
8. Saklayen M.G. The Global Epidemic of the Metabolic Syndrome // *Curr. Hypertens. Rep.* – 2018. – Vol. 20, No. 2. – P. 12. – DOI: 10.1007/s11906-018-0812-z.
9. DeBoer M.D. Assessing and Managing the Metabolic Syndrome in Children and Adolescents // *Nutrients.* – 2019. – Vol. 11, No. 8. – P. 1788. – DOI: 10.3390/nu11081788.
10. Verma S., Bhanot S., McNeill J.H. Sympathectomy prevents fructose-induced hyperinsulinemia and hypertension // *Eur. J. Pharmacol.* – 1999. – Vol. 373, No. 2. – P. R1–R4. – DOI: 10.1016/s0014-2999(99)00301-5.
11. Farah V. et al. Nocturnal hypertension in mice consuming a high fructose diet // *Auton. Neurosci. Basic Clin.* – 2006. – Vol. 130, No. 1–2. – P. 41–50. – DOI: 10.1016/j.autneu.2006.05.006.
12. Moreno-Fernández S. et al. High Fat/High Glucose Diet Induces Metabolic Syndrome in an Experimental Rat Model // *Nutrients.* – 2018. – Vol. 10, No. 10. – P. 1502. – DOI: 10.3390/nu10101502.
13. Nguyen S. Sugar-Sweetened Beverages, Serum Uric Acid, and Blood Pressure in Adolescents // *J. Pediatr.* 2009. – Vol. 154, No. 6. – P. 807–813. – DOI: 10.1016/j.jpeds.2009.01.015.
14. Calcaterra V. Sugar-Sweetened Beverages and Metabolic Risk in Children and Adolescents with Obesity: A Narrative Review // *Nutrients.* – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 702. – DOI: 10.3390/nu15030702.
15. Elliott S.S. Fructose, weight gain, and the insulin resistance syndrome^{1,2,3} // *Am. J. Clin. Nutr.* – 2002. – Vol. 76, No. 5. – P. 911–922. – DOI: 10.1093/ajcn/76.5.911.
16. Herman S.M. Androgen deprivation is associated with enhanced endothelium-dependent dilatation in adult men // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* – 1997. – Vol. 17, No. 10. – P. 2004–2009. – DOI: 10.1161/01.atv.17.10.2004.
17. Teoh H. Differential effects of 17beta-estradiol and testosterone on the contractile responses of porcine coronary arteries // *Br. J. Pharmacol.* – 2000. – Vol. 129, No. 7. – P. 1301–1308. – DOI: 10.1038/sj.bjp.0703164.
18. Ostchega Y. Trends of elevated blood pressure among children and adolescents: data from the National Health and Nutrition Examination Survey 1988–2006 // *Am. J. Hypertens.* – 2009. – Vol. 22, No. 1. – P. 59–67. – DOI: 10.1038/ajh.2008.312.

19. Sun S.S. Systolic blood pressure in childhood predicts hypertension and metabolic syndrome later in life // *Pediatrics*. – 2007. – Vol. 119, No 2. – P. 237–246. – DOI: 10.1542/peds.2006-2543.
20. Song P. Global Prevalence of Hypertension in Children: A Systematic Review and Meta-analysis // *JAMA Pediatr*. – 2019. – Vol. 173, No. 12. – P. 1154–1163. – DOI: 10.1001/jamapediatrics.2019.3310
21. American Heart Association Nutrition Committee и др. Diet and lifestyle recommendations revision 2006: a scientific statement from the American Heart Association Nutrition Committee // *Circulation*. – 2006. – Vol. 114, No. 1. – С. 82–96.
22. Madero M. Dietary fructose and hypertension // *Curr. Hypertens. Rep.* – 2011. – Vol. 13, No. 1. – P. 29–35. – DOI: 10.1007/s11906-010-0163-x.
23. Silveira Rossi J.L. Metabolic syndrome and cardiovascular diseases: Going beyond traditional risk factors // *Diabetes Metab. Res. Rev.* 2022. – Vol. 38, No. 3. – P. e3502. – DOI: 10.1002/dmrr.3502.
24. Masenga S.K. Mechanisms of Oxidative Stress in Metabolic Syndrome // *Int. J. Mol. Sci.* – 2023. – Vol. 24, No. 9. – P. 7898. – DOI: 10.3390/ijms24097898.
25. Rani V. Oxidative stress and metabolic disorders: Pathogenesis and therapeutic strategies // *Life Sci.* – 2016. – Vol. 148. – P. 183–193. – DOI: 10.1016/j.lfs.2016.02.002.
26. Lanaspá M.A. Uric acid induces hepatic steatosis by generation of mitochondrial oxidative stress: potential role in fructose-dependent and -independent fatty liver // *J. Biol. Chem.* – 2012. – Vol. 287, No. 48. – P. 40732–40744. – DOI: 10.1074/jbc.M112.399899.
27. Lim J.S. The role of fructose in the pathogenesis of NAFLD and the metabolic syndrome // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* – 2010. – Vol. 7, No. 5. – P. 251–264. – DOI: 10.1038/nrgastro.2010.41.
28. Yanai H. Molecular Biological and Clinical Understanding of the Pathophysiology and Treatments of Hyperuricemia and Its Association with Metabolic Syndrome, Cardiovascular Diseases and Chronic Kidney Disease // *Int. J. Mol. Sci.* – 2021. – Vol. 22, No. 17. – P. 9221.
29. Marzoug B.A. Recent advances in molecular biology of metabolic syndrome pathophysiology: endothelial dysfunction as a potential therapeutic target // *J. Diabetes Metab. Disord.* – 2022. – Vol. 21, No. 2. – P. 1903–1911. – DOI: 10.1007/s40200-022-01088-y.
30. Vanhoutte P.M. Endothelial dysfunction and vascular disease - a 30th anniversary update // *Acta Physiol. Oxf. Engl.* – 2017. – Vol. 219, No. 1. – С. 22–96. – DOI: 10.1111/apha.12646.
31. Cairrão E. Potassium channels are involved in testosterone-induced vasorelaxation of human umbilical artery // *Naunyn. Schmiedebergs Arch. Pharmacol.* – 2008. – Vol. 376, No. 5. – P. 375–383. – DOI: 10.1007/s00210-007-0213-3.
32. Царева И.А. Эндотелиальная дисфункция в брыжеечных артериях крыс при моделировании метаболического синдрома // *Современные вопросы биомедицины*. – 2024. – Т. 8, № 2(28). – DOI: 10.24412/2588-0500-2024_08_02_20.

Поступила в редакцию 17.08.2024 г.

PECULIARITIES OF FUNCTIONAL STATE OF MICROCIRCULATORY VESSELS AND MESENTERIC ARTERIES IN MALE SHR AND WISTAR KYOTO RATS WHEN METABOLIC SYNDROME IS INDUCED BY FRUCTOSE DIET AT EARLY STAGES OF DEVELOPMENT

I.A. Tsareva, G.T. Ivanova, G.I. Lobov

In our study we investigated early functional changes in microcirculatory vessels and mesenteric arteries in SHR and Wistar Kyoto (WK) rats under modeling of metabolic syndrome (MetS) by fructose load in drinking water. Dietary rats showed: arterial hypertension (AH), increased fasting glycemia, dyslipidemia accompanied by increased triglyceride (TG) concentration, increased total cholesterol (TC) level, increased low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) concentration, and increased uric acid (UA) concentration. It is worth noting that the level of systolic (CAD) and diastolic blood pressure (DBP) was significantly higher in SHRFr rats (SHR rats receiving fructose). All rats treated with fructose showed a decrease in the microcirculation index (MCI) in microcirculatory vessels (MCV). The use of iontophoresis, for non-invasive administration of acetylcholine (ACh) and sodium nitroprusside (NP) into the back skin of animals, revealed a decrease in PM in all groups of fructose-loaded animals. In SHRFr rats, in comparison with the WKFr line (Wistar Kyoto rats receiving fructose), the greatest decrease of this index was observed. The impairment of endothelium-dependent and endothelium-independent regulation of microcirculatory blood flow was noted, which indicates weakening of endothelial NO production (bioavailability) and impairment of NO-cGMP signaling pathway in smooth muscle cells of MCR vessels. A decrease in the amplitude of ACh- and NP-induced dilatation of mesenteric arteries in

the groups receiving fructose was revealed, the greatest decrease was observed in the SHRFr group of animals. The contractile response to phenylephrine (PE) was increased in the mesenteric arteries of rats treated with fructose, which may indicate an increase in the density of α -adrenergic receptors on the membrane of arterial smooth muscle cells (SMCs) or stimulation of signaling pathways activated by α -adrenergic receptors in SMCs. The results of the study demonstrate that consumption of 20 % fructose solution, early in development, leads to the development of MS signs in rats.

Keywords: metabolic syndrome; arteries; microcirculatory system; endothelium; laser Doppler flowmetry; fructose diet.

Царева Инна Анатольевна

старший лаборант лаборатории сердечно-сосудистой и лимфатической систем, институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург, РФ; преподаватель кафедры нормальной физиологии, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, РФ.
E-mail: tsarevaia@infran.ru

Tsareva Inna Anatolyevna

senior laboratory assistant at the laboratory of cardiovascular and lymphatic systems, Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia; Teacher at the department of normal physiology, Military Medical Academy of S.M. Kirov, Saint-Petersburg, RF.

Иванова Галина Тажимовна

ведущий научный сотрудник лаборатории сердечно-сосудистой и лимфатической систем, институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург, РФ

Ivanova Galina Tazhimovna

leading researcher at the laboratory of cardiovascular and lymphatic systems, Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, RF.

Лобов Геннадий Иванович

заведующий лабораторией сердечно-сосудистой и лимфатической систем, институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург, РФ

Lobov Gennady Ivanovich

head of the laboratory of cardiovascular and lymphatic systems, Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, RF.

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия А: Естественные науки**

2024. – № 3

Технический редактор: *М.В. Фоменко*

Свидетельство о регистрации СМИ ДНР Серия ААА № 000077 от 21.11.2016 г.

Адрес редакции:
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк, ДНР, РФ.
Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92.
E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru
URL: <http://donnu.ru/vestnikA>
