



БЕЛОРУССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ  
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

# БИОЛОГИЯ

---

JOURNAL  
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

# BIOLOGY

Издается с января 1969 г.  
(до 2017 г. – под названием «Вестник БГУ.  
Серия 2, Химия. Биология. География»)

Выходит три раза в год

---

# 2

# 2020

---

МИНСК  
БГУ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

|   |  |
|---|--|
| <b>Главный редактор</b>                   | <b>СИДОРОВ А. В.</b> – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры физиологии человека и животных биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.<br>E-mail: sidorov@bsu.by |
| <b>Заместитель<br/>главного редактора</b> | <b>ДЕМИДЧИК В. В.</b> – доктор биологических наук, доцент; декан биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.<br>E-mail: dzemidchik@bsu.by   |
| <b>Ответственный<br/>секретарь</b>        | <b>ХРАМЦОВА Е. А.</b> – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры генетики биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.<br>E-mail: elena_khramtsova@inbox.ru               |
| <i>Гельтман Д. В.</i>                     | Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.  |
| <i>Давыденко О. Г.</i>                    | Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь.   |
| <i>Зинченко А. И.</i>                     | Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь.  |
| <i>Кильчевский А. В.</i>                  | Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.  |
| <i>Кульчицкий В. А.</i>                   | Институт физиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь.   |
| <i>Медведев С. С.</i>                     | Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.  |
| <i>Решетников В. Н.</i>                   | Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Беларусь.  |
| <i>Семак И. В.</i>                        | Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.  |
| <i>Титок М. А.</i>                        | Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.  |
| <i>Усанов С. А.</i>                       | Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.  |

## EDITORIAL BOARD

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>Editor-in-chief</b>            | <b>SIDOROV A. V.</b> , doctor of science (biology), full professor; professor at the department of human and animal physiology of the faculty of biology of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.<br>E-mail: sidorov@bsu.by |
| <b>Deputy<br/>editor-in-chief</b> | <b>DEMIDCHIK V. V.</b> , doctor of science (biology), docent; dean of the faculty of biology of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.<br>E-mail: dzemidchik@bsu.by  |
| <b>Executive<br/>secretary</b>    | <b>KHRAMTSOVA E. A.</b> , PhD (biology), docent; associate professor at the department of genetics of the faculty of biology of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.<br>E-mail: elena_khramtsova@inbox.ru                  |
| <i>Geltman D. V.</i>              | V. L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia.  |
| <i>Davydenko O. G.</i>            | Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.   |
| <i>Zinchenko A. I.</i>            | Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.  |
| <i>Kilchevsky A. V.</i>           | National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.   |
| <i>Kulchitsky V. A.</i>           | Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.  |
| <i>Medvedev S. S.</i>             | Saint Petersburg University, Saint Petersburg, Russia.   |
| <i>Reshetnikov V. N.</i>          | Central Botanical Garden, Minsk, Belarus.  |
| <i>Semak I. V.</i>                | Belarusian State University, Minsk, Belarus.   |
| <i>Titok M. A.</i>                | Belarusian State University, Minsk, Belarus.   |
| <i>Usanov S. A.</i>               | National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.   |

---

---

# КЛЕТОЧНАЯ БИОЛОГИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ

---

## CELL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

---

---

УДК 57.017.67

### ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ НАРУШЕНИИ МЕТАБОЛИЗМА ГЛЮКОЗЫ

**В. Н. ШАДЕНКО<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Республиканский научно-практический центр психического здоровья,  
Долгиновский тракт, 152, 220053, г. Минск, Беларусь

Анализируются данные литературы, отражающие связь нарушений глюкозного гомеостаза и когнитивных функций мозга. Проводится параллель между изменениями, наблюдаемыми при развитии ряда нейродегенеративных заболеваний (в частности, болезни Альцгеймера), и нарушениями метаболизма глюкозы, ассоциируемыми с формированием инсулинорезистентности организма (сахарный диабет второго типа). Представлены сведения о роли инсулина и инсулиновых рецепторов в обменных процессах, возникновении гипергликемии и инсулинорезистентности, в том числе и на фоне возрастных изменений. Отдельно оценен вклад свободнорадикальных механизмов в развитие нарушений когнитивных функций, связанных с изменением метаболизма глюкозы.

**Ключевые слова:** окислительный стресс; глюкоза; инсулин; старение; нейрон.

---

#### Образец цитирования:

Шаденко В.Н. Возрастные изменения нейронных функций при нарушении метаболизма глюкозы. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;2:3–14. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-3-14>

#### For citation:

Shadenko VN. Age-dependent changes of neural functions under glucose metabolism disorders. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2020;2:3–14. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-3-14>

---

#### Автор:

**Виктория Николаевна Шаденко** – научный сотрудник лаборатории клинико-эпидемиологических исследований.

#### Author:

**Viktoria N. Shadenko**, researcher at the laboratory of clinical and epidemiological research.  
[vika-st-18@list.ru](mailto:vika-st-18@list.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-0037-6131>



## AGE-DEPENDENT CHANGES OF NEURAL FUNCTIONS UNDER GLUCOSE METABOLISM DISORDERS

V. N. SHADENKO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Republican Scientific and Practical Center for Mental Health,  
152 Daŭhinaŭski Tract, Minsk 220053, Belarus

There is a brief review of literature data about relationship of violations glucose homeostasis and cognitive brain functions. A relationship was found between impaired glucose metabolism during the formation of insulin resistance (type 2 diabetes mellitus) with the changes observed in development of a number of neurodegenerative diseases (Alzheimer's disease). It provides information on the role of insulin and insulin receptors in metabolic processes, development of hyperglycemia and insulin resistance during ageing. The contribution of free radical mechanisms in development of cognitive impairment caused by metabolic glucose changes is also discussed.

**Keywords:** oxidative stress; glucose; insulin; ageing; neuron.

С течением времени наблюдаются постепенное угасание когнитивных и снижение физиологических функций в организме, обусловленные в том числе нарушением функциональной активности нейронов [1]. Не вызывает сомнения возрастная зависимость метаболических процессов [2; 3], однако открытым остается вопрос о том, является она причиной старческих изменений или их следствием. В данном обзоре рассматривается взаимосвязь особенностей энергетического, прежде всего глюкозного, обмена и нарушений (изменений) со стороны нейронов и контролируемых ими функций.

Традиционно считается, что глюкоза служит основным источником энергии для клеток нервной ткани. В подтверждение сказанного обычно приводят данные, согласно которым мозг человека потребляет около 20–25 % от общего количества кислорода (при максимальной активности до 50 %) и 70 % свободной глюкозы. При этом 85–90 % полученной глюкозы аэробно окисляется до углекислого газа и воды, а в ткани мозга образуется 95 % всего АТФ организма [4]. Присутствующий в нейронах гликоген лишь частично обеспечивает функционирование жизненно важных отделов нервной системы [5]. Однако именно чрезмерное потребление питательных веществ, в том числе и углеводов, приводит к комплексу негативных последствий, таких как избыточная масса тела, сахарный диабет второго типа, атеросклероз и т. п., являющихся существенными факторами в развитии патологии нервной системы различного генеза, в особенности у лиц пожилого возраста (старше 60 лет) [6].

Неудивительно, что снижение калорийности рациона питания – наиболее общедоступный способ продления жизни, без потери ее качества, для разных видов организмов. У мышей, получавших низкокалорийную (минус 55–65 % калорий) диету, отмечено увеличение продолжительности жизни на 35–65 % по сравнению с группой грызунов, питавшихся *ad libitum* [7]. Подобный эффект достигался и при поддержании менее строгой диеты с сокращением калорийности пищи на 20–40 % [8]. Длительное низкокалорийное питание отдалает возможное возникновение таких заболеваний, как сахарный диабет, рак, у грызунов [8] и приматов [9]. Показано, что люди с избыточной массой тела, придерживающиеся низкокалорийной диеты, значительно улучшают свои кардиологические показатели [10; 11], у таких пациентов возрастает чувствительность к инсулину [6], усиливается функция митохондрий [12]. Долгосрочное соблюдение данной диеты способствует снижению окислительного повреждения нуклеиновых кислот [13; 14], уменьшению уровня экспрессии генов, вовлеченных в развитие окислительного стресса [15]. Вероятно, снижение образования активных форм кислорода (АФК) и, как следствие, окислительного повреждения клеток и клеточных мембран [16; 17] лежит в основе наблюдаемых терапевтических эффектов низкокалорийной диеты.

**Роль АФК в развитии и поддержании патофизиологических процессов в нервных клетках.** АФК (супероксид-анион, гидроксильный радикал, пероксид водорода) являются нестабильными соединениями и по этой причине могут легко превращаться из одних форм в другие. Они образуются как побочный продукт функционирования дыхательной цепи митохондрий ферментами эндоплазматического ретикулума [18; 19], НАДФН-оксидазами [20], ксантинооксидазой [21] и др. Таким образом, при нарушениях функционирования электронно-транспортных цепей митохондрий или микросом, особенно на фоне низкой концентрации АДФ, а также при изменении свойств дегидрогеназ [22; 23] генерация АФК наиболее интенсивна.

Расположенная в митохондриальном матриксе ДНК (мДНК) крайне чувствительна к окислительному стрессу, и по этой причине ей уделяется особое внимание как предполагаемой мишени опосредуемых

АФК повреждений, поскольку продуцируемые в митохондриях АФК высвобождаются в матрикс [24]. Именно это событие является отправной точкой возникновения возрастных нейродегенеративных заболеваний [25; 26]. Имеются данные о повышенном окислительном повреждении макромолекул при боковом амиотрофическом склерозе, болезнях Хантингтона, Паркинсона и Альцгеймера [27].

Тем не менее говорить о том, что роль АФК сводится исключительно к негативной, не приходится. Как сигнальные молекулы [28], АФК участвуют в активации транскрипционных ядерных факторов AP-1 (активирующий протеин-1) и NF-κB (ядерный фактор «каппа-би») [29]. Также свободные радикалы выступают в качестве индукторов апоптоза [30], митотических стимуляторов деления клеток различных тканей организма, принимают участие в регуляции редокс-статуса клетки и окислительных модификаций белков [31], т. е. относятся к внутриклеточным сигнальным агентам. Модуляция межклеточных контактов может быть связана со способностью АФК напрямую взаимодействовать с некоторыми аминокислотами, например метионином, цистеином, тирозином [32; 33], что открывает возможность модификации свойств рецепторов постсинаптической мембраны, а следовательно, влияет на эффективность синаптической передачи [34; 35].

Снижение активности антиокислительных ферментов является одним из возможных механизмов повреждения нервных клеток. Его причиной могут стать отравление тяжелыми металлами [36], проникновение во внутреннюю среду веществ, обладающих нервно-паралитическим действием [37], способных спровоцировать денатурацию белков либо ингибировать их ферментативную активность, наличие генетических дефектов [38], воздействие ионизирующего излучения [39], высоких или низких температур [40; 41]. Окислительный стресс возникает в момент, когда повреждающее действие АФК превосходит барьерные функции антиоксидантной системы организма, а так как с возрастом обменные процессы замедляются, это, несомненно, сказывается на всем организме в целом и антиоксидантной системе в частности. Именно возрастные изменения являются основной причиной снижения ферментативной активности антиоксидантной системы. С возрастом экспрессия антиоксидантных ферментов ослабевает, тогда как очагов АФК становится все больше [42], а адаптивный ответ на окислительный стресс с течением времени значительно уменьшается [43].

Известно, что два главных фермента антиокислительной защиты – супероксиддисмутаза (СОД) и каталаза – содержат в своих активных центрах ионы металлов [44], а с другой стороны, в присутствии металлов с переменной валентностью возможно повышенное образование АФК [45]. Неудивительно, что заметную роль в развитии нейродегенеративных заболеваний, включая болезни Альцгеймера, Паркинсона и рассеянный склероз, играют такие металлы, как цинк (Zn), медь (Cu), кобальт (Co), марганец (Mn) и железо (Fe) [46]. Из них наиболее распространенным в нервной системе является цинк. Снижение содержания этого металла усиливает повреждение ДНК за счет нарушения механизмов ее репарации. Кроме того, недостаток цинка оказывает влияние на иммунную систему [47], вызывая функциональный дисбаланс между клетками Th-1 (Т-хелперами-1) и Th-2 (Т-хелперами-2), а параллельное повышение концентрации железа в таламусе и полосатом теле способствует патогенезу рассеянного склероза [48]. При болезни Альцгеймера дефицит цинка подавляет β-амилоидную нейротоксичность за счет избирательного осаждения промежуточных продуктов агрегации, однако высокий уровень связывания цинка с β-амилоидом может усиливать фибриллярную агрегацию последнего, что приводит к нейродегенерации [49]. Недостаток Zn и высокое содержание Cu, Mn и Fe ассоциируются с активацией сигнальных путей при ответе на воспалительный, окислительный и нитрозативный стрессы [49]. Дисбаланс этих металлов изменяет структурные, регуляторные и каталитические функции различных ферментов, структурных белков и рецепторов [46], обуславливая нарушение функции митохондрий [50], индуцирует гибель нейронов посредством апоптотических и (или) некротических механизмов [50]. Высокие уровни Cu, Mn и в особенности очаговое накопление Fe [46] вызывают формирование агрегатов α-синуклеина во внутриклеточных включениях (тельцах Леви), что влечет за собой синаптическую дисфункцию и нарушение аксонального транспорта в дофаминергических нейронах *substantia nigra* при болезни Паркинсона.

Энергетический дефицит и генетические дефекты выработки ферментов могут приводить к нарушениям синтеза нейромедиаторов [51]. Причиной цитопатий, возникающих из-за отсутствия необходимых клетке компонентов, могут служить гипоксия [52], голодание, авитаминоз, недостаточность антиоксидантной системы, анемия [53], генетические нарушения [54], гипо- и гипергликемия [55] и т. п. Наиболее чувствительны к цитопатическим повреждениям клетки с высокими реактивностью и функциональной активностью, в частности нейроны головного мозга и кардиомиоциты.

Таким образом, особенности энергообеспечения клетки, в первую очередь регуляция поступления и потребления глюкозы (как основного энергетического субстрата для нервных клеток), являются базисными для внутриклеточного уровня АФК и вызываемых ими изменений. С этих позиций любая сигнальная молекула должна обладать выраженным нейротропным действием.

**Роль инсулина в обменных процессах.** Инсулин является специфическим веществом, способным выполнять множество функций, важнейшей из которых выступает стабилизация уровня глюкозы в интерстициальном пространстве. Источник инсулина – клетки эндокринной части поджелудочной железы ( $\beta$ -клетки островков Лангерганса), но в высокой концентрации данный гормон обнаруживается во многих участках тела человека [56]. Так, его содержание в спинномозговой жидкости может достигать 25 % от общего значения для всего организма. Однако происхождение инсулина в ЦНС является спорным. Существует мнение, что фракция инсулина в плазме может преодолевать гематоэнцефалический барьер посредством специфических транспортеров, в активации которых, вероятно, задействованы инсулиновые рецепторы эндотелия сосудов [57; 58]. Кроме того, в некоторых областях мозга, например гипоталамусе, эффективный барьер, препятствующий проникновению гормона в ткань мозга, отсутствует. В частности, в работе [59] описываются быстрое возникновение и передача инсулинопосредованных сигналов в подобных областях после инъекционного введения гормона. Вопрос о том, может ли инсулин синтезироваться локально в структурах нервной ткани, остается открытым.

Регуляторное действие инсулина осуществляется путем влияния на одноименные рецепторы, распространенные по всему организму, в том числе и в ЦНС. От уровня этого гормона зависят появление чувства голода и насыщения [60], ответ на состояние гипогликемии и выработку глюкозы в печени [61], функции половых желез [62], регуляция температуры тела [60; 63]. Нарушение взаимодействия инсулина с рецепторами ЦНС приводит к гипофункции нейронов и нарушению синаптогенеза [57], влияет на фосфорилирование белка МАРТ (*microtubule-associated protein tau*), ассоциирующееся с развитием болезни Альцгеймера [64]. Снижение уровня инсулина, т. е. «расходование» этого вещества, обнаружено в процессе усвоения нового материала у человека [65], что может быть связано со способностью гормона инициировать спрутинг нейронов [66], увеличивая эффективность синаптической передачи, определяющей развитие долговременных изменений в мозге [67].

Инсулиновый рецептор (IR) активируется инсулином и инсулиноподобными факторами роста IGF-1 (*insulin-like growth factor-1*) и IGF-2 (*insulin-like growth factor-2*). Рецепторы к этим молекулам обнаруживаются в мозге повсеместно [68]. У мышей самая высокая экспрессия инсулиновых рецепторов выявлена в обонятельной луковице, а также в гиппокампе, коре больших полушарий, мозжечке и гипоталамусе. Относительно низкий уровень экспрессии характерен для клеток таламуса, полосатого тела и ствола мозга [68–70]. Напротив, максимальная экспрессия рецепторов IGF-1 отмечена в неокортексе, таламусе и гиппокампе, умеренная – в обонятельной луковице, мозжечке и гипоталамусе, а минимальная – в среднем мозге, полосатом теле и стволе мозга [68].

Инсулиноподобные пептиды синтезируются и в нервной системе беспозвоночных, в том числе *Caenorhabditis elegans* и *Drosophila melanogaster* [71]. Источником инсулиноподобных пептидов у моллюсков (*molluscan insulin-related peptide*, MIP), в частности *Lymnaea stagnalis*, являются нейроэндокринные светло-зеленые клетки, содержащие около 150 нейронов, вовлеченных в нейрогормональную регуляцию процессов роста и размножения [72]. Известно, что инъекция инсулиноподобных пептидов у *Aplysia californica* снижает уровень глюкозы в гемолимфе, вызывает модификацию ионных токов в нейронах [73], а у *Lymnaea stagnalis* обладает кардиомодуляторным эффектом [74].

Один из универсальных сигнальных путей действия инсулина, наиболее характерный для большинства клеток человека, – PI3K/АКТ/mTOR. Его центральными компонентами являются фосфоинозитид-3-киназа (PI3K), киназы АКТ, mTOR, GSK3 $\beta$  и семейство транскрипционных факторов FoxO (*forkhead box protein O*) [68; 75]. Все они, помимо этого, вовлечены в регуляцию различных нейронных функций. Например, внутриклеточный мультимолекулярный сигнальный комплекс mTORC1 (*mammalian target of rapamycin complex 1*) наряду с другими соединениями (GSK3) обеспечивает развитие синаптической пластичности [76]. Также он принимает участие в регуляции автофагии – основного процесса удаления дефектных белков и органелл в нейронах [77], при этом нарушение регуляторного действия mTORC1 приводит к гибели нервных клеток и возникновению расстройств нейродегенеративного характера [78]. Протеинкиназа GSK3 играет важную роль в определении полярности нейронов, она способна фосфорилировать белок МАРТ, нарушения функциональных свойств которого обусловлены патогенезом болезни Альцгеймера [78].

**Инсулинорезистентность и связанные с ней возрастные нарушения физиологических функций.** По мере старения населения возрастные хронические заболевания становятся все более распространенными. По прогнозам, к 2035 г. число людей с диагнозом «сахарный диабет второго типа» (СД II) достигнет 592 млн [79], а количество людей, страдающих деменцией, увеличится вдвое – до 75,6 млн [76]. Параллельно прогнозируется рост показателей ожирения у населения, что увеличивает риск развития СД II, гипертонии, ишемической болезни сердца и некоторых форм рака [80; 81].

Во время инсулинорезистентных состояний, к которым относится СД II, инсулин не способен подавлять выработку глюкозы в печени, но содействует синтезу липидов, что приводит к гипергликемии и гипертриглицеридемии. Такой дисбаланс в содержании углеводов и липидов вызывает развитие окислительного стресса [52] и, как следствие, возникновение различного рода заболеваний, как метаболических [81; 82], так и нейродегенеративных [83; 84]. Резистентность к инсулину является общей отличительной чертой ожирения, СД II и нейропатологических процессов, обуславливая высокий риск снижения когнитивных функций и даже деменции [85], особенно среди пожилых людей [65; 86]. Известно, что у пациентов с болезнью Альцгеймера и легкими когнитивными нарушениями, а также у пациентов с общей инсулинорезистентностью, СД II и ожирением уровень инсулина в плазме высок, тогда как его содержание в спинномозговой жидкости снижено [65; 87]. Длительная периферическая гиперинсулинемия может уменьшить поступление инсулина в мозг [88]. Кроме того, для пациентов с болезнью Альцгеймера характерна пониженная периферическая чувствительность к инсулину [89], а у пациентов с СД II по сравнению с контрольной группой отмечено снижение способности к выполнению поставленных задач и обучению, а также скорости обработки информации [65].

Точные механизмы, лежащие в основе нарушения когнитивных функций и изменений структуры мозга при ожирении и СД II, до конца не выяснены. К примеру, снижение функциональных характеристик инсулиночувствительного переносчика глюкозы GluT4 (*glucose transporter type 4*) затрагивает способность к запоминанию и воспроизведению информации, что может лежать в основе когнитивных расстройств, наблюдаемых как следствие резистентности к инсулину. Однако неоспоримо, что хроническое и острое нарушение регуляции концентрации глюкозы в крови напрямую связано с нарушением высших функций ЦНС [90]. Так, женщины, которые болели диабетом более 15 лет, имели на 57–114 % больший риск снижения когнитивных процессов [91; 92] по сравнению с контрольной группой.

Колебания уровня глюкозы во внутренней среде вызывают изменения и в мозге беспозвоночных. В частности, острая, кратковременная гипергликемия [93] приводит к модификации состояния антиокислительной системы в нервных ганглиях моллюска *Lymnaea stagnalis* [94], вероятно обуславливая формирование оригинального поведенческого паттерна животного вследствие установления нового свободнорадикального фона в гемолимфе [95].

Известно, что при болезни Альцгеймера амилоидные отложения накапливаются преимущественно в специфических областях мозга, так называемых DMN (*default mode network*), включающих поясную извилину, префронтальную кору, латеральную височную кору и гиппокамп, отвечающие за восприятие и обработку новой информации. Как следствие, у лиц с деменцией отмечена потеря функциональных связей в сети DMN [96]. Интересно, что аналогичные нарушения обнаружены и у пациентов с СД II [81; 97] и избыточной массой тела [82], что говорит о взаимосвязи возрастных перестроек и изменений, наблюдаемых при колебаниях уровня глюкозы. В условиях нарушенного метаболизма глюкозы выявлены ухудшения когнитивных функций как у здоровых пожилых людей, так и у лиц с диагностированным СД II [98]. При наличии избыточной массы тела и СД II имеют место уменьшение объема серого вещества и толщины кортикального слоя, потеря целостности белого вещества, значительно сокращается мозговой кровоток. Особенно подвержен морфологическим изменениям гиппокамп [99], один из ключевых участков мозга, ответственных за реализацию когнитивных функций (обучение, память).

Отдельно подчеркнем, что инсулин является далеко не единственным гормональным сигналом [100], поступающим с периферии и влияющим на потребление пищи (холецистокинин, грелин), что, в свою очередь, определяет последующую продукцию таких гормонов по принципу обратной связи (положительной или отрицательной). В частности, инсулиновая сигнализация в гипоталамусе необходима для контроля выработки глюкозы в печени [101], а хирургическая резекция печеночной ветви блуждающего нерва отменяет действие инсулина в мозге [102].

Подводя итог изложенному, можно сказать, что с возрастом защитные функции антиоксидантной системы ослабевают, и организм становится более восприимчивым к воздействию агрессивных факторов – в клетках (нейронах) активизируются процессы свободнорадикального окисления. Нарушения обменных процессов в условиях гипергликемии сказываются на чувствительности инсулиновых рецепторов, в результате нарушается цепочка взаимодействий *глюкоза – инсулин – рецептор – мозг – печень – глюкоза*. Одним из механизмов, препятствующих возникновению и прогрессированию возрастных изменений нервных клеток, вызываемых нарушением метаболизма глюкозы, является снижение калорийности пищи.

С нейробиологической точки зрения инсулин и глюкоза относятся к сигнальным молекулам центрального действия, выступая в качестве эффективных нейромодуляторов на нейронном и синаптическом уровнях. Очевидно, что любая, в том числе и фармакологическая, модификация их содержания в интерстициальном пространстве может существенно снизить риск развития нарушений когнитивных функций при изменении глюкозного гомеостаза и (или) старении.

### Библиографические ссылки

1. Beckman KB, Ames BN. The free radical theory of aging matures. *Physiological Reviews*. 1998;78(2):547–581.
2. Spruijt-Metz D, Wen CKF, Bell BM, Intille S, Huang JS, Baranowski T. Advances and controversies in diet and physical activity measurement in youth. *American Journal of Preventive Medicine*. 2018;55(4):e81–e91. DOI: 10.1016/j.amepre.2018.06.012.
3. Júdice PB, Silva AM, Berria J, Petroski EL, Ekelund U, Sardinha LB. Sedentary patterns, physical activity and health-related physical fitness in youth: a cross-sectional study. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 10];14:25. Available from: <https://ijbnpa.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12966-017-0481-3>. DOI: 10.1186/s12966-017-0481-3.
4. Гусев ЕИ, Скворцова ВИ. *Ишемия головного мозга*. Москва: Медицина; 2001. 328 с.
5. Chowen JA, Frago LM, Fernández-Alfonso MS. Physiological and pathophysiological roles of hypothalamic astrocytes in metabolism. *Journal of Neuroendocrinology* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 10];31(5):e12671. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jne.12671>. DOI: 10.1111/jne.12671.
6. Larson-Meyer DE, Heilbronn LK, Redman LM, Newcomer BR, Frisard MI, Anton S, et al. Effect of calorie restriction with or without exercise on insulin sensitivity,  $\beta$ -cell function, fat cell size, and ectopic lipid in overweight subjects. *Diabetes Care*. 2006;29(6):1337–1344. DOI: 10.2337/dc05-2565.
7. Weindruch R. The retardation of aging by caloric restriction: studies in rodents and primates. *Toxicologic Pathology*. 1996;24(6):742–745. DOI: 10.1177/019262339602400618.
8. Weindruch R, Kayo T, Lee C-K, Prolla TA. Microarray profiling of gene expression in aging and its alteration by caloric restriction in mice. *The Journal of Nutrition*. 2001;131(3):918S–923S. DOI: 10.1093/jn/131.3.918S.
9. Colman RJ, Anderson RM, Johnson SC, Kastman EK, Kosmatka KJ, Beasley TM, et al. Caloric restriction delays disease onset and mortality in rhesus monkeys. *Science*. 2009;325(5937):201–204. DOI: 10.1126/science.1173635.
10. Fontana L, Meyer TE, Klein S, Holloszy JO. Long-term caloric restriction is highly effective in reducing the risk for atherosclerosis in humans. *PNAS* [Internet]. 2004 [cited 2020 April 10];101(17):6659–6663. Available from: <https://www.pnas.org/content/pnas/101/17/6659.full.pdf>. DOI: 10.1073/pnas.0308291101.
11. Lefevre M, Redman LM, Heilbronn LK, Smith JV, Martin CK, Rood JC, et al. Caloric restriction alone and with exercise improves CVD risk in healthy non-obese individuals. *Atherosclerosis*. 2009;203(1):206–213. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2008.05.036.
12. Civitaresse AE, Carling S, Heilbronn LK, Hulver MH, Ukropcova B, Deutsch WA, et al. Calorie restriction increases muscle mitochondrial biogenesis in healthy humans. *PLOS Medicine* [Internet]. 2007 [cited 2020 April 10];4(3):e76. Available from: <https://journals.plos.org/plosmedicine/article/file?id=10.1371/journal.pmed.0040076&type=printable>. DOI: 10.1371/journal.pmed.0040076.
13. Heilbronn LK, Ravussin E. Calorie restriction and aging: review of the literature and implications for studies in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003;78(3):361–369. DOI: 10.1093/ajcn/78.3.361.
14. Heilbronn LK, de Jonge L, Frisard MI, DeLany JP, Larson-Meyer DE, Rood J, et al. Effect of 6-month caloric restriction on biomarkers of longevity, metabolic adaptation, and oxidative stress in overweight individuals: a randomized controlled trial. *JAMA*. 2006;295(13):1539–1548. DOI: 10.1001/jama.295.13.1539.
15. Phillips T, Leeuwenburgh C. Muscle fiber-specific apoptosis and TNF- $\alpha$  signaling in sarcopenia are attenuated by life-long caloric restriction. *The FASEB Journal*. 2005;19(6):668–670. DOI: 10.1096/fj.04-2870fje.
16. Lee C-K, Klopp RG, Weindruch R, Prolla TA. Gene expression profile of aging and its retardation by caloric restriction. *Science*. 1999;285(5432):1390–1393. DOI: 10.1126/science.285.5432.1390.
17. Opalach K, Rangaraju S, Madorsky I, Leeuwenburgh C, Notterpek L. Lifelong caloric restriction alleviates age-related oxidative damage in peripheral nerves. *Rejuvenation Research*. 2010;13(1):65–74. DOI: 10.1089/rej.2009.0892.
18. Voet D, Voet JG, Pratt CW. *Fundamentals of biochemistry. Life at the molecular level*. 3<sup>rd</sup> edition. Hoboken: John Wiley and Sons; 2008. 1247 p.
19. Stowe DF, Camara AKS. Mitochondrial reactive oxygen species production in excitable cells: modulators of mitochondrial and cell function. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2009;11(6):1373–1414. DOI: 10.1089/ars.2008.2331.
20. Babior BM. NADPH oxidase. *Current Opinion in Immunology*. 2004;16(1):42–47. DOI: 10.1016/j.coi.2003.12.001.
21. Colton C, Yao J, Grossman Y, Gilbert D. The effect of xanthine/xanthine oxidase generated reactive oxygen species on synaptic transmission. *Free Radical Research Communications*. 1991;14(5–6):385–393. DOI: 10.3109/10715769109093427.
22. Cross AR, Jones OTG. Enzymic mechanisms of superoxide production. *Biochimica et Biophysica Acta. Bioenergetics*. 1991;1057(3):281–298. DOI: 10.1016/S0005-2728(05)80140-9.
23. Sandhu SK, Kaur G. Mitochondrial electron transport chain complexes in aging rat brain and lymphocytes. *Biogerontology*. 2003;4(1):19–29. DOI: 10.1023/A:1022473219044.
24. Harman D. The biologic clock: the mitochondria? *Journal of the American Geriatrics Society*. 1972;20(4):145–147. DOI: 10.1111/j.1532-5415.1972.tb00787.x.
25. Dröge W. Free radicals in the physiological control of cell function. *Physiological Reviews*. 2002;82(1):47–95. DOI: 10.1152/physrev.00018.2001.
26. Emerit J, Edeas M, Bricaire F. Neurodegenerative diseases and oxidative stress. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2004;58(1):39–46. DOI: 10.1016/j.biopha.2003.11.004.
27. Beal MF. Aging, energy, and oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Annals of Neurology*. 1995;38(3):357–366. DOI: 10.1002/ana.410380304.
28. Flohé L, Brigelius-Flohé R, Saliou C, Traber MG, Packer L. Redox regulation of NF-kappa B activation. *Free Radical Biology and Medicine*. 1997;22(6):1115–1126. DOI: 10.1016/s0891-5849(96)00501-1.
29. Судаков НИ, Никифоров СБ, Константинов ЮМ, Якубов ЛА, Новикова НА, Карамышева АН. Механизмы участия митохондрий в развитии патологических процессов, сопровождающихся ишемией и реперфузией. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2006;5:332–336.
30. Сазонова ТГ, Архипенко ЮВ. Роль свободнорадикальных процессов в адаптации организма к изменению уровня кислорода. В: Лукьянова ЛД, Ушаков ИБ, редакторы. *Проблемы гипоксии: молекулярные, физиологические и медицинские аспекты*. Москва: Истоки; 2004. с. 112–138.
31. Сазонова ТГ, Архипенко ЮВ. Роль свободнорадикальных процессов и редокс-сигналикации в адаптации организма к изменению уровня кислорода. *Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова*. 2005;91(6):636–655.

32. Knapp LT, Klann E. Superoxide-induced stimulation of protein kinase C via thiol modification and modulation of zinc content. *The Journal of Biological Chemistry*. 2000;275(31):24136–24145. DOI: 10.1074/jbc.M002043200.
33. Auerbach JM, Segal M. Peroxide modulation of slow onset potentiation in rat hippocampus. *Journal of Neuroscience*. 1997; 17(22):8695–8701. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.17-22-08695.1997.
34. Sidorov AV. Effect of hydrogen peroxide on electrical coupling between identified *Lymnaea* neurons. *Invertebrate Neuroscience*. 2012;12(1):63–68. DOI: 10.1007/s10158-012-0128-7.
35. Elgersma Y, Silva AJ. Molecular mechanisms of synaptic plasticity and memory. *Current Opinion in Neurobiology*. 1999; 9(2):209–213. DOI: 10.1016/s0959-4388(99)80029-4.
36. Malqui H, Anarghou H, Ouardi FZ, Ouasmi N, Najimi M, Chigr F. Continuous exposure to inorganic mercury affects neurobehavioral and physiological parameters in mice. *Journal of Molecular Neuroscience*. 2018;66(2):291–305. DOI: 10.1007/s12031-018-1176-1.
37. Bartko J, Gludovacz E, Petroczi K, Borth N, Jilma B, Boehm T. Recombinant human diamine oxidase activity is not inhibited by ethanol, acetaldehyde, disulfiram, diethyldithiocarbamate or cyanamide. *Alcohol*. 2016;54:51–59. DOI: 10.1016/j.alcohol.2016.06.001.
38. Wang Z-H, Liu P, Liu X, Manfredsson FP, Sandoval IM, Yu SP, et al. Delta-secretase phosphorylation by SRPK2 enhances its enzymatic activity, provoking pathogenesis in Alzheimer's disease. *Molecular Cell*. 2017;67(5):812–825, e1–e5. DOI: 10.1016/j.molcel.2017.07.018.
39. Vignard J, Mirey G, Salles B. Ionizing-radiation induced DNA double-strand breaks: a direct and indirect lighting up. *Radiotherapy & Oncology*. 2013;108(3):362–369. DOI: 10.1016/j.radonc.2013.06.013.
40. Stys PK, Waxman SG, Ransom BR. Effects of temperature on evoked electrical activity and anoxic injury in CNS white matter. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 1992;12(6):977–986. DOI: 10.1038/jcbfm.1992.135.
41. Сидоров АВ, Маслова ГТ. Состояние антиоксидительной защиты в центральных нервных ганглиях моллюска *Lymnaea stagnalis* при разных температурах окружающей среды. *Новости медико-биологических наук*. 2008;1–2:74–78.
42. Сидоров АВ. Активные формы кислорода и регуляция нейронных функций. *Новости медико-биологических наук*. 2011; 4(4):224–231.
43. Zhang H, Davies KJA, Forman HJ. Oxidative stress response and Nrf2 signaling in aging. *Free Radical Biology and Medicine*. 2015;88(part B):314–336. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2015.05.036.
44. Valko M, Jomova K, Rhodes CJ, Kuča K, Musilek K. Redox- and non-redox-metal-induced formation of free radicals and their role in human disease. *Archives of Toxicology*. 2016;90(1):1–37. DOI: 10.1007/s00204-015-1579-5.
45. Костюк ВА, Потапович АИ. *Биорадикалы и биоантиоксиданты*. Минск: БГУ; 2004. 174 с.
46. Jomova K, Valko M. Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. *Toxicology*. 2011;283(2–3):65–87. DOI: 10.1016/j.tox.2011.03.001.
47. Hidalgo C, Arias-Cavieres A. Calcium, reactive oxygen species, and synaptic plasticity. *Physiology*. 2016;31(3):201–215.
48. Islam MT. Oxidative stress and mitochondrial dysfunction-linked neurodegenerative disorders. *Neurological Research*. 2017; 39(1):73–82. DOI: 10.1080/01616412.2016.1251711.
49. Cheignon C, Tomas M, Bonnefont-Rousselot D, Faller P, Hureau C, Collin F. Oxidative stress and the amyloid beta peptide in Alzheimer's disease. *Redox Biology*. 2018;14:450–464. DOI: 10.1016/j.redox.2017.10.014.
50. Liu H, Wu H, Zhu N, Xu Z, Wang Y, Qu Y, et al. Lactoferrin protects against iron dysregulation, oxidative stress, and apoptosis in 1-methyl-4-phenyl-1,2,3,6-tetrahydropyridine (MPTP)-induced Parkinson's disease in mice. *Journal of Neurochemistry*. 2020; 152(3):397–415. DOI: 10.1111/jnc.14857.
51. Vriend C. The neurobiology of impulse control disorders in Parkinson's disease: from neurotransmitters to neural networks. *Cell & Tissue Research*. 2018;373(1):327–336. DOI: 10.1007/s00441-017-2771-0.
52. Li H, Li X, Liu Z, Wu S, Guo J, Shi R, et al. Resveratrol reserved hypoxia-ischemia induced childhood hippocampal dysfunction and neurogenesis via improving mitochondrial dynamics. *Neuroscience Research* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 10];S0168-0102(19)30433-X. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016801021930433X?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.neures.2019.11.012.
53. White E, Mehnert JM, Chan CS. Autophagy, metabolism, and cancer. *Clinical Cancer Research*. 2015;21(22):5037–5046. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-15-0490.
54. Penati R, Fumagalli F, Calbi V, Bernardo ME, Aiuti A. Gene therapy for lysosomal storage disorders: recent advances for metachromatic leukodystrophy and mucopolysaccharidosis I. *Journal of Inherited Metabolic Disease*. 2017;40(4):543–554. DOI: 10.1007/s10545-017-0052-4.
55. Abebe T, Mahadevan J, Bogachus L, Hahn S, Black M, Oseid E, et al. Nrf2/antioxidant pathway mediates  $\beta$  cell self-repair after damage by high-fat diet – induced oxidative stress. *JCI Insight* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 10];2(24):e92854. Available from: <https://insight.jci.org/articles/view/92854/pdf>. DOI: 10.1172/jci.insight.92854.
56. Rask-Madsen C, Kahn CR. Tissue – specific insulin signaling, metabolic syndrome, and cardiovascular disease. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*. 2012;32(9):2052–2059. DOI: 10.1161/ATVBAHA.111.241919.
57. Margolis RU, Altszuler N. Insulin in the cerebrospinal fluid. *Nature*. 1967;215(5108):1375–1376. DOI: 10.1038/2151375a0.
58. Woods SC, Seeley RJ, Baskin DG, Schwartz MW. Insulin and the blood-brain barrier. *Current Pharmaceutical Design*. 2003; 9(10):795–800. DOI: 10.2174/1381612033455323.
59. Kleinridders A, Lauritzen HPMM, Ussar S, Christensen JH, Mori MA, Bross P, et al. Leptin regulation of Hsp60 impacts hypothalamic insulin signaling. *The Journal of Clinical Investigation*. 2013;123(11):4667–4680. DOI: 10.1172/JCI67615.
60. Woods SC, Lotter EC, McKay LD, Porte D (Jr). Chronic intracerebroventricular infusion of insulin reduces food intake and body weight of baboons. *Nature*. 1979;282(5738):503–505. DOI: 10.1038/282503a0.
61. Iqbal A, Heller S. Managing hypoglycaemia. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2016;30(3): 413–430. DOI: 10.1016/j.beem.2016.06.004.
62. Пинхасов ББ. Патогенетические особенности первичного ожирения и его типов у женщин репродуктивного возраста. *Международный эндокринологический журнал*. 2011;8:13–26.
63. Umezaki Y, Hayley SE, Chu ML, Seo HW, Shah P, Hamada FN. Feeding-state-dependent modulation of temperature preference requires insulin signaling in *Drosophila* warm-sensing neurons. *Current Biology*. 2018;28(5):779–787, e1–e3. DOI: 10.1016/j.cub.2018.01.060.

64. Nussbaum JM, Seward ME, Bloom GS. Alzheimer disease: a tale of two prions. *Prion*. 2013;7(1):14–19. DOI: 10.4161/pri.22118.
65. Moheet A, Mangia S, Seaquist ER. Impact of diabetes on cognitive function and brain structure. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2015;1353(1):60–71. DOI: 10.1111/nyas.12807.
66. Dickson BJ. Wiring the brain with insulin. *Science*. 2003;300(5618):440–441. DOI: 10.1126/science.1084513.
67. Bailey CH, Kandel ER, Harris KM. Structural components of synaptic plasticity and memory consolidation. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* [Internet]. 2015 [cited 2020 April 10];7(7):a021758. Available from: <https://cshperspectives.cshlp.org/content/7/7/a021758.full.pdf>. DOI: 10.1101/cshperspect.a021758.
68. Belfiore A, Frasca F, Pandini G, Sciacca L, Vigneri R. Insulin receptor isoforms and insulin receptor/insulin-like growth factor receptor hybrids in physiology and disease. *Endocrine Reviews*. 2009;30(6):586–623. DOI: 10.1210/er.2008-0047.
69. Zhao W-Q, Chen H, Quon MJ, Alkon DL. Insulin and the insulin receptor in experimental models of learning and memory. *European Journal of Pharmacology*. 2004;490(1–3):71–81. DOI: 10.1016/j.ejphar.2004.02.045.
70. Dou J-T, Chen M, Dufour F, Alkon DL, Zhao W-Q. Insulin receptor signaling in long-term memory consolidation following spatial learning. *Learning & Memory*. 2005;12(6):646–655. DOI: 10.1101/lm.88005.
71. Fernandez AM, Torres-Alemán I. The many faces of insulin-like peptide signaling in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*. 2012;13(4):225–239. DOI: 10.1038/nrn3209.
72. Geraerts WPM. Control of growth by the neurosecretory hormone of the light green cells in the freshwater snail *Lymnaea stagnalis*. *General and Comparative Endocrinology*. 1976;29(1):61–71. DOI: 10.1016/0016-6480(76)90007-1.
73. Jonas EA, Knox RJ, Kaczmarek LK, Schwartz JH, Solomon DH. Insulin receptor in *Aplysia* neurons: characterization, molecular cloning, and modulation of ion currents. *Journal of Neuroscience*. 1996;16(5):1645–1658. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.16-05-01645.1996.
74. Сидоров АВ, Шаденко ВН, Казакевич ВБ. Реакции идентифицированных кардиорегуляторных нейронов ЦНС моллюска *Lymnaea stagnalis* в условиях гипергликемии и при действии инсулина. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2019;3:49–58. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-3-49-58.
75. Numan S, Russell DS. Discrete expression of insulin receptor substrate-4 mRNA in adult rat brain. *Molecular Brain Research*. 1999;72(1):97–102. DOI: 10.1016/S0169-328X(99)00160-6.
76. Stoica L, Zhu PJ, Huang W, Zhou H, Kozma SC, Costa-Mattoli M. Selective pharmacogenetic inhibition of mammalian target of rapamycin complex I (mTORC1) blocks long-term synaptic plasticity and memory storage. *PNAS* [Internet]. 2011 [cited 2020 April 10];108(9):3791–3796. Available from: <https://www.pnas.org/content/pnas/108/9/3791.full.pdf>. DOI: 10.1073/pnas.1014715108.
77. Flegal KM, Carroll MD, Ogden CL, Curtin LR. Prevalence and trends in obesity among US adults, 1999–2008. *JAMA*. 2010;303(3):235–241. DOI: 10.1001/jama.2009.2014.
78. Salcedo-Tello P, Ortiz-Matamoros A, Arias C. GSK3 function in the brain during development, neuronal plasticity, and neurodegeneration. *International Journal of Alzheimer's Disease* [Internet]. 2011 [cited 2020 April 10];2011:189728. Available from: <http://downloads.hindawi.com/journals/ijad/2011/189728.pdf>. DOI: 10.4061/2011/189728.
79. *IDF diabetes atlas*. 7<sup>th</sup> edition. Brussels: International Diabetes Federation; 2015. 142 p.
80. Flegal KM, Graubard BI, Williamson DF, Gail MH. Excess deaths associated with underweight, overweight, and obesity. *JAMA*. 2005;293(15):1861–1867. DOI: 10.1001/jama.293.15.1861.
81. Hoogenboom WS, Marder TJ, Flores VL, Huisman S, Eaton HP, Schneiderman JS, et al. Cerebral white matter integrity and resting-state functional connectivity in middle-aged patients with type 2 diabetes. *Diabetes*. 2014;63(2):728–738. DOI: 10.2337/db13-1219.
82. Kullmann S, Heni M, Veit R, Ketterer C, Schick F, Haring H-U, et al. The obese brain: association of body mass index and insulin sensitivity with resting state network functional connectivity. *Human Brain Mapping*. 2012;33(5):1052–1061. DOI: 10.1002/hbm.21268.
83. Nagase M, Yamamoto Y, Miyazaki Y, Yoshino H. Increased oxidative stress in patients with amyotrophic lateral sclerosis and the effect of edaravone administration. *Redox Report*. 2016;21(3):104–112. DOI: 10.1179/1351000215Y0000000026.
84. Tanzi RE, Bertram L. Twenty years of the Alzheimer's disease amyloid hypothesis: a genetic perspective. *Cell*. 2005;120(4):545–555. DOI: 10.1016/j.cell.2005.02.008.
85. Koekkoek PS, Rutten GEHM, Biessels GJ. Cognitive disorders in diabetic patients. *Handbook of Clinical Neurology*. 2014;126:145–166. DOI: 10.1016/B978-0-444-53480-4.00011-4.
86. Bischof GN, Park DC. Obesity and aging: consequences for cognition, brain structure, and brain function. *Psychosomatic Medicine*. 2015;77(6):697–709. DOI: 10.1097/PSY.0000000000000212.
87. Kern W, Benedict C, Schultes B, Plohr F, Moser A, Born J, et al. Low cerebrospinal fluid insulin levels in obese humans. *Diabetologia*. 2006;49(11):2790–2792. DOI: 10.1007/s00125-006-0409-y.
88. Schwartz MW, Figlewicz DF, Kahn SE, Baskin DG, Greenwood MRC, Porte D (Jr). Insulin binding to brain capillaries is reduced in genetically obese, hyperinsulinemic Zucker rats. *Peptides*. 1990;11(3):467–472. DOI: 10.1016/0196-9781(90)90044-6.
89. Craft S, Newcomer J, Kanne S, Dagogo-Jack S, Cryer P, Sheline Y, et al. Memory improvement following induced hyperinsulinemia in Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*. 1996;17(1):123–130. DOI: 10.1016/0197-4580(95)02002-0.
90. Duning T, van den Heuvel I, Dickmann A, Volkert T, Wempe C, Reinholz J, et al. Hypoglycemia aggravates critical illness – induced neurocognitive dysfunction. *Diabetes Care*. 2010;33(3):639–644. DOI: 10.2337/dc09-1740.
91. Gregg EW, Yaffe K, Cauley JA, Rolka DB, Blackwell TL, Venkat Narayan KM, et al. Is diabetes associated with cognitive impairment and cognitive decline among older women? *Archives of Internal Medicine*. 2000;160(2):174–180. DOI: 10.1001/archinte.160.2.174.
92. Kanaya AM, Barrett-Connor E, Gildengorin G, Yaffe K. Change in cognitive function by glucose tolerance status in older adults: a 4-year prospective study of the Rancho Bernardo Study cohort. *Archives of Internal Medicine*. 2004;164(12):1327–1333. DOI: 10.1001/archinte.164.12.1327.
93. Шаденко ВН, Сидоров АВ. Индукция экспериментальной гипергликемии у моллюска *Lymnaea stagnalis* при инкубации животных в высококонцентрированном растворе глюкозы. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2019;1:79–84. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-1-79-84.
94. Шаденко ВН, Сидоров АВ. Антиокислительная защита в гепатопанкреасе и нервных ганглиях моллюска *Lymnaea stagnalis* после острой экспериментальной гипергликемии. *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2020;56(3):224–231. DOI: 10.31857/S0044452920010106.

95. Sidorov AV, Maslova GT. State of antioxidative protection in central nervous ganglia of the mollusc *Lymnaea stagnalis* at modulation of activity of the NO-ergic system. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2008;44(5):535–541. DOI: 10.1134/S0022093008050010.
96. Sheline YI, Raichle ME. Resting state functional connectivity in preclinical Alzheimer's disease. *Biological Psychiatry*. 2013; 74(5):340–347. DOI: 10.1016/j.biopsych.2012.11.028.
97. Musen G, Jacobson AM, Bolo NR, Simonson DC, Shenton ME, McCartney RL, et al. Resting-state brain functional connectivity is altered in type 2 diabetes. *Diabetes*. 2012;61(9):2375–2379. DOI: 10.2337/db11-1669.
98. Cohen AD, Klunk WE. Early detection of Alzheimer's disease using PiB and FDG PET. *Neurobiology of Disease*. 2014; 72(part A):117–122. DOI: 10.1016/j.nbd.2014.05.001.
99. Cope EC, LaMarca EA, Monari PK, Olson LB, Martinez S, Zych AD, et al. Microglia play an active role in obesity-associated cognitive decline. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(41):8889–8904. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0789-18.2018.
100. Williams KW, Elmquist JK. From neuroanatomy to behavior: central integration of peripheral signals regulating feeding behavior. *Nature Neuroscience*. 2012;15(10):1350–1355. DOI: 10.1038/nn.3217.
101. Obici S, Feng Z, Karkanas G, Baskin DG, Rossetti L. Decreasing hypothalamic insulin receptors causes hyperphagia and insulin resistance in youth: a cross-sectional study. *Nature Neuroscience*. 2002;5(6):566–572. DOI: 10.1038/nn0602-861.
102. Pocai A, Lam TKT, Gutierrez-Juarez R, Obici S, Schwartz GJ, Bryan J, et al. Hypothalamic K<sub>ATP</sub> channels control hepatic glucose production. *Nature*. 2005;434(7036):1026–1031. DOI: 10.1038/nature03439.

## References

1. Beckman KB, Ames BN. The free radical theory of aging matures. *Physiological Reviews*. 1998;78(2):547–581.
2. Spruijt-Metz D, Wen CKF, Bell BM, Intille S, Huang JS, Baranowski T. Advances and controversies in diet and physical activity measurement in youth. *American Journal of Preventive Medicine*. 2018;55(4):e81–e91. DOI: 10.1016/j.amepre.2018.06.012.
3. Júdice PB, Silva AM, Berría J, Petroski EL, Ekelund U, Sardinha LB. Sedentary patterns, physical activity and health-related physical fitness in youth: a cross-sectional study. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 10];14:25. Available from: <https://ijbnpa.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12966-017-0481-3>. DOI: 10.1186/s12966-017-0481-3.
4. Gusev EI, Skvortsova VI. *Ishemiya golovnogo mozga* [Ischemia of the brain]. Moscow: Meditsina; 2001. 328 p. Russian.
5. Chowen JA, Frago LM, Fernández-Alfonso MS. Physiological and pathophysiological roles of hypothalamic astrocytes in metabolism. *Journal of Neuroendocrinology* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 10];31(5):e12671. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jne.12671>. DOI: 10.1111/jne.12671.
6. Larson-Meyer DE, Heilbronn LK, Redman LM, Newcomer BR, Frisard MI, Anton S, et al. Effect of calorie restriction with or without exercise on insulin sensitivity,  $\beta$ -cell function, fat cell size, and ectopic lipid in overweight subjects. *Diabetes Care*. 2006; 29(6):1337–1344. DOI: 10.2337/dc05-2565.
7. Weindruch R. The retardation of aging by caloric restriction: studies in rodents and primates. *Toxicologic Pathology*. 1996; 24(6):742–745. DOI: 10.1177/019262339602400618.
8. Weindruch R, Kayo T, Lee C-K, Prolla TA. Microarray profiling of gene expression in aging and its alteration by caloric restriction in mice. *The Journal of Nutrition*. 2001;131(3):918S–923S. DOI: 10.1093/jn/131.3.918S.
9. Colman RJ, Anderson RM, Johnson SC, Kastman EK, Kosmatka KJ, Beasley TM, et al. Caloric restriction delays disease onset and mortality in rhesus monkeys. *Science*. 2009;325(5937):201–204. DOI: 10.1126/science.1173635.
10. Fontana L, Meyer TE, Klein S, Holloszy JO. Long-term calorie restriction is highly effective in reducing the risk for atherosclerosis in humans. *PNAS* [Internet]. 2004 [cited 2020 April 10];101(17):6659–6663. Available from: <https://www.pnas.org/content/pnas/101/17/6659.full.pdf>. DOI: 10.1073/pnas.0308291101.
11. Lefevre M, Redman LM, Heilbronn LK, Smith JV, Martin CK, Rood JC, et al. Caloric restriction alone and with exercise improves CVD risk in healthy non-obese individuals. *Atherosclerosis*. 2009;203(1):206–213. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2008.05.036.
12. Civitarese AE, Carling S, Heilbronn LK, Hulver MH, Ukropcova B, Deutsch WA, et al. Calorie restriction increases muscle mitochondrial biogenesis in healthy humans. *PLOS Medicine* [Internet]. 2007 [cited 2020 April 10];4(3):e76. Available from: <https://journals.plos.org/plosmedicine/article/file?id=10.1371/journal.pmed.0040076&type=printable>. DOI: 10.1371/journal.pmed.0040076.
13. Heilbronn LK, Ravussin E. Calorie restriction and aging: review of the literature and implications for studies in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003;78(3):361–369. DOI: 10.1093/ajcn/78.3.361.
14. Heilbronn LK, de Jonge L, Frisard MI, DeLany JP, Larson-Meyer DE, Rood J, et al. Effect of 6-month calorie restriction on biomarkers of longevity, metabolic adaptation, and oxidative stress in overweight individuals: a randomized controlled trial. *JAMA*. 2006;295(13):1539–1548. DOI: 10.1001/jama.295.13.1539.
15. Phillips T, Leeuwenburgh C. Muscle fiber-specific apoptosis and TNF- $\alpha$  signaling in sarcopenia are attenuated by life-long calorie restriction. *The FASEB Journal*. 2005;19(6):668–670. DOI: 10.1096/fj.04-2870fje.
16. Lee C-K, Klopp RG, Weindruch R, Prolla TA. Gene expression profile of aging and its retardation by caloric restriction. *Science*. 1999;285(5432):1390–1393. DOI: 10.1126/science.285.5432.1390.
17. Opalach K, Rangaraju S, Madorsky I, Leeuwenburgh C, Notterpek L. Lifelong calorie restriction alleviates age-related oxidative damage in peripheral nerves. *Rejuvenation Research*. 2010;13(1):65–74. DOI: 10.1089/rej.2009.0892.
18. Voet D, Voet JG, Pratt CW. *Fundamentals of biochemistry. Life at the molecular level*. 3<sup>rd</sup> edition. Hoboken: John Wiley and Sons; 2008. 1247 p.
19. Stowe DF, Camara AKS. Mitochondrial reactive oxygen species production in excitable cells: modulators of mitochondrial and cell function. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2009;11(6):1373–1414. DOI: 10.1089/ars.2008.2331.
20. Babior BM. NADPH oxidase. *Current Opinion in Immunology*. 2004;16(1):42–47. DOI: 10.1016/j.coi.2003.12.001.
21. Colton C, Yao J, Grossman Y, Gilbert D. The effect of xanthine/xanthine oxidase generated reactive oxygen species on synaptic transmission. *Free Radical Research Communications*. 1991;14(5–6):385–393. DOI: 10.3109/10715769109093427.
22. Cross AR, Jones OTG. Enzymic mechanisms of superoxide production. *Biochimica et Biophysica Acta. Bioenergetics*. 1991; 1057(3):281–298. DOI: 10.1016/S0005-2728(05)80140-9.

23. Sandhu SK, Kaur G. Mitochondrial electron transport chain complexes in aging rat brain and lymphocytes. *Biogerontology*. 2003;4(1):19–29. DOI: 10.1023/A:1022473219044.
24. Harman D. The biologic clock: the mitochondria? *Journal of the American Geriatrics Society*. 1972;20(4):145–147. DOI: 10.1111/j.1532-5415.1972.tb00787.x.
25. Dröge W. Free radicals in the physiological control of cell function. *Physiological Reviews*. 2002;82(1):47–95. DOI: 10.1152/physrev.00018.2001.
26. Emerit J, Edeas M, Bricaire F. Neurodegenerative diseases and oxidative stress. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2004;58(1):39–46. DOI: 10.1016/j.biopha.2003.11.004.
27. Beal MF. Aging, energy, and oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Annals of Neurology*. 1995;38(3):357–366. DOI: 10.1002/ana.410380304.
28. Flohé L, Brigelius-Flohé R, Saliou C, Traber MG, Packer L. Redox regulation of NF-kappa B activation. *Free Radical Biology and Medicine*. 1997;22(6):1115–1126. DOI: 10.1016/s0891-5849(96)00501-1.
29. Sudakov NP, Nikiforov SB, Konstantinov YuM, Yakubov LA, Novikova NA, Karamysheva AN. The mechanisms of mitochondria participation in development of different pathologic processes associated with ischemia and reperfusion. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*. 2006;5:332–336. Russian.
30. Sazonova TG, Arkhipenko YuV. [The role of free radical processes in the body's adaptation to changes in oxygen levels]. In: Luk'yanova LD, Ushakov IB, editors. *Problemy gipoksii: molekulyarnye, fiziologicheskie i meditsinskie aspekty* [Problems of hypoxia: molecular, physiological and medical aspects]. Moscow: Istoki; 2004. p. 112–138. Russian.
31. Sazonova TG, Arkhipenko YuV. [The role of free radical processes and redox signaling in the adaptation of an organism to changes in oxygen levels]. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I. M. Sechenova*. 2005;91(6):636–655. Russian.
32. Knapp LT, Klann E. Superoxide-induced stimulation of protein kinase C via thiol modification and modulation of zinc content. *The Journal of Biological Chemistry*. 2000;275(31):24136–24145. DOI: 10.1074/jbc.M002043200.
33. Auerbach JM, Segal M. Peroxide modulation of slow onset potentiation in rat hippocampus. *Journal of Neuroscience*. 1997;17(22):8695–8701. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.17-22-08695.1997.
34. Sidorov AV. Effect of hydrogen peroxide on electrical coupling between identified *Lymnaea* neurons. *Invertebrate Neuroscience*. 2012;12(1):63–68. DOI: 10.1007/s10158-012-0128-7.
35. Elgersma Y, Silva AJ. Molecular mechanisms of synaptic plasticity and memory. *Current Opinion in Neurobiology*. 1999;9(2):209–213. DOI: 10.1016/s0959-4388(99)80029-4.
36. Malqui H, Anarhou H, Ouardi FZ, Ouasmi N, Najimi M, Chigr F. Continuous exposure to inorganic mercury affects neurobehavioral and physiological parameters in mice. *Journal of Molecular Neuroscience*. 2018;66(2):291–305. DOI: 10.1007/s12031-018-1176-1.
37. Bartko J, Gludovacz E, Petroczi K, Borth N, Jilma B, Boehm T. Recombinant human diamine oxidase activity is not inhibited by ethanol, acetaldehyde, disulfiram, diethyldithiocarbamate or cyanamide. *Alcohol*. 2016;54:51–59. DOI: 10.1016/j.alcohol.2016.06.001.
38. Wang Z-H, Liu P, Liu X, Manfredsson FP, Sandoval IM, Yu SP, et al. Delta-secretase phosphorylation by SRPK2 enhances its enzymatic activity, provoking pathogenesis in Alzheimer's disease. *Molecular Cell*. 2017;67(5):812–825, e1–e5. DOI: 10.1016/j.molcel.2017.07.018.
39. Vignard J, Mirey G, Salles B. Ionizing-radiation induced DNA double-strand breaks: a direct and indirect lighting up. *Radiotherapy & Oncology*. 2013;108(3):362–369. DOI: 10.1016/j.radonc.2013.06.013.
40. Stys PK, Waxman SG, Ransom BR. Effects of temperature on evoked electrical activity and anoxic injury in CNS white matter. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 1992;12(6):977–986. DOI: 10.1038/jcbfm.1992.135.
41. Sidorov AV, Maslova GT. Antioxidant defense in the central nervous ganglions of mollusk *Lymnaea stagnalis* at different environmental temperatures. *News of Biomedical Sciences*. 2008;1–2:74–78. Russian.
42. Sidorov AV. Reactive oxygen species and regulation of neuronal activity. *News of Biomedical Sciences*. 2011;4(4):224–231. Russian.
43. Zhang H, Davies KJA, Forman HJ. Oxidative stress response and Nrf2 signaling in aging. *Free Radical Biology and Medicine*. 2015;88(part B):314–336. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2015.05.036.
44. Valko M, Jomova K, Rhodes CJ, Kuča K, Musilek K. Redox- and non-redox-metal-induced formation of free radicals and their role in human disease. *Archives of Toxicology*. 2016;90(1):1–37. DOI: 10.1007/s00204-015-1579-5.
45. Kostyuk VA, Potapovich AI. *Bioradikaly i bioantioksidanty* [Bioradicals and bioantioxidants]. Minsk: Belarusian State University; 2004. 174 p. Russian.
46. Jomova K, Valko M. Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. *Toxicology*. 2011;283(2–3):65–87. DOI: 10.1016/j.tox.2011.03.001.
47. Hidalgo C, Arias-Cavieres A. Calcium, reactive oxygen species, and synaptic plasticity. *Physiology*. 2016;31(3):201–215.
48. Islam MT. Oxidative stress and mitochondrial dysfunction-linked neurodegenerative disorders. *Neurological Research*. 2017;39(1):73–82. DOI: 10.1080/01616412.2016.1251711.
49. Cheignon C, Tomas M, Bonnefont-Rousselot D, Faller P, Hureau C, Collin F. Oxidative stress and the amyloid beta peptide in Alzheimer's disease. *Redox Biology*. 2018;14:450–464. DOI: 10.1016/j.redox.2017.10.014.
50. Liu H, Wu H, Zhu N, Xu Z, Wang Y, Qu Y, et al. Lactoferrin protects against iron dysregulation, oxidative stress, and apoptosis in 1-methyl-4-phenyl-1,2,3,6-tetrahydropyridine (MPTP)-induced Parkinson's disease in mice. *Journal of Neurochemistry*. 2020;152(3):397–415. DOI: 10.1111/jnc.14857.
51. Vriend C. The neurobiology of impulse control disorders in Parkinson's disease: from neurotransmitters to neural networks. *Cell & Tissue Research*. 2018;373(1):327–336. DOI: 10.1007/s00441-017-2771-0.
52. Li H, Li X, Liu Z, Wu S, Guo J, Shi R, et al. Resveratrol reserved hypoxia-ischemia induced childhood hippocampal dysfunction and neurogenesis via improving mitochondrial dynamics. *Neuroscience Research* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 10];S0168-0102(19)30433-X. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016801021930433X?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.neures.2019.11.012.
53. White E, Mehnert JM, Chan CS. Autophagy, metabolism, and cancer. *Clinical Cancer Research*. 2015;21(22):5037–5046. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-15-0490.

54. Penati R, Fumagalli F, Calbi V, Bernardo ME, Aiuti A. Gene therapy for lysosomal storage disorders: recent advances for meta-chromatic leukodystrophy and mucopolysaccharidosis I. *Journal of Inherited Metabolic Disease*. 2017;40(4):543–554. DOI: 10.1007/s10545-017-0052-4.
55. Abebe T, Mahadevan J, Bogachus L, Hahn S, Black M, Oseid E, et al. Nrf2/antioxidant pathway mediates  $\beta$  cell self-repair after damage by high-fat diet – induced oxidative stress. *JCI Insight* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 10];2(24):e92854. Available from: <https://insight.jci.org/articles/view/92854/pdf>. DOI: 10.1172/jci.insight.92854.
56. Rask-Madsen C, Kahn CR. Tissue – specific insulin signaling, metabolic syndrome, and cardiovascular disease. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*. 2012;32(9):2052–2059. DOI: 10.1161/ATVBAHA.111.241919.
57. Margolis RU, Altszuler N. Insulin in the cerebrospinal fluid. *Nature*. 1967;215(5108):1375–1376. DOI: 10.1038/2151375a0.
58. Woods SC, Seeley RJ, Baskin DG, Schwartz MW. Insulin and the blood-brain barrier. *Current Pharmaceutical Design*. 2003;9(10):795–800. DOI: 10.2174/1381612033455323.
59. Kleinridders A, Lauritzen HPMM, Ussar S, Christensen JH, Mori MA, Bross P, et al. Leptin regulation of Hsp60 impacts hypothalamic insulin signaling. *The Journal of Clinical Investigation*. 2013;123(11):4667–4680. DOI: 10.1172/JCI67615.
60. Woods SC, Lotter EC, McKay LD, Porte D (Jr). Chronic intracerebroventricular infusion of insulin reduces food intake and body weight of baboons. *Nature*. 1979;282(5738):503–505. DOI: 10.1038/282503a0.
61. Iqbal A, Heller S. Managing hypoglycaemia. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2016;30(3):413–430. DOI: 10.1016/j.beem.2016.06.004.
62. Pinkhasov BB. [Pathogenetic features of primary obesity and its types in women of reproductive age]. *International Journal of Endocrinology*. 2011;8:13–26. Russian.
63. Umezaki Y, Hayley SE, Chu ML, Seo HW, Shah P, Hamada FN. Feeding-state-dependent modulation of temperature preference requires insulin signaling in *Drosophila* warm-sensing neurons. *Current Biology*. 2018;28(5):779–787, e1–e3. DOI: 10.1016/j.cub.2018.01.060.
64. Nussbaum JM, Seward ME, Bloom GS. Alzheimer disease: a tale of two prions. *Prion*. 2013;7(1):14–19. DOI: 10.4161/pr.22118.
65. Moheet A, Mangia S, Seaquist ER. Impact of diabetes on cognitive function and brain structure. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2015;1353(1):60–71. DOI: 10.1111/nyas.12807.
66. Dickson BJ. Wiring the brain with insulin. *Science*. 2003;300(5618):440–441. DOI: 10.1126/science.1084513.
67. Bailey CH, Kandel ER, Harris KM. Structural components of synaptic plasticity and memory consolidation. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* [Internet]. 2015 [cited 2020 April 10];7(7):a021758. Available from: <https://cshperspectives.cshlp.org/content/7/7/a021758.full.pdf>. DOI: 10.1101/cshperspect.a021758.
68. Belfiore A, Frasca F, Pandini G, Sciacca L, Vigneri R. Insulin receptor isoforms and insulin receptor/insulin-like growth factor receptor hybrids in physiology and disease. *Endocrine Reviews*. 2009;30(6):586–623. DOI: 10.1210/er.2008-0047.
69. Zhao W-Q, Chen H, Quon MJ, Alkon DL. Insulin and the insulin receptor in experimental models of learning and memory. *European Journal of Pharmacology*. 2004;490(1–3):71–81. DOI: 10.1016/j.ejphar.2004.02.045.
70. Dou J-T, Chen M, Dufour F, Alkon DL, Zhao W-Q. Insulin receptor signaling in long-term memory consolidation following spatial learning. *Learning & Memory*. 2005;12(6):646–655. DOI: 10.1101/lm.88005.
71. Fernandez AM, Torres-Alemán I. The many faces of insulin-like peptide signaling in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*. 2012;13(4):225–239. DOI: 10.1038/nrn3209.
72. Geraerts WPM. Control of growth by the neurosecretory hormone of the light green cells in the freshwater snail *Lymnaea stagnalis*. *General and Comparative Endocrinology*. 1976;29(1):61–71. DOI: 10.1016/0016-6480(76)90007-1.
73. Jonas EA, Knox RJ, Kaczmarek LK, Schwartz JH, Solomon DH. Insulin receptor in *Aplysia* neurons: characterization, molecular cloning, and modulation of ion currents. *Journal of Neuroscience*. 1996;16(5):1645–1658. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.16-05-01645.1996.
74. Sidorov AV, Shadenko VN, Kazakevich VB. Responses of identified cardioregulatory neurons within CNS of mollusc *Lymnaea stagnalis* at hyperglycemia and insulin action. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;3:49–58. Russian. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-3-49-58.
75. Numan S, Russell DS. Discrete expression of insulin receptor substrate-4 mRNA in adult rat brain. *Molecular Brain Research*. 1999;72(1):97–102. DOI: 10.1016/s0169-328x(99)00160-6.
76. Stoica L, Zhu PJ, Huang W, Zhou H, Kozma SC, Costa-Mattioli M. Selective pharmacogenetic inhibition of mammalian target of rapamycin complex I (mTORC1) blocks long-term synaptic plasticity and memory storage. *PNAS* [Internet]. 2011 [cited 2020 April 10];108(9):3791–3796. Available from: <https://www.pnas.org/content/pnas/108/9/3791.full.pdf>. DOI: 10.1073/pnas.1014715108.
77. Flegal KM, Carroll MD, Ogden CL, Curtin LR. Prevalence and trends in obesity among US adults, 1999–2008. *JAMA*. 2010;303(3):235–241. DOI: 10.1001/jama.2009.2014.
78. Salcedo-Tello P, Ortiz-Matamoros A, Arias C. GSK3 function in the brain during development, neuronal plasticity, and neurodegeneration. *International Journal of Alzheimer's Disease* [Internet]. 2011 [cited 2020 April 10];2011:189728. Available from: <http://downloads.hindawi.com/journals/ijad/2011/189728.pdf>. DOI: 10.4061/2011/189728.
79. *IDF diabetes atlas*. 7<sup>th</sup> edition. Brussels: International Diabetes Federation; 2015. 142 p.
80. Flegal KM, Graubard BI, Williamson DF, Gail MH. Excess deaths associated with underweight, overweight, and obesity. *JAMA*. 2005;293(15):1861–1867. DOI: 10.1001/jama.293.15.1861.
81. Hoogenboom WS, Marder TJ, Flores VL, Huisman S, Eaton HP, Schneiderman JS, et al. Cerebral white matter integrity and resting-state functional connectivity in middle-aged patients with type 2 diabetes. *Diabetes*. 2014;63(2):728–738. DOI: 10.2337/db13-1219.
82. Kullmann S, Heni M, Veit R, Ketterer C, Schick F, Haring H-U, et al. The obese brain: association of body mass index and insulin sensitivity with resting state network functional connectivity. *Human Brain Mapping*. 2012;33(5):1052–1061. DOI: 10.1002/hbm.21268.
83. Nagase M, Yamamoto Y, Miyazaki Y, Yoshino H. Increased oxidative stress in patients with amyotrophic lateral sclerosis and the effect of edaravone administration. *Redox Report*. 2016;21(3):104–112. DOI: 10.1179/1351000215Y.0000000026.
84. Tanzi RE, Bertram L. Twenty years of the Alzheimer's disease amyloid hypothesis: a genetic perspective. *Cell*. 2005;120(4):545–555. DOI: 10.1016/j.cell.2005.02.008.

85. Koekkoek PS, Rutten GEHM, Biessels GJ. Cognitive disorders in diabetic patients. *Handbook of Clinical Neurology*. 2014; 126:145–166. DOI: 10.1016/B978-0-444-53480-4.00011-4.
86. Bischof GN, Park DC. Obesity and aging: consequences for cognition, brain structure, and brain function. *Psychosomatic Medicine*. 2015;77(6):697–709. DOI: 10.1097/PSY.0000000000000212.
87. Kern W, Benedict C, Schultes B, Plohr F, Moser A, Born J, et al. Low cerebrospinal fluid insulin levels in obese humans. *Diabetologia*. 2006;49(11):2790–2792. DOI: 10.1007/s00125-006-0409-y.
88. Schwartz MW, Figlewicz DF, Kahn SE, Baskin DG, Greenwood MRC, Porte D (Jr). Insulin binding to brain capillaries is reduced in genetically obese, hyperinsulinemic Zucker rats. *Peptides*. 1990;11(3):467–472. DOI: 10.1016/0196-9781(90)90044-6.
89. Craft S, Newcomer J, Kanne S, Dagogo-Jack S, Cryer P, Sheline Y, et al. Memory improvement following induced hyperinsulinemia in Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging*. 1996;17(1):123–130. DOI: 10.1016/0197-4580(95)02002-0.
90. Duning T, van den Heuvel I, Dickmann A, Volkert T, Wempe C, Reinholz J, et al. Hypoglycemia aggravates critical illness – induced neurocognitive dysfunction. *Diabetes Care*. 2010;33(3):639–644. DOI: 10.2337/dc09-1740.
91. Gregg EW, Yaffe K, Cauley JA, Rolka DB, Blackwell TL, Venkat Narayan KM, et al. Is diabetes associated with cognitive impairment and cognitive decline among older women? *Archives of Internal Medicine*. 2000;160(2):174–180. DOI: 10.1001/archinte.160.2.174.
92. Kanaya AM, Barrett-Connor E, Gildengorin G, Yaffe K. Change in cognitive function by glucose tolerance status in older adults: a 4-year prospective study of the Rancho Bernardo Study cohort. *Archives of Internal Medicine*. 2004;164(12):1327–1333. DOI: 10.1001/archinte.164.12.1327.
93. Shadenko VN, Sidorov AV. Induction of experimental hyperglycemia in mollusc *Lymnaea stagnalis* after animal's incubation in high-concentrated glucose solution. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;1:79–84. Russian. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-1-79-84.
94. Shadenko VN, Sidorov AV. Antioxidative defense in the hepatopancreas and nerve ganglia of the mollusk *Lymnaea stagnalis* after acute experimental hyperglycemia. *Zhurnal evolyutsionnoi biokhimii i fiziologii*. 2020;56(3):224–231. Russian. DOI: 10.31857/S0044452920010106.
95. Sidorov AV, Maslova GT. State of antioxidative protection in central nervous ganglia of the mollusc *Lymnaea stagnalis* at modulation of activity of the NO-ergic system. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2008;44(5):535–541. DOI: 10.1134/S0022093008050010.
96. Sheline YI, Raichle ME. Resting state functional connectivity in preclinical Alzheimer's disease. *Biological Psychiatry*. 2013; 74(5):340–347. DOI: 10.1016/j.biopsych.2012.11.028.
97. Musen G, Jacobson AM, Bolo NR, Simonson DC, Shenton ME, McCartney RL, et al. Resting-state brain functional connectivity is altered in type 2 diabetes. *Diabetes*. 2012;61(9):2375–2379. DOI: 10.2337/db11-1669.
98. Cohen AD, Klunk WE. Early detection of Alzheimer's disease using PiB and FDG PET. *Neurobiology of Disease*. 2014; 72(part A):117–122. DOI: 10.1016/j.nbd.2014.05.001.
99. Cope EC, LaMarca EA, Monari PK, Olson LB, Martinez S, Zych AD, et al. Microglia play an active role in obesity-associated cognitive decline. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(41):8889–8904. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0789-18.2018.
100. Williams KW, Elmquist JK. From neuroanatomy to behavior: central integration of peripheral signals regulating feeding behavior. *Nature Neuroscience*. 2012;15(10):1350–1355. DOI: 10.1038/nn.3217.
101. Obici S, Feng Z, Karkanias G, Baskin DG, Rossetti L. Decreasing hypothalamic insulin receptors causes hyperphagia and insulin resistance in rats. *Nature Neuroscience*. 2002;5(6):566–572. DOI: 10.1038/nn0602-861.
102. Poci A, Lam TKT, Gutierrez-Juarez R, Obici S, Schwartz GJ, Bryan J, et al. Hypothalamic  $K_{ATP}$  channels control hepatic glucose production. *Nature*. 2005;434(7036):1026–1031. DOI: 10.1038/nature03439.

Статья поступила в редколлегию 26.04.2020.  
Received by editorial board 26.04.2020.

## СОВРЕМЕННЫЕ ФЕНОМНЫЕ ПЛАТФОРМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В БИОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

А. Ю. ШАШКО<sup>1)</sup>, В. Ю. БОНДАРЕНКО<sup>1)</sup>, М. А. ЧЕРНЫШ<sup>1)</sup>, Д. А. ПРЖЕВАЛЬСКАЯ<sup>1)</sup>,  
С. Л. УСНИЧ<sup>1)</sup>, Н. Л. ПШИБЫТКО<sup>1)</sup>, И. И. СМОЛИЧ<sup>1)</sup>, В. В. ДЕМИДЧИК<sup>1)</sup>

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Феномные платформы – аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие сбор и обработку информации о фенотипе растений или других организмов. В представленном исследовании дан аналитический обзор феномных платформ основных мировых изготовителей, их компонентов, характеристик и применения в биологии, сельском хозяйстве и биотехнологии. Проведено сравнение феномных установок по ключевым параметрам, выявлены

### Образец цитирования:

Шашко АЮ, Бондаренко ВЮ, Черныш МА, Пржевальская ДА, Уснич СЛ, Пшибытко НЛ, Смолич ИИ, Демидчик ВВ. Современные феномные платформы и их применение в биологии растений и сельском хозяйстве. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2020;2:15–25.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>

### For citation:

Shashko AYU, Bandarenka UYu, Charnysh MA, Przhevalskaya DA, Usnich SL, Pshybytko NL, Smolich II, Demidchik VV. Modern phenotyping platforms and their application in plant biology and agriculture. *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2020;2:15–25. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>

### Авторы:

**Антонина Юрьевна Шашко** – магистрант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Владислав Юрьевич Бондаренко** – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Мария Александровна Черныш** – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Дарья Андреевна Пржевальская** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений; заведующий учебной лабораторией «Биотехнологический кластер БГУ».

**Савелий Леонидович Уснич** – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Наталья Лёггиновна Пшибытко** – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Игорь Иванович Смолич** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Вадим Викторович Демидчик** – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений, декан биологического факультета.

### Authors:

**Antonina Yu. Shashko**, master's degree student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and probationer of junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.  
[bio.shashkoAY@bsu.by](mailto:bio.shashkoAY@bsu.by)

**Uladzislau Yu. Bandarenka**, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.  
[bandarenkaVY@bsu.by](mailto:bandarenkaVY@bsu.by)

**Maryia A. Charnysh**, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.  
[chernyshmaryia@gmail.com](mailto:chernyshmaryia@gmail.com)

**Darya A. Przhevalskaya**, junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and head of the training laboratory «Biotechnology Cluster of BSU».  
[daryaprzhevalskaya@gmail.com](mailto:daryaprzhevalskaya@gmail.com)

**Saveli L. Usnich**, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.  
[usnichbio@gmail.com](mailto:usnichbio@gmail.com)

**Natalia L. Pshybytko**, PhD (biology); leading researcher at the laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.  
[pshybytko@bsu.by](mailto:pshybytko@bsu.by)

**Igor I. Smolich**, PhD (biology), docent; head of the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.  
[smolich@bsu.by](mailto:smolich@bsu.by)

**Vadim V. Demidchik**, doctor of science (biology), docent; professor at the department of plant cell biology and bioengineering, and dean of the faculty of biology.  
[dzemidchik@bsu.by](mailto:dzemidchik@bsu.by)

тенденции развития их сенсорной и программно-аналитической составляющих. Дана оценка современного состояния мирового рынка феномных систем. Приводятся наиболее важные примеры использования феномных установок для фенотипирования в полевых и лабораторных условиях, фундаментальных и практических исследованиях в различных областях биологии растений.

**Ключевые слова:** феномика; фенотипирование; физиология растений; феномная платформа; рост и развитие растений; продуктивность растений; стрессоустойчивость растений.

## MODERN PHENOTYPING PLATFORMS AND THEIR APPLICATION IN PLANT BIOLOGY AND AGRICULTURE

*A. Yu. SHASHKO<sup>a</sup>, U. Yu. BANDARENKA<sup>a</sup>, M. A. CHARNYSH<sup>a</sup>, D. A. PRZHEVALSKAYA<sup>a</sup>,  
S. L. USNICH<sup>a</sup>, N. L. PSHYBYTKO<sup>a</sup>, I. I. SMOLICH<sup>a</sup>, V. V. DEMIDCHIK<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

*Corresponding author: V. V. Demidchik (dzemidchik@bsu.by)*

Phenotyping platforms is hardware and software systems that provide collection and processing of information about plant or other organism phenotypes. In the presented study, an analytical review of the phenotyping platforms of the world's major manufacturers, their components, characteristics and applications in biology, agriculture and biotechnology was carried out. A comparison of the phenomics attitudes by key parameters was made, trends in the development of their sensory and program-analytical components were revealed. The assessment of the world market of phenotyping systems current state was made. The most important examples of phenomics facilities use for phenotyping in the field and laboratory conditions, fundamental and practical research in various fields of plant biology are given.

**Keywords:** phenomics; phenotyping; plant phenomics; phenotyping platform; plant growth and development; plant productivity; plant stress resistance.

### Введение

Феномика – раздел биологии, связанный с глубоким анализом свойств фенотипа и рассматривающий вопросы его формирования в онтогенезе, а также модификацию при ответе на внешние факторы среды [1–3]. Современная феномика представляет собой омиксную дисциплину, сводящую анатомические характеристики и физиологические процессы к численно-анализируемому цифровому формату, схожему с массивами информации в геномике и протеомике [4; 5]. Важнейшим экспериментальным приемом феномики является так называемое фенотипирование – сбор и анализ данных от внешних сенсоров о размере, форме, физиолого-биохимических характеристиках организма или популяции. На основе фенотипирования выявляются закономерности формирования фенотипа и особенности фенома как совокупности фенотипов в определенных условиях среды. Работы в области феномики выполняются для всех царств живых организмов, однако наиболее активно развивается феномика растений, так как растения обладают наиболее широкой гаммой фенотипических проявлений и высокой физиологической пластичностью. Стоит отметить, что фенотип – это своего рода конечный результат любой работы в области растениеводства, питомниководства, плодоводства, садоводства, ягодоводства, культивирования водорослей и др.

В настоящее время феномика растений базируется на аппаратно-программных комплексах, создаваемых как независимыми предприятиями, так и в рамках научной работы университетов и исследовательских центров [6–8]. Такие комплексы по аналогии с геномикой носят название феномных платформ и имеют принципиальные отличия как по мощности (количество анализируемых растений и скорость анализа), так и специализации (высшие травянистые или древесные растения различных размеров, водоросли) [9; 10]. В настоящей работе представлен анализ существующих данных о феномных платформах, принципах их работы, технических характеристиках, специализации и примерах решенных научных и прикладных проблем.

### Определение, устройство и принцип работы феномных платформ для анализа надземной и подземной части растения

Для автоматизированного мониторинга роста и развития растений и исследований фенотипа разработан широкий спектр феномных платформ – аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих культивирование растений в стандартизированных условиях и их неинвазивный анализ с использованием камер и сенсоров [11–17]. В большинстве случаев феномные платформы – это установки, которые состоят

из площадки для культивирования и инсталляции исследуемого образца; измерительного оборудования; систем управления сбором, хранением и обработкой информации; программного обеспечения для управления системами и анализа фенома [12; 18]. Ключевыми параметрами систем фенотипирования растений являются пропускная способность, разрешение и размерность регистрирующей аппаратуры для последующей компьютерной обработки полученной информации, наличие или отсутствие систем глубокого анализа данных с помощью методов машинного обучения и др. [19–22].

Важнейшая задача работы феномных платформ – сбор и обработка сведений о фенотипе растения на протяжении всего жизненного цикла или определенной фазы онтогенеза (см. таблицу). В случае феномных комплексов исследуемые растения чаще всего выращиваются непосредственно внутри данных комплексов, которые входят в термостатируемые теплицы, стенды, конвейеры с вегетационными сосудами или роботизированные комплексы. Современные феномные платформы используют широкий спектр передовых технических средств сбора данных о фенотипах надземной части растения: DSLR-, мульти- и гиперспектральные камеры, VIS- и NIR-сенсоры, флуориметры, компьютерные и позитронно-эмиссионные томографы, а также ряд прорывных компьютерных технологий анализа данных [15; 23]. Подземные органы растений также представляют большой интерес для исследований в области феномных технологий. В этом случае используются установки с различной степенью автоматизации и типами регистрации изображений [24], базирующиеся на особых прозрачных корневых сосудах с почвенными, водными или гелевыми субстратами. Для изучения корневой феномики растений все чаще применяются полностью неинвазивные технологии, такие как электротомография, техника электромагнитной индукции почвы, почвенные радары, построение карты распространения корней на основе рефракции и рассеивания импульсов высокочастотных радиоволн [25].

### Мировой рынок систем цифрового фенотипирования растений

Исследования, проведенные консалтинговой компанией *Markets and Markets* (Великобритания) и представленные в аналитическом отчете за 2020 г., показали, что текущий рынок базового феномного оборудования, разнообразных сенсоров для фенотипирования и программного обеспечения оценивается в 318 млн долл. США в год при прогнозируемом увеличении до 2 млрд долл. США к 2025 г. На данный момент цена высокопроизводительной платформы конвейерного типа составляет от 5 до 50 млн долл. США в зависимости от устанавливаемых датчиков и пропускной способности. Цены на стационарные платформы начинаются от 0,5 млн долл. США. Среди частных и полугосударственных производителей феномных систем можно выделить следующие крупнейшие компании: *LemnaTec* (Германия), *Photon Systems Instruments* (Чехия), *Qubit Phenomics* (дистрибьютор *Photon Systems Instruments (PSI)* в Канаде), *Phenomix* (Франция), *Phenospec* (Австралия), *Delta-T Devices Ltd.* (Великобритания), *Heinz Walz* (Германия), *WPS (We Prove Solutions)*, (Голландия), *CropDesign (Badische Anilin- & Soda-Fabrik, отделение в Бельгии)*, *Weighing, Imaging & Watering Machines (WIWAM)* (Бельгия), *Rothamsted Research* (Великобритания) и *Vienna BioCenter Core Facilities* (Австрия). На их долю приходится более 95 % всего производимого в мире феномного оборудования. Примечательно, что данные производители планируют масштабные разработки феномных платформ для работы с системами *in vitro* и *ex vitro* в ближайшее время.

Программное обеспечение для фенотипирования производится большим количеством частных компаний, исследовательских центров и отдельных специалистов в сфере информационных технологий. Наиболее подробный обзор программных продуктов и решений в области феномики приводится порталом *Plant Image Analysis*. На начало 2020 г. этим интернет-ресурсом представлены более 200 компьютерных программ и 30 баз данных для проведения феномных исследований. Корпоративные системы крупных производителей имеют собственные программные продукты с закрытым кодом. В настоящее время ведутся активные разработки систем машинного обучения (искусственных нейронных сетей) для приложений в области феномики растений, что, по ряду оценок, в ближайшее время преобразит рынок феномного программного обеспечения и определит путь дальнейших разработок в этом направлении [12; 15; 17]. Прогнозируется, что программы на базе технологий искусственных нейронных сетей со временем заменят классические системы анализа изображений [12]. Тем не менее пока готовых коммерческих продуктов на основе систем машинного обучения на рынке не представлено.

### Основные разработчики и производители феномных платформ

В настоящее время на мировом рынке феномного оборудования представлено большое количество компаний-производителей. Их работа сосредоточена на решении как фундаментальных, так и прикладных задач биологии растений, а также выпуске различных продуктов: от одиночных датчиков и сенсоров до крупномасштабных модульных систем [26–28]. Лидирующие позиции занимают компании *LemnaTec*, *PSI* и дочерние предприятия, однако многие другие платформы также пользуются спросом среди научных центров, фермерских и лесных хозяйств, питомников декоративных растений.

**Компании – производители оборудования для фенотипирования растений и характеристики основных феномных систем  
Manufacturers of equipment for plant phenotyping and characteristics of the main phenotyping systems**

| Производитель оборудования, основные платформы   | Используемое аналитическое оборудование   | Объект исследования   | Измеряемые параметры   |
|--|---|---|--|
| <b>LemmaTec</b> (Германия):<br><i>ImageAlxpert</i><br><i>PhenoAlxpert</i><br><i>HyperAlxpert</i><br><i>SeedAlxpert</i><br><i>PhenoIron</i><br><i>Scanalyzer Field</i>  | RGB-камеры, гиперспектральные, термальные, флуоресцентные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры | Растения различных форм и размеров, их популяции, плоды, семена; грибы, нематоды, личинки культуры водорослей | Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; морфология семян, структура надземной части и корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа; поражение патогенными микроорганизмами и насекомыми; архитектура корня |
| <b>Photon systems instruments</b> (Чехия):<br><i>PlantScreen Modular System</i><br><i>PlantScreen Robotic XYZ Systems</i><br><i>PlantScreen Compact Systems</i><br><i>PlantScreen Self Contained Systems</i> | RGB-камеры, гиперспектральные, термальные, флуоресцентные камеры и камеры ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры               | Небольшие травянистые растения, модельные виды, злаковые культуры   | Темпы роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; структура кроны, морфология семян, архитектура корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа, присутствие микроорганизмов и насекомых                                  |
| <b>Optimalog</b> (Франция):<br><i>Phenopsis</i>  | RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра  | Небольшие растения в условиях закрытого грунта  | Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, показатели водного статуса  |
| <b>CropDesign</b> (Бельгия):<br><i>TraitMill</i>   | RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры   | Злаковые культуры   | Показатели накопления биомассы и продуктивности, скорость роста; архитектура побега и корня, показатели водного статуса; морфология семян, структура надземных органов и корневой системы  |
| <b>Phenoscope</b> (Франция):<br><i>Phenoscope</i>  | RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра  | Травянистые растения от небольших до крупных размеров   | Темпы роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, водный статус  |
| <b>SMO</b> (Бельгия):<br><i>ИТІАМ ХУ</i><br><i>ИТІАМ Line</i><br><i>ИТІАМ Conveyor</i>   | RGB-камеры, гиперспектральные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра  | Травянистые растения от небольших до крупных размеров   | Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, показатели водного статуса; параметры фотосинтеза   |
| <b>Phenosrex</b> (Нидерланды):<br><i>DroughtSpotter</i><br><i>MicroScan</i><br><i>FieldScan</i><br><i>FieldScale</i><br><i>TraitFinder</i>   | RGB-камеры, флуоресцентные, термальные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры                    | Травянистые растения различных размеров, популяции растений   | Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; морфология семян, архитектура надземной части и корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа; поражение патогенными микроорганизмами и насекомыми                  |

**LemnaTec** (Ахен, Германия) – компания, которая является мировым лидером по цифровому фенотипированию и тестированию растений и семян. Ранние разработки систем *LemnaTec* были направлены на создание подвижных конвейерных установок, в которых емкости с субстратом и растущими в них растениями передвигались для фенотипирования в затемненные боксы с камерами, сканерами и сенсорами. Первые национальные центры исследования феномики растений (в Германии, Австралии, Великобритании и США) были созданы на базе таких систем. В дальнейшем было показано, что перемещение сосудов с растениями приводит к значительному (до 20–25 %) снижению скорости роста тестируемых растений [1]. В результате началась активная разработка и внедрение стационарных систем фенотипирования. В настоящее время *LemnaTec* выпускает широкий спектр аппаратуры для закрытых лабораторных помещений, теплиц, открытых опытных площадок и полевых условий передвижного и стационарного типов, а также участвует в производстве систем аэрофеномики.

Основой линейки продуктов *LemnaTec* являются платформы номенклатуры *Alxpert*, функционирование которых поддерживается при помощи камер и сенсоров собственного производства и программного обеспечения *LemnaLauncher*, базирующегося на подходах компьютерного зрения, модульной автоматизации и статистической обработки данных. *LemnaTec* также развивает новую платформу *PhenoTron*, в которой используются системы полного контроля среды и комплекс интегрированных камер.

**PSI** (Драсов, Чехия) – эта компания была основана как производитель высокоточных сенсоров и камер для анализа роста и физиологических характеристик растений. С 2010 г. она производит линейку устройств для фенотипирования от источников освещения и RGB-камеры до собственных высокопроизводительных феномных платформ, включая роботизированные манипуляторы, фотобиореакторы и модульные контейнерные системы для открытых площадок. В последние годы компания достигла уровня *LemnaTec* по количеству продаваемых систем и стала вторым лидером в области феномики растений в мире. Крупнейший североамериканский разработчик и продавец феномных систем *Qubit Phenomics* (Канада) недавно стал частью *PSI* и ее официальным дилером в Северной Америке. *PSI* была первой компанией, внедрившей в феномные комплексы системы получения изображений флуоресценции хлорофилла – камеры *FluorCam*, которые используют систему амплитудно-импульсной модуляции светового потока (PAM) для измерения параметров флуоресценции хлорофилла. Основные универсальные платформы – *PlantScreen Phenotyping*, *PlantScreen Robotic XYZ* и *PlantScreen Field*.

**CropDesign** (Невеле, Бельгия) – биотехнологическая компания, разрабатывающая технологические платформы для анализа проявления генетических признаков на уровне фенотипа в целях получения новых сортов кукурузы, риса и других сельскохозяйственных растений. Компания производит платформы серии *TraitMill*, сочетающие в себе автоматизированные смарт-теплицы, предназначенные для глубокого высокопроизводительного фенотипирования различных видов растений, с современными технологиями автоматического сбора данных и передовыми статистическими, биоинформационными, компьютерными подходами [29]. С помощью *TraitMill* проводится широкий спектр феномных работ по производству трансгенных растений [30].

**Optimalog** (Тур, Франция) – компания, специализирующаяся на производстве промышленных компьютеров и программного обеспечения для фенотипирования, а также с 2003 г. выпускающая феномную платформу *Phenopsis*, используемую в научных центрах Франции. Эта платформа представляет собой сложную интегрированную систему культивирования растений небольшого размера в автоматическом режиме при поддержании заданных условий среды и полива (до нескольких сотен тестируемых растений). Система автоматически производит рутинное взвешивание культивационных сосудов, а также фенотипирование в VIS- и NIR-диапазонах [31]. Компания ведет политику открытости данных и публикует все свои исследования в онлайн-режиме на сайте [bioweb.supagro.inra.fr/phenopsis/](http://bioweb.supagro.inra.fr/phenopsis/).

**Phenoscope** (Версаль, Франция) – компания, которая разрабатывает феномные платформы в целях мониторинга сотен индивидуальных культивационных сосудов с небольшими растениями в режиме реального времени и анализа морфологических показателей большого количества растений различных генетических линий [9]. Система внедрена главным образом во Франции.

**WTWAM** (Экло, Бельгия) – название серии феномных роботизированных систем, производимых компанией *SMO* и Фламандским институтом биотехнологии (Гент, Бельгия). Феномные установки имеют системы контроля внешних условий среды, капельный полив растений по заданной схеме, а также аппаратуру для автоматического получения изображений в различных спектральных диапазонах. Система позволяет производить визуализации различных параметров роста растений в онлайн-режиме.

**Phenospex** (Херлен, Нидерланды) – относительно новая биотехнологическая компания, занимающаяся созданием умных датчиков для анализа роста растений в режиме реального времени. Разработки данной фирмы применяются в области растениеводства, селекции и сельского хозяйства. Основная цель компании – создание полностью автоматизированных тепличных и полевых платформ для изучения тысяч растений одновременно.

## Лабораторные феномные платформы

Изучение растительных организмов в стандартизированных лабораторных условиях является важнейшим разделом современной феномики растений. Использование систем различного размера с полнотой контролируемых условиями среды позволяет создать идеальную модель для изучения влияния биотических и абиотических факторов и их комбинаций на растения.

**ImageAlxpert (LemnaTec)** – компактная платформа типа «система – бокс» с низкой пропускной способностью, ручной инсталляцией растений, обладающая гибкостью программной реализации и высокой точностью данных. Комплект включает в себя несколько основных элементов и опций: 1) фиксированные камеры в различных диапазонах съемки и сенсоры; 2) ручную инсталляцию растений (растения в культивационных сосудах или лотках, семена или плоды в чашках Петри или многоячеечных платах, водоросли в пробирках или стаканах); 3) программное обеспечение для изучения скорости роста, набора биомассы, изменения архитектуры растения; 4) специальное программное обеспечение для контроля процесса получения изображений, экспорта и обработки данных. Система была успешно использована для целого ряда фундаментальных и прикладных исследований. Например, детально изучена динамика фенотипических ответов  $C_4$ -растений на дефицит азота и засуху [32]; найдена группа генов, контролирующая геометрию листа пасленовых [33]; описана эффективность функционирования фотосистемы II арабидопсиса и кукурузы [34] и др.

**PhenoAlxpert** (разработана на базе *Scanalyzer HTS, LemnaTec*) – система высокоинформативного роботизированного скрининга и фенотипирования небольших растений. Выпускается в трех конфигурациях: стандартная *PhenoAlxpert* – для мелких объектов; *PhenoAlxpert Pro* – для более крупных, например культурных злаковых растений; *PhenoAlxpert Root* – для изучения корневой системы (включает в себя высокотехнологичные ризотроны). Все платформы имеют шесть автоматизированных вариантов работы роботизированных систем и несут до пяти возможных типов сенсоров. Благодаря такой вариативности система обладает возможностью инсталляции различных экспериментальных сосудов – от чашек Петри, многоячеечных плат и лотков до цветочных горшков, а также специализируется на исследованиях не только растений, но и грибов, насекомых, мелких водных и наземных животных, например нематод и личинок комаров. Она обладает возможностью исследования влияния светового цикла, движения объектов, а также анализа живых клеток с использованием программного обеспечения *Lemna Launcher*. К одним из наиболее значимых исследований с применением версий данной системы можно отнести выявление механизма поддержания покоя зерен пшеницы под действием гиббереллинов [35].

**HyperAlxpert** (разработана на базе *Phenocenter, LemnaTec*) – лабораторная мультисенсорная феномная платформа на основе крупных конвейеров, способная исследовать до тысячи растений. Конвейеры оборудуются боксами для фотосъемки, количество сенсоров в которых может достигать шести, в числе которых, например, лазерный сканер, флуоресцентные камеры и NIR-камеры. Основная функция – получение высокоточных данных для «расшифровки» феномов растений. Данная платформа является основой в большинстве феномных центров мира и упоминается в наибольшем количестве статей по феномике растений [11–13]. С использованием этой платформы, например, проведено глубокое исследование механизмов поддержания водного потенциала листа злаков [36], а также создана уникальная технология оценки эффективности фотосинтеза различных видов растений [37].

**SeedAlxpert (LemnaTec)** – модульная система для анализа показателей прорастания и всхожести семян в автоматическом режиме. Комплекс приспособлен для оценки как простейших морфологических параметров семян (размеры, форма, окраска, длина корня и гипокотилия), так и более сложных и комплексных (количество проросших семян, скорость прорастания, гомогенность, наличие или отсутствие болезней, посторонних объектов).

**PhenoTron (LemnaTec)** – комбинированная платформа, объединяющая ростовую камеру и бокс фенотипирования. Она сочетает в себе возможности регистрации и обработки феномных данных с преимуществами полного климат-контроля и отсутствия передвижения объектов исследования. Система предназначена для изучения небольших растений, семян, отдельных листовых пластинок, плодов, корней, а также рясок и насекомых. Ключевой элемент – камера роста – поддерживает стабильные условия с температурой от 15 до 40 °C ( $\pm 3$  °C), оснащена 16 независимыми группами LED-источников освещения с длинами волн от 350 до 850 нм и цифровой RGB-камерой, что позволяет регистрировать такие параметры, как количество элементов, их размер, морфологию и цветные особенности.

**PlantScreen Modular System (PSI)** – система, которая является флагманом линейки платформ *PSI* и обладает наибольшей производительностью. Это модульная конвейерная скрининговая установка, позволяющая контролировать множество характеристик роста и развития растений, реакции на биотические и абиотические стрессоры. Система включает фототермографическое оборудование, аппаратуру для 3D-реконструкции, гиперспектральной съемки, NIR-имиджинга, морфометрического анализа и RGB-

анализа, визуализации флуоресценции хлорофилла, а также аппаратуру для взвешивания и полива растений. Возможности *PlantScreen Modular System* позволили впервые обнаружить и детально описать динамику изменения флуоресценции хлорофилла в листьях арабидопсиса в ответ на дефицит влаги [7].

***PlantScreen Robotic XYZ Systems*** – стационарная система *PSI*, представляющая большой интерес для исследователей. Она включает в себя все типы доступных сенсоров и камер и способна высокоточно перемещаться в 3D-режиме в пределах объемной площадки размерами  $4,5 \times 4,5 \times 4,0$  м в стандартном исполнении. Система позволяет производить детальное изучение растений на площадке, находящихся в любых емкостях и имеющих разнообразные геометрические параметры в пределах сканируемого объема. Эта система является модульной и может адаптироваться под конкретные цели. Примером ее использования являются работы по выявлению особенностей объемного распределения листьев в розетках у растений арабидопсиса в зависимости от стрессовых условий [38], а также по установлению взаимосвязей между засолением, флуоресценцией хлорофилла и продуктивностью нескольких сортов латука посевного [39].

***PlantScreen Compact Systems (PSI)*** – интегрированная роботизированная платформа для мелко- и среднемасштабного фенотипирования небольших растений, например арабидопсиса, клубники, сои, табака, при помощи широкого арсенала сенсоров (RGB-, NIR-, термо-, гиперспектральных камер, 3D-сканеров). Растения культивируются в открытых индивидуальных сосудах, *in vitro* или в многоячеечных кассетах. Системы снабжены функцией управления условиями среды: интенсивностью и качеством света, температурой, влажностью и др.

***PlantScreen Self Contained Systems (PSI)*** – компактный автономный и автоматизированный комплекс, разработанный для изучения одиночных растений высотой не более 50 см, выращиваемых в почве или *in vitro*. Горшок вручную помещается в светоизолированный феномный бокс с полностью контролируемыми условиями, где проводится автоматический сбор и анализ данных с одного или нескольких перечисленных выше сенсоров *PSI* через заданные пользователем интервалы времени.

***PlantEye F500*** – основной продукт компании *Phenospex*. Представляет собой четырехканальный мультиспектральный 3D-сканер высокого разрешения (400–900 нм), адаптированный для фенотипирования растений. *PlantEye* объединяет в себе подходы 3D-моделирования и спектрального имиджинга, что позволяет автоматически рассчитывать спектр морфологических параметров растений, таких как высота растения, площадь листовой поверхности, биомасса, глубина проникновения света и др., и визуализировать полученную информацию в виде трехмерного облака точек. Сканер используется во всех платформах компании – лабораторных и тепличных комплексах *MicroScan* и *TraitFinder*, системе *DroughtSpotter* – для изучения влияния засухи на одиночных растениях, а также крупных полевых комплексах *FieldScan* и *FieldScale*, представляющих собой рельсовую платформу изучения растений в естественных условиях обитания и высокопроизводительный прецизионный комплекс измерения скорости транспирации соответственно. Все платформы *Phenospex* оснащены также специализированным программным обеспечением *HortControl*, позволяющим модулировать схему эксперимента, контролировать условия среды, а также визуализировать и анализировать феномные данные с датчиков и сенсоров.

***WIWAM XY (WIWAM)*** – комплекс лабораторного фенотипирования, основная функция которого состоит в изучении физиологических процессов у растений арабидопсиса, других мелких растений или саженцев в уже существующей ростовой камере. Система является модульной и высокоточной, включает роботизированный манипулятор, системы взвешивания и полива. Для неинвазивного имиджинга может быть использован широкий спектр сенсоров, подбор которых осуществляется исходя из целей конкретного исследования. Использование этой платформы продемонстрировало, что более высокая выживаемость растений арабидопсиса в условиях сильной засухи по сравнению с умеренной связана с постоянной активацией влагосберегающих механизмов, таких как закрытие устьиц, однако темпы роста выше у растений при умеренной засухе [40].

***WIWAM Line*** – платформа, которую производит компания *SMO* для высокопроизводительного фенотипирования небольших стеблевых растений. Комплекс включает в себя несколько линий для позиционирования культивационных сосудов, базовый робот-портал и станцию для полива и взвешивания экспериментальных образцов. Изображения регистрируются под разными углами.

***WIWAM Conveyor*** – роботизированное решение для фенотипирования крупных растений, таких как кукуруза, в тепличных условиях. Комплекс состоит из транспортной системы, объединяющей растения с несколькими станциями взвешивания и полива и феномными боксами, несущими ряд неинвазивных имидж-сенсоров.

***Phenoscope*** – станции взвешивания и полива платформ, позволяющие контролировать и регулировать количество воды и питательных веществ в соответствии со сценарием, заданным пользователем и определенным для каждого горшка в отдельности, а станции имиджинга предназначены для неинвазивного

фенотипирования в VIS- и IR-диапазонах. Наиболее значимым исследованием, проведенным при помощи платформы *Phenoscope* [41], является разработка метода генотипической дифференциации растений *Arabidopsis thaliana* посредством сегментации и отслеживания ростовых движений листьев.

### Системы полевой феномики

В последнее десятилетие технологии высокопроизводительного полевого фенотипирования (ВППФ) значительно расширили возможности по мониторингу и количественной оценке полевых экспериментов и питомниководства. Преимущества этих технологий в том, что они не только заменяют утомительные и субъективные процедуры оценки более быстрыми и дешевыми методами, но и раскрывают потенциал новых фенотипов, представляющих интерес как для изучения их физиологической основы, так и практического использования.

Достижения ВППФ предоставили качественно новую возможность для синхронизированного отслеживания роста и развития большого количества растений в течение всего онтогенеза с высоким пространственным и временным разрешением, ранее недоступным [42]. Объединение этих данных с информацией об окружающей среде и ее динамике позволяет оценивать специфические для отдельного генотипа нормы реакции и фенотипическую пластичность, тем самым улучшая понимание взаимодействия между генотипом, окружающей средой и агротехническими мероприятиями [43; 44]. Далее будут рассмотрены возможности основных современных платформ для ВППФ.

В настоящее время на наиболее распространенных полевых платформах используются наземные колесные или воздушные транспортные средства, в которых применяются датчики нескольких типов для измерения характеристик растений в масштабе времени, составляющем несколько секунд на участок [45].

**Scanalyzer Field (LemnaTec)** – комплекс оборудования для фенотипирования в полевых условиях, предназначенный для автоматического сбора данных о росте, морфологии и физиологическом состоянии растений. Основа комплекса представлена рельсовой системой шириной до 15 м, по которой передвигается арочная конструкция с уникальным роботизированным манипулятором, фиксирующим и перемещающим к тестируемым растениям сенсорную головку. Сенсорная часть включает в себя RGB-датчик для цветового и морфологического анализа, термальную камеру для анализа работы устьичного аппарата и содержания воды, мультиспектральную камеру для повышения информативности анализа физиологического состояния, флуориметр для измерения интенсивности флуоресценции хлорофилла, системы лазерного сканирования для 3D-реконструкции растений в поле, датчики для анализа содержания азота, диоксида углерода, температуры, освещенности, ветра, количества осадков и др.

По сравнению с феномным оборудованием для закрытых помещений наружные измерительные системы приспособлены к изменчивым параметрам окружающей среды. Метеоданные могут быть получены с помощью интернета; анализируя их, *Scanalyzer Field* может самостоятельно защититься от неблагоприятных погодных условий. Существует два возможных варианта сборки системы *Scanalyzer Field*. Для вытянутых полей на ровных площадках имеется крановая система в виде буквы П, устанавливаемая на рельсы. С ее помощью могут исследоваться несколько сотен квадратных метров поля. Другой вариант сборки – так называемый полевой портал, который представляет собой стойку с мостом на монорельсовой платформе. Головка с сенсорами крепится с помощью подвижного кронштейна, чтобы иметь возможность опуститься для боковой съемки. Полевой портал подходит для применения практически в любых условиях и на различных размерах поля. Обе конструкции *Scanalyzer Field* являются настраиваемыми и позволяют производить фенотипирование зерновых культур, небольших деревьев и других растений высотой до 10 м в поле или специализированных контейнерах. Широкие возможности данных систем обеспечили им активное применение в исследованиях физиологии полевых культур. Так, они использовались при изучении ключевых стадий развития пшеницы – цветения и колошения [46], в исследованиях архитектуры побегов, развития стрессовых реакций, а также для выявления закономерностей формирования фенотипа у растений с известным генотипом и системами регуляции процессов дыхания и фотосинтеза [47; 48].

Полевая система **PlantScreen Field** компании *PSI* схожа с аналогом компании *LemnaTec*. Она имеет такие же сенсорные приборы, однако, по ряду оценок, данная система у *PSI* отличается лучшим качеством изображений флуоресцентных имиджей, а также стандартизацией регистрации измерений флуоресценции хлорофилла. Изобретение компании *PSI* также имеет схожую с *LemnaTec* систему серверов различного уровня, высокоэффективную систему контроля процессов систематизации и аннотации данных, радиомаркирования и т. д. Данные, полученные этой платформой [49], позволили детально описать механизм холодоустойчивости гороха.

**FieldScan (Phenospex)** – платформа высокопроизводительного фенотипирования в полевых условиях, функционирующая в режиме 24/7 с пропускной способностью до 5 тыс. растений в час. Центральным элементом платформы является уникальный многокомпонентный кран мостового типа, так называемое

устройство – носитель датчиков (*sensor carrier device, SCD*), обеспечивающее перемещение сенсоров, датчиков, системы полива и другого оборудования, расположенного над растениями. Такая конструкция позволяет SCD не затенять растения и проводить измерения со следующими характеристиками: ширина полосы сканирования – до 50 м, длина – до 500 м, скорость движения SCD – до 15 м/мин, скорость сканирования – 3 м/мин. Для увеличения пропускной способности оборудования может быть использовано несколько сканеров, установленных параллельно. Для исключения погрешности из-за различий в микроклимате на различных участках поля (например, так называемые краевые эффекты) *Phenospex FieldScan* снабжена целой системой сенсоров для измерения температуры и относительной влажности воздуха, фотосинтетически активной радиации, скорости и направления ветра, количества осадков.

### Аэрофеномика

Активно развивающимся в последние годы подходом для быстрого и неразрушающего фенотипирования с высокой пропускной способностью является использование платформ дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов – аэрофеномики. Такие аппараты оснащаются различными сенсорами и системами стабилизации фотосъемки [50]. Беспилотные летательные аппараты становятся доступным и эффективным инструментом феномики сельскохозяйственных и лесных культур благодаря снижению стоимости и постоянно увеличивающейся гибкости в комплектации и удобстве управления [51; 52].

Беспилотники могут использоваться для выполнения автономных задач с применением оборудования радиуправления и системы автоматического управления, которые можно разделить на несколько типов в зависимости от режима полета [53]. В качестве сенсоров обычно используются цифровые и мульти-спектральные камеры, гиперспектральные датчики, инфракрасные тепловизоры, а также системы обнаружения и измерения освещенности (LIDAR). Это позволяет изучить как геометрические характеристики (высота растений, форма и размеры отдельных органов), так и физиологические (биомасса, качественный и количественный пигментный состав, показатели фотосинтеза, дыхания и транспирации, урожайность), а также индикаторы стресса (устычная проводимость, динамика температуры растительного покрова, водный потенциал листа) и др. [54].

С помощью платформ дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов произведено несколько десятков исследовательских работ за последние 3 года [55–57]. Чаще всего исследовались злаковые культуры с помощью цифровых и термальных камер. Стоит отметить наиболее важные исследования динамики фенотипа твердой пшеницы под действием водного дефицита и засухи [58], влияния азотного питания на урожайность гибридов ячменя [59], сезонной динамики площади листьев у различных линий сорго [60]. Широкий интерес вызывают также разработки феномной модели динамики продуктивности сорго [61] и анализ стрессового ответа черного тополя [62].

### Заключение

Проведенный анализ данных показал, что в настоящее время в мире существует широкий спектр феномных платформ, которые производятся десятками компаниями и научными центрами. Наиболее широко представлены феномные платформы компаний *LemnaTec* и *PSI*, которыми развиты конвейерные и стационарные системы, такие как *Phenocenter* и *PlantScreen Robotic XYZ Systems*. В последние годы широкое применение нашли модульные и компактные системы, которые используются для оценки морфологических и физиологических параметров семян в небольших выборках, фенотипирования растений средних размеров в сосудах *in vitro* или в открытых кассетах. Активно развивается также направление полевой феномики на сельскохозяйственных угодьях, садовых, парковых и лесных площадках как с помощью стационарных конструкций, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (аэрофеномика). В системы специализированного программного обеспечения все чаще внедряются новые компьютерные технологии, такие как машинное обучение, которые обеспечивают повышение точности измерений и эффективности многофакторных фенотипических анализов.

### Библиографические ссылки / References

1. Furbank RT, Tester M. Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*. 2011;16(12): 635–644. DOI: 10.1016/j.tplants.2011.09.005.
2. Yang W, Feng H, Zhang X, Zhang J, Doonan JH, Batchelor WD, et al. Crop phenomics and high-throughput phenotyping: past decades, current challenges and future perspectives. *Molecular Plant*. 2020;13:187–214. DOI: 10.1016/j.molp.2020.01.008.
3. Demidchik VV, Shashko AY, Bondarenko VYu, Smolikova GN, Przheval'skaya DA, Chernysh MA, et al. *Fenomika rastenii: fundamental'nye osnovy, programmno-apparatnye platformy i metody mashinnogo obucheniya* [Plant phenomics: fundamental principles, software and hardware platforms and machine learning methods.]. *Fiziologiya rastenii*. 2020;67(3):227–245. DOI: 10.31857/S0015330320030069.

4. Zhou J, Tardieu F, Pridmore T, Doonan JH, Reynolds D, Hall N, et al. Plant phenomics: history, present status and challenges. *Journal of Nanjing Agricultural University*. 2018;41(4):580–588. DOI: 10.7685/jnau.201805100.
5. Tardieu F, Cabrera-Bosquet L, Pridmore T, Bennett M. Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*. 2017;27(15):R770–R783. DOI: 10.1016/j.cub.2017.05.055.
6. Coppens F, Wuyts N, Inze D, Dhondt S. Unlocking the potential of plant phenotyping data through integration and data-driven approaches. *Current Opinion in Systems Biology*. 2017;4:58–63. DOI: 10.1016/j.coisb.2017.07.002.
7. Mishra KB, Mishra A, Klem K, Govindjee G. Plant phenotyping: a perspective. *Indian Journal of Plant Physiology*. 2016;21(4):514–527. DOI: 10.1007/s40502-016-0271-y.
8. Golbach F, Kootstra G, Damjanovic S, Otten G, van de Zedde R. Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping. *Machine Vision and Applications*. 2016;27:663–680. DOI: 10.1007/s00138-015-0727-5.
9. Tisne S, Serrand Y, Bach L, Gilbault E, Ben Ameer R, Balasse H, et al. Phenoscope: an automated large-scale phenotyping platform offering high spatial homogeneity. *Plant Journal*. 2013;74(3):534–544. DOI: 10.1111/tpj.12131.
10. Kikkawa M, Fujita S, Matsuo T, Ishiura M. High-throughput phenotyping of *Chlamydomonas* swimming mutants based on nanoscale video analysis. *Biophysical Journal*. 2014;107(2):336–345. DOI: 10.1016/j.bpj.2014.05.033.
11. Li L, Zhang Q, Huang D. A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*. 2014;14(11):20078–20111. DOI: 10.3390/s141120078.
12. Singh A, Ganapathysubramanian B, Sarkar S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in Plant Science*. 2016;21:110–124. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.10.015.
13. Berry JC, Fahlgren N, Pokorny AA, Bart RS, Velej KM. An automated, high-throughput method for standardizing image color profiles to improve image-based plant phenotyping. *PeerJ*. 2018;6:1–12. DOI: 10.7717/peerj.5727.
14. Perez-Sanz F, Navarro PJ, Egea-Cortines M. Plant phenomics: an overview of image acquisition technologies and image data analysis algorithms. *Gigascience*. 2017;6(11):1–18. DOI: 10.1093/gigascience/gix092.
15. Zhang J, Naik HS, Assefa T, Sarkar S, Chowda Reddy RV, Singh A, et al. Computer vision and machine learning for robust phenotyping in genome-wide studies. *Scientific Reports*. 2017;7:1–11. DOI: 10.1038/srep44048.
16. Czedik-Eysenberg A, Seitner S, Guldener U, Koemeda S, Jez J, Colombini M. The «PhenoBox», a flexible, automated, open-source plant phenotyping solution. *The New Phytologist*. 2018;219(2):808–823. DOI: 10.1111/nph.15129.
17. Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Sarkar S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2018;115:4613–4618. DOI: 10.1073/pnas.1716999115.
18. Roupael Y, Spichal L, Panzarova K, Casa R, Colla G. High-throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: from lab to field or from field to lab? *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1–6. DOI: 10.3389/fpls.2018.02297.
19. Dhondt S, Wuyts N, Inze D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. *Trends in Plant Science*. 2013;18(8):428–439. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.04.008.
20. Granier C, Vile D. Phenotyping and beyond: modeling the relationships between traits. *Current Opinion in Plant Biology*. 2014;18:96–102. DOI: 10.1016/j.pbi.2014.02.009.
21. Ghanem ME, Marrou H, Sinclair TR. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*. 2015;20(3):139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.
22. Fahlgren N, Gehan MA, Baxter I. Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology*. 2015;24:93–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.02.006>.
23. Roitsch T, Cabrera-Bosquet L, Fournier A, Ghamkhar K, Jimenez-Berni J, Pinto F. Review: new sensors and data-driven approaches – a path to next generation phenomics. *Plant Science*. 2019;282:2–10. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.01.011.
24. Pound MP, Atkinson JA, Townsend AJ, Wilson MH, Griffiths M, Jackson AS. Erratum to: Deep machine learning provides state-of-the-art performance in image-based plant phenotyping. *Gigascience*. 2018;7(7):1–9. DOI: 10.1093/gigascience/giy042.
25. Finkel E. With «phenomics» plant scientists hope to shift breeding into overdrive. *Science*. 2009;325:380–381. DOI: 10.1126/science.325\_380.
26. Humpik JF, Lazar D, Husickova A, Spichal L. Automated phenotyping of plant shoots using imaging methods for analysis of plant stress responses – a review. *Plant Methods*. 2015;11:1–10. DOI: 10.1186/s13007-015-0072-8.
27. Pratar A, Tomar R, Kumar J. High-throughput plant phenotyping platforms. In: *Phenomics in crop plants: trends, options and limitations*. New Delhi: Springer; 2015. DOI: 10.1007/978-81-322-2226-2\_19.
28. Fiorani F, Schurr U. Future scenarios for plant phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*. 2013;64:267–291. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050312-12013.
29. Reuzeau C. TraitMill (TM): a high throughput functional genomics platform for the phenotypic analysis of cereals. *In Vitro Cellular & Developmental Biology*. 2007;43:1–8.
30. Reuzeau C, Pen J, Frankard V, de Wolf J, Peerbolte R, Broekaert W, et al. TraitMill: a discovery engine for identifying yield-enhancement genes in cereals. *Plant Gene and Trait*. 2010;1(1). DOI: 10.5376/pgt.2010.01.0001.
31. Fabre J, Dauzat M, Negre V, Granier C. Phenopsis DB: an information system for *Arabidopsis thaliana* phenotypic data in an environmental context. *BMC Plant Biology*. 2011;11:1–7. DOI: 10.1186/1471-2229-11-77.
32. Neilson EH, Edwards AM, Blomstedt CK, Berger B, Lindberg Moller B, Gleadow RM. Utilization of a high-throughput shoot imaging system to examine the dynamic phenotypic responses of a C4 cereal crop plant to nitrogen and water deficiency over time. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(7):1817–1832. DOI: 10.1093/jxb/eru526.
33. Coneva V, Frank MH, de Luis Balaguer MA, Li M, Sozzani R, Chitwood DH. Genetic architecture and molecular networks underlying leaf thickness in desert-adapted tomato *Solanum pennellii*. *Plant Physiology*. 2017;175(1):376–391. DOI: 10.1104/pp.17.00790.
34. Tschiersch H, Junker A, Meyer RC, Altman T. Establishment of integrated protocols for automated high throughput kinetic chlorophyll fluorescence analyses. *Plant Methods*. 2017;13:1–16. DOI: 10.1186/s13007-017-0204-4.
35. Van De Velde K, Chandler PM, Van Der Straeten D, Rohde A. Differential coupling of gibberellin responses by Rht-B1c suppressor alleles and Rht-B1b in wheat highlights a unique role for the DELLA N-terminus in dormancy. *Journal of Experimental Botany*. 2017;68(3):443–455. DOI: 10.1093/jxb/erw471.
36. Fahlgren N, Feldman M, Gehan MA, Wilson MS, Shyu C, Bryant DW, et al. A Versatile phenotyping system and analytics platform reveals diverse temporal responses to water availability in *Setaria*. *Molecular Plant*. 2015;8(10):1520–1535. DOI: 10.1016/j.molp.2015.06.005.

37. Cabrera-Bosquet L, Fournier C, Bricchet N, Welcker C, Suard B, Tardieu F. High-throughput estimation of incident light, light interception and radiation-use efficiency of thousands of plants in a phenotyping platform. *New Phytologist*. 2016;212:269–282. DOI: 10.1111/nph.14027.
38. De Diego N, Furst T, Humplik JF, Ugena L, Podlesakova K, Spichal L. An automated method for high-throughput screening of *Arabidopsis* rosette growth in multi-well plates and its validation in stress conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1702. DOI: 10.3389/fpls.2017.01702.
39. Adhikari ND, Simko I, Mou B. Phenomic and physiological analysis of salinity effects on lettuce. *Sensors*. 2019;19(21):1–25. DOI: 10.3390/s19214814.
40. Skiryecz A, Vandenbroucke K, Clauw P, Maleux K, De Meyer B, Dhondt S, et al. Survival and growth of *Arabidopsis* plants given limited water are not equal. *Nature Biotechnology*. 2011;29(3):212–214. DOI: 10.1038/nbt.1800.
41. Viaud G, Loudet O, Cournede PH. Leaf segmentation and tracking in *Arabidopsis thaliana* combined to an organ-scale plant model for genotypic differentiation. *Frontiers in Plant Science*. 2017;7:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2016.02057.
42. Perich G, Hund A, Anderegg J, Roth L, Boer MP, Walter A, et al. Assessment of multi-image unmanned aerial vehicle based high-throughput field phenotyping of canopy temperature. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:1–17. DOI: 10.3389/fpls.2020.00150.
43. Bukowiecki J, Rose T, Ehlers R, Kage H. High-throughput prediction of whole season green area index in winter wheat with an airborne multispectral sensor. *Frontiers in Plant Science*. 2020;10:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2019.01798.
44. Prey L, Hu Y, Schmidhalter U. High-throughput field phenotyping traits of grain yield formation and nitrogen use efficiency: optimizing the selection of vegetation indices and growth stages. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1–20. DOI: 10.3389/fpls.2019.01672.
45. Zhang C, Kovacs JM. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*. 2012;13:693–712. DOI: 10.1007/s11119-012-9274-5.
46. Sadeghi-Tehran P, Sabermanesh K, Virlet N, Hawkesford MJ. Automated method to determine two critical growth stages of wheat: heading and flowering. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2017.00252.
47. Virlet N, Sabermanesh K, Sadeghi-Tehran P, Hawkesford M. Field Scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Functional Plant Biology*. 2016;44(1):143–153. DOI: 10.1071/FP16163.
48. Cendrero-Mateo MP, Muller O, Albrecht H, Burkart A, Gatzke S, Janssen B, et al. Field phenotyping: challenges and opportunities. In: Chabbi A, Loescher HW, editors. *Terrestrial ecosystem research infrastructures*. Boca Raton: CRC Press; 2017. DOI: 10.1201/9781315368252-4.
49. Humplik JF, Lazar D, Furst T, Husickova A, Hybl M, Spichal L. Automated integrative high-throughput phenotyping of plant shoots: a case study of the cold-tolerance of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Methods*. 2015;11:1–11. DOI: 10.1186/s13007-015-0063-9.
50. Yang G, Liu J, Zhao C, Li Z, Huang Y, Yu H, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–26. DOI: 10.3389/fpls.2017.01111.
51. Ballesteros R, Ortega JF, Hernandez D, Moreno MA. Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part I: Description of image acquisition and processing. *Precision Agriculture*. 2014;15(6):579–592. DOI: 10.1007/s11119-014-9355-8.
52. Candiago S, Remondino F, De Gligo M, Dubbini M, Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*. 2015;7(4):4026–4047. DOI: 10.3390/rs70404026.
53. Sankaran S, Khot LR, Espinoza CZ, Jarolmasjed S, Sathuvalli VR, Vandemark GJ, et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review. *European Journal of Agronomy*. 2015;70:112–123. DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
54. Araus JL, Cairns JE. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*. 2014;19(1):52–61. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.09.008.
55. Cobb JN, Declerck G, Greenberg A, Clarck R, McCouch S. Next-generation phenotyping: requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement. *Theoretical and Applied Genetics*. 2013;126(4):867–887. DOI: 10.1007/s00122-013-2066-0.
56. Kirchgessner N, Liebisch F, Yu K, Pfeifer J, Friedli M, Hund A. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multi-sensor system. *Functional Plant Biology*. 2016(44):154–168. DOI: 10.1071/F.P.16165.
57. Gevaert C, Suomalainen J, Tang J, Kooistra L. Generation of spectral-temporal response surfaces by combining multispectral satellite and hyperspectral UAV imagery for precision agriculture applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015;1(6):1–9. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2406339.
58. Kyratzis AC, Skarlatos DP, Menexes GC, Vamvakousis VF, Katsiotis A. Assessment of vegetation indices derived by UAV imagery for durum wheat phenotyping under a water limited and heat stressed mediterranean environment. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2017.01114.
59. Kefauver SC, Vicente R, Vergara-Diaz O, Fernandez-Gallego JA, Kerfal S, Lopez A, et al. Comparative UAV and field phenotyping to assess yield and nitrogen use efficiency in hybrid and conventional barley. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–15. DOI: 10.3389/fpls.2017.01733.
60. Potgieter AB, George-Jaeggli B, Chapman SC, Laws K, Suarez Cadavid LA, Wixted J, et al. Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–11. DOI: 10.3389/fpls.2017.01532.
61. Watanabe K, Guo W, Arai K, Takashi H, Kajiya-Kanegae H, Kobayashi M, et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–11. DOI: 10.3389/fpls.2017.00421.
62. Ludovisi R, Tauro F, Salvati R, Khoury S, Scarascia GM, Harfouche A. UAV-based thermal imaging for high-throughput field phenotyping of black poplar response to drought. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–18. DOI: 10.3389/fpls.2017.01681.

УДК 57.041

## БИОРИТМОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА У ДЕВУШЕК

М. В. ШИНКЕВИЧ<sup>1)</sup>, К. М. ЛЮЗИНА<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Кнорина, 1, 220049, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Результаты исследования показали, что вегетативный тонус нервной системы в разные фазы менструального цикла различается. Направление изменений параметров variability сердечного ритма (ВСР) позволяет сделать вывод о преобладании тонуса либо симпатического, либо парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС) в каждую фазу цикла, выделить подгруппы студенток по распределению тонуса ВНС по ходу цикла. Удалось выявить те показатели ВСР, которые изменялись наиболее синхронно (показатели ритмограммы, гистограммы и скаттерограммы), т. е. лучше всего характеризовали динамику тонуса ВНС в каждой из подгрупп. Показатели спектрограммы отличались наибольшей асинхронностью изменений, поэтому для анализа ВСР во время цикла не очень удобны. Показатели автокоррелограммы отражают взаимосвязь и преобладание одного из контуров регуляции сердечного ритма (центрального или автономного). Несмотря на то что прослеживается определенная динамика, достоверные различия были отмечены лишь для некоторых показателей в каждой из подгрупп. Также далеко не все показатели ВСР в подгруппах соответствуют норме, приведенной в литературе, во все фазы цикла, что, на наш взгляд, требует уточнения.

**Ключевые слова:** variability сердечного ритма; электрокардиограмма; менструальный цикл.

## HEART RATE VARIABILITY IN HEALTHY VOLUNTEERS

M. V. SHINKEVICH<sup>a</sup>, K. M. LIUZINA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Graduate School of the National Academy of Sciences of Belarus,  
1 Knoryna Street, Minsk 220049, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus  
Corresponding author: K. M. Liuzina (liuzina@bsu.by)

The research results showed that the vegetative tone of the nervous system in different phases of the menstrual cycle is different. In accordance with changes in heart rate (HRV) indicators, we can talk about the predominance of tone of either the sympathetic or parasympathetic department of the autonomic nervous system in each phase of the cycle, to distinguish

### Образец цитирования:

Шинкевич МВ, Люзина КМ. Биоритмологические особенности variability сердечного ритма у девушек. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;2:26–36.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-26-36>

### For citation:

Shinkevich MV, Liuzina KM. Heart rate variability in healthy volunteers. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2020;2:26–36. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-26-36>

### Авторы:

**Марина Владимировна Шинкевич** – магистрант кафедры естественно-научных дисциплин и информационных технологий. Научный руководитель – доктор биологических наук, доцент М. Н. Шаптуренко.  
**Ксения Михайловна Люзина** – кандидат биологических наук; доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета.

### Authors:

**Marina V. Shinkevich**, master's degree student at the department of natural sciences and information technologies.  
[m.shinkevich@jgc.by](mailto:m.shinkevich@jgc.by)  
<https://doi.org/0000-0002-4563-6526>  
**Kseniya M. Liuzina**, PhD (biology); associate professor at the department of human and animal physiology, faculty of biology.  
[liuzina@bsu.by](mailto:liuzina@bsu.by)  
<https://doi.org/0000-0002-7565-2252>

subgroups of students by the distribution of the tone of the autonomic nervous system during the cycle. It was possible to isolate those HRV indicators that were changed most synchronously (rhythmogram, histogram, and scatterogram indices). The spectrogram indices are distinguished by the highest asynchrony of changes; therefore, it is not very convenient to analyze changes during a cycle. Autocorrelation indicators reflect the relationship and the predominance of one of the circuits of heart rhythm regulation (central or autonomous). Despite the fact that a certain dynamic of changes can be traced, significant differences were noted only for some indicators in each of the groups. HRV indicators in accordance with the standards given in the literature should be clarified.

**Keywords:** heart rate variability; electrocardiogram; menstrual cycle.

## Введение

Абсолютно все органы и системы нашего организма находятся под постоянным нервно-гуморальным контролем. Тесное взаимодействие симпатического и парасимпатического отделов нервной системы, а также гуморальных факторов обеспечивает оптимальный уровень адаптации организма к изменяющимся условиям окружающей среды [1]. Изменение ритма сердца – универсальная реакция организма на любое эндо- или экзогенное воздействие. Оно характеризует баланс между тонусом симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы (ВНС). Менструальный цикл женщины предоставляет уникальную возможность исследовать естественное циклическое изменение функций организма под действием меняющегося гормонального статуса. Во время менструального цикла модулируются двигательные и психические функции, реакции, связанные с терморегуляцией, а также вегетативный статус. Устойчивый интерес к исследованию различных функций женского организма связан с тем, что конкретная фаза цикла может оказаться оптимальной для достижения наилучшей спортивной формы, а также стать фактором, который определяет силу, выносливость, утомляемость, координацию движений, энергетический метаболизм и риск получения травмы [2]. Несмотря на то что влияние циклического изменения уровня гормонов на репродуктивную систему изучено достаточно хорошо, эффекты его воздействия на другие системы органов, в частности на сердечно-сосудистую систему, до конца не исследованы [3–6]. В последнее время для анализа состояния сердечно-сосудистой системы в разные фазы цикла применяют метод вариабельности сердечного ритма (ВСР), так как он является более точным, чем измерение частоты сердечных сокращений и артериального давления. Однако, несмотря на преимущества метода ВСР, результаты исследований в имеющихся работах различаются. Актуальность изучения закономерностей ВСР у женщин в разные фазы цикла связана с тем, что в научной литературе накоплено недостаточное количество данных по этому вопросу. В основном в ней представлены нормальные значения показателей ВСР для мужчин.

Целью настоящей работы является изучение функционального состояния сердечно-сосудистой системы и ВНС у студенток в разные фазы менструального цикла (менструальную, фолликулиновую и лютеиновую).

## Материалы и методы исследования

В исследовании принимали участие 10 девушек в возрасте от 19 до 22 лет (средний возраст испытуемых –  $19,8 \pm 0,8$  года) с регулярным циклом. До начала исследования в течение 1 года девушки вели дневники менструальных циклов, в которых отмечали длительность менструации, день овуляции и продолжительность цикла в целом. На основании этих данных был сделан вывод, что средняя продолжительность цикла у испытуемых составляет  $28 \pm 3$  дня, длительность менструации –  $5 \pm 1$  день.

В работе рассмотрены изменения параметров ВСР у девушек во время трех фаз менструального цикла. Исследование проводилось в первой половине дня (до 12 ч) в тихой затемненной комнате не ранее чем через 1 ч после приема пищи. Испытуемые предварительно не подвергались физическим или психоэмоциональным нагрузкам. Запись электрокардиограммы (ЭКГ) выполнялась в положении сидя. Регистрация ЭКГ осуществлялась с использованием программы *HC-Психотест.NET*.

Для оценки параметров ВСР применялись геометрический, временной, спектральный и автокорреляционный методы анализа.

Обработка полученных данных проводилась в программе *STATISTICA*, при этом использовался критерий Фридмана [7] – непараметрический статистический метод, который применяется для анализа повторных измерений, связанных с одним и тем же индивидуумом, т. е. анализировалось изменение показателей ВСР по фазам (различия считаются значимыми при  $p < 0,05$ ).

### Результаты и их обсуждение

К наиболее важным маркерам активности ВНС относят вариабельность кардиоинтервалов. Максимальный разброс R – R-интервалов, известный как дыхательная синусовая аритмия, свидетельствует о повышении тонуса блуждающих нервов. Выраженность высокочастотных колебаний сердечного ритма говорит о вагусных механизмах регуляции. С симпатическим сегментарным и надсегментарным, а также гуморальным влиянием на деятельность сердца связаны более медленные низкочастотные R – R-интервалы. Их относят к недыхательной синусовой аритмии. Согласно данным А. М. Вейна, «кратковременные изменения вариабельности R – R быстро возвращаются к исходному уровню после нагрузок и завершения действия лекарственных препаратов. Стабильные показатели R – R держатся месяцы и даже годы, поэтому могут использоваться для оценки вегетативного тонуса» [8, с. 58].

Способность синусового узла к концентрации ритма характеризуют показатели RMSSD (квадратный корень из среднего квадратов разностей величин последовательных пар нормальных R – R-интервалов, или так называемых NN-интервалов) и pNN50 (процент последовательных NN-интервалов, различие между которыми превышает 50 мс), схожие по своему физиологическому смыслу. Параметры SDNN (стандартное отклонение величин NN-интервалов) и CV (коэффициент вариации) отражают суммарный эффект влияний на синусовый узел симпатической и парасимпатической нервной системы, что также позволяет говорить о схожести физиологического смысла этих показателей.

На основании параметров временного анализа испытуемых можно разделить на четыре группы. В группе 1 минимальные значения всех показателей ритмограммы (табл. 1) наблюдаются в лютеиновую фазу. Можно предположить преобладание гуморальных влияний над нервными именно в эту фазу менструального цикла. Об активности парасимпатического отдела ВНС в фолликулиновую фазу свидетельствуют максимальные значения следующих показателей: RRNN (средняя длительность кардиоинтервалов), SDNN, RMSSD и CV.

Таблица 1

Изменение параметров временного анализа у испытуемых

Table 1

The change in time domain parameters of the volunteers

| Показатели | Фаза менструального цикла |                |               | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|------------|---------------------------|----------------|---------------|---------------------------------|
|            | Менструальная             | Фолликулиновая | Лютеиновая    |                                 |
| Группа 1   |                           |                |               |                                 |
| RRNN, мс   | 768 ± 148                 | 777 ± 105      | 708 ± 123     | 0,096 97                        |
| SDNN, мс   | 46,0 ± 17,5               | 52,0 ± 15,9    | 39,0 ± 12,6   | <b>0,049 79</b>                 |
| RMSSD, мс  | 33,0 ± 21,7               | 33,7 ± 12,5    | 24,7 ± 15,6   | 0,096 97                        |
| pNN50, %   | 16,6 ± 18,0               | 14,4 ± 10,6    | 9,19 ± 12,40  | 0,096 97                        |
| CV, %      | 5,75 ± 1,20               | 6,53 ± 1,29    | 5,450 ± 0,881 | 0,096 97                        |
| Группа 2   |                           |                |               |                                 |
| RRNN, мс   | 802,0 ± 49,3              | 699,0 ± 69,6   | 720,0 ± 70,4  | 0,263 60                        |
| SDNN, мс   | 65,4 ± 15,9               | 43,4 ± 6,7     | 52,2 ± 14,7   | 0,059 72                        |
| RMSSD, мс  | 43,1 ± 25,7               | 26,10 ± 9,69   | 31,7 ± 24,3   | 0,716 53                        |
| pNN50, %   | 18,5 ± 19,4               | 9,12 ± 5,72    | 14,3 ± 20,6   | 0,716 53                        |
| CV, %      | 8,05 ± 1,41               | 6,19 ± 0,84    | 7,1 ± 1,5     | 0,096 97                        |
| Группа 3   |                           |                |               |                                 |
| RRNN, мс   | 798 ± 137                 | 733,0 ± 53,5   | 829,0 ± 42,2  | 0,114 56                        |
| SDNN, мс   | 36,2 ± 10,5               | 33,30 ± 6,53   | 44,20 ± 8,91  | 0,114 56                        |
| RMSSD, мс  | 21,50 ± 7,45              | 16,2 ± 4,4     | 26,20 ± 7,68  | 0,069 48                        |
| pNN50, %   | 3,47 ± 2,74               | 0,75 ± 0,70    | 6,68 ± 7,47   | <b>0,030 20</b>                 |
| CV, %      | 4,62 ± 1,61               | 4,520 ± 0,647  | 5,290 ± 0,922 | 0,311 40                        |

Окончание табл. 1  
Ending table 1

| Показатели | Фаза менструального цикла |                |               | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|------------|---------------------------|----------------|---------------|---------------------------------|
|            | Менструальная             | Фолликулиновая | Лютеиновая    |                                 |
| Группа 4   |                           |                |               |                                 |
| RRNN, мс   | 733,0 ± 59,5              | 683,0 ± 63,3   | 770,0 ± 19,5  | 0,06948                         |
| SDNN, мс   | 43,70 ± 7,99              | 47,30 ± 8,29   | 47,20 ± 6,18  | 0,84648                         |
| RMSSD, мс  | 26,80 ± 9,64              | 26,80 ± 9,91   | 35,00 ± 3,63  | 0,11284                         |
| pNN50, %   | 7,35 ± 8,34               | 7,47 ± 9,00    | 14,40 ± 3,53  | 0,11456                         |
| CV, %      | 5,9700 ± 0,9995           | 6,920 ± 0,806  | 6,150 ± 0,905 | <b>0,04215</b>                  |

В группах 2 и 3 гуморальные влияния преобладают в фолликулиновую фазу цикла. В группе 2 парасимпатический тонус выше в менструальную, а в группе 3 – в лютеиновую фазу. Для испытуемых группы 4 минимальные средние значения параметров SDNN, RMSSD, pNN50 и CV наблюдаются в менструальную фазу, в то время как в лютеиновую фазу аналогично с группой 3 преобладает активность парасимпатического отдела ВНС (на это указывают максимальные средние значения показателей RMSSD, pNN50 и RRNN).

Анализ параметров гистограммы ВСР (табл. 2) подтверждает обнаруженное ранее (по параметрам временного анализа) перераспределение тонуса ВНС в группах в разные фазы цикла.

Таблица 2

Изменение параметров гистограммы у испытуемых

Table 2

Histogram parameters in volunteers

| Показатели     | Фаза менструального цикла |                 |                 | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|
|                | Менструальная             | Фолликулиновая  | Лютеиновая      |                                 |
| Группа 1       |                           |                 |                 |                                 |
| Амо, %         | 47,60 ± 12,02             | 39,4 ± 10,6     | 50,0 ± 14,5     | <b>0,04979</b>                  |
| SI             | 239 ± 238                 | 140 ± 123       | 218 ± 178       | 0,09697                         |
| BP, с          | 0,285 ± 0,130             | 0,2930 ± 0,0821 | 0,2430 ± 0,0847 | 0,09697                         |
| ПАПР, усл. ед. | 67,7 ± 30,0               | 53,96 ± 23,60   | 75,6 ± 35,4     | <b>0,04979</b>                  |
| ИВР, усл. ед.  | 235 ± 172                 | 176 ± 126       | 248 ± 172       | <b>0,04979</b>                  |
| ВПР, усл. ед.  | 6,35 ± 4,26               | 5,46 ± 3,11     | 7,00 ± 4,07     | 0,09697                         |
| Группа 2       |                           |                 |                 |                                 |
| Амо, %         | 32,30 ± 5,76              | 48,00 ± 1,91    | 40,80 ± 9,61    | 0,09697                         |
| SI             | 69,5 ± 25,4               | 201,0 ± 92,7    | 134,0 ± 93,5    | <b>0,04979</b>                  |
| BP, с          | 0,3720 ± 0,0823           | 0,2570 ± 0,0647 | 0,29 ± 0,08     | 0,09697                         |
| ПАПР, усл. ед. | 41,40 ± 9,26              | 71,7 ± 10,4     | 58,5 ± 18,0     | 0,09697                         |
| ИВР, усл. ед.  | 98,7 ± 33,0               | 222,0 ± 82,3    | 163,0 ± 93,4    | 0,09697                         |
| ВПР, усл. ед.  | 3,760 ± 0,951             | 6,51 ± 2,48     | 5,37 ± 2,19     | 0,09697                         |
| Группа 3       |                           |                 |                 |                                 |
| Амо, %         | 50,80 ± 8,36              | 53,40 ± 6,49    | 44,00 ± 4,66    | <b>0,04215</b>                  |
| SI             | 189 ± 153                 | 216 ± 107       | 120,0 ± 39,8    | 0,22313                         |
| BP, с          | 0,2390 ± 0,0766           | 0,2110 ± 0,0502 | 0,2540 ± 0,0497 | 0,60653                         |
| ПАПР, усл. ед. | 65,3 ± 16,7               | 74,2 ± 14,8     | 53,20 ± 7,66    | 0,11456                         |

Окончание табл. 2  
Ending table 2

| Показатели     | Фаза менструального цикла |                |                   | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|----------------|---------------------------|----------------|-------------------|---------------------------------|
|                | Менструальная             | Фолликулиновая | Лютеиновая        |                                 |
| ИВР, усл. ед.  | 256 ± 167                 | 274 ± 105      | 179 ± 49          | <b>0,042 15</b>                 |
| ВПР, усл. ед.  | 6,47 ± 4,43               | 7,04 ± 2,50    | 4,86 ± 1,07       | 0,069 48                        |
| Группа 4       |                           |                |                   |                                 |
| Амо, %         | 44,60 ± 8,56              | 41,90 ± 5,92   | 39,60 ± 5,12      | 0,846 48                        |
| SI             | 138,0 ± 39,8              | 134,0 ± 47,4   | 114,0 ± 28,5      | 0,606 53                        |
| BP, с          | 0,268 0 ± 0,088 2         | 0,274 ± 0,052  | 0,252 0 ± 0,026 6 | 0,437 76                        |
| ПАПР, усл. ед. | 60,5 ± 14,4               | 62,7 ± 12,1    | 51,80 ± 5,46      | 0,513 42                        |
| ИВР, усл. ед.  | 181,0 ± 56,5              | 160,0 ± 48,6   | 159,50 ± 34,96    | 0,606 53                        |
| ВПР, усл. ед.  | 5,38 ± 1,30               | 5,69 ± 1,50    | 5,230 ± 0,456     | 0,311 40                        |

Примечание. Амо – амплитуда моды; SI – стресс-индекс; BP – вариационный размах; ПАПР – показатель адекватности процессов регуляции; ИВР – индекс вегетативного равновесия; ВПР – вегетативный показатель ритма; усл. ед. – условные единицы.

В группе 1 повышение амплитуды моды, индекса вегетативного равновесия, вегетативного показателя ритма и вариационного размаха указывает на усиление тонуса симпатического отдела в лютеиновую фазу цикла, а снижение – на активацию парасимпатического отдела в фолликулиновую фазу. Аналогичные по динамике данные были получены в работе [9]. О. Б. Рода и С. В. Калитка пришли к выводу, что такие результаты могут указывать на снижение степени напряжения регуляторных систем и повышение функциональных возможностей сердечно-сосудистой системы в фолликулиновую фазу цикла.

Динамика показателей гистограммы у испытуемых группы 2 свидетельствует о преобладании вагусной активности в фолликулиновую фазу и повышении тонуса симпатического отдела ВНС в менструальную фазу цикла. У испытуемых группы 3 активность симпатического отдела ВНС преобладала в фолликулиновую, а парасимпатического – в лютеиновую фазу. Кроме того, как утверждают О. Б. Рода и С. В. Калитка [9], снижение значений показателя адекватности процессов регуляции, индекса вегетативного равновесия и вегетативного показателя ритма говорит о снижении степени напряжения регуляторных систем и повышении функциональных возможностей сердечно-сосудистой системы в лютеиновую фазу цикла. Изменения амплитуды моды и стресс-индекса, которые отражают состояние центрального контура регуляции, в группе 4 однонаправленные. Их максимальные средние значения отмечены в менструальную фазу, что указывает на активацию симпатического отдела ВНС.

Перераспределение тонуса отделов ВНС, оцененное с помощью показателей скаттерограммы, соответствует распределению по группам на основе показателей ВСР, приведенных выше. В группах 1 и 2 достоверно ( $p < 0,05$ ) отличались по фазам значения длины продольной оси скаттерограммы  $ell\_L$ : (116,0 ± 32,1) мс; (144,0 ± 42,3) мс; (107,0 ± 31,4) мс в группе 1 и (183,0 ± 36,1) мс; (115,00 ± 8,08) мс; (145,0 ± 34,3) мс в группе 2 в менструальную, фолликулиновую и лютеиновую фазы цикла соответственно. На рис. 1 представлены скаттерограммы одной из испытуемых группы 1. Приведенные графики генерируются непосредственно программой *НС-Психотест.NET*. Так, изменения вегетативного тонуса у данной испытуемой полностью совпадают с динамикой, характерной для группы 1.

В группах 3 и 4 достоверные отличия в разные фазы цикла были отмечены для показателя  $L/w$  (отношение продольной оси к поперечной): 3,51 ± 1,42; 8,74 ± 10,69; 3,300 ± 0,454 ( $p = 0,011 11$ ) в группе 3 и 3,303 ± 0,903; 3,700 ± 1,087; 2,600 ± 0,666 ( $p = 0,042 15$ ) в группе 4 в менструальную, фолликулиновую и лютеиновую фазы цикла соответственно.

Изменения параметров спектрограммы у испытуемых приведены в табл. 3.

В группе 1 преобладание VLF в фолликулиновую фазу, по сравнению с остальными фазами цикла, отражает активность центральных эрготропных и гуморально-метаболических механизмов регуляции сердечного ритма. Схожие данные были получены в работе [9]. Повышение LF  $po_{gm}$  и снижение HF  $po_{gm}$  в лютеиновую фазу свидетельствуют об активации симпатического отдела, а снижение LF  $po_{gm}$  и повышение HF  $po_{gm}$  в фолликулиновую фазу – об усилении парасимпатического тонуса ВНС. На рис. 2 представлена волновая структура ритма одной из испытуемых группы 1. Данные спектрограммы строятся программой *НС-Психотест.NET* в процессе регистрации ЭКГ. На спектрограмме отражен количественный вклад волн различной мощности (обозначены разными цветами) в формирование волновой структуры ритма.

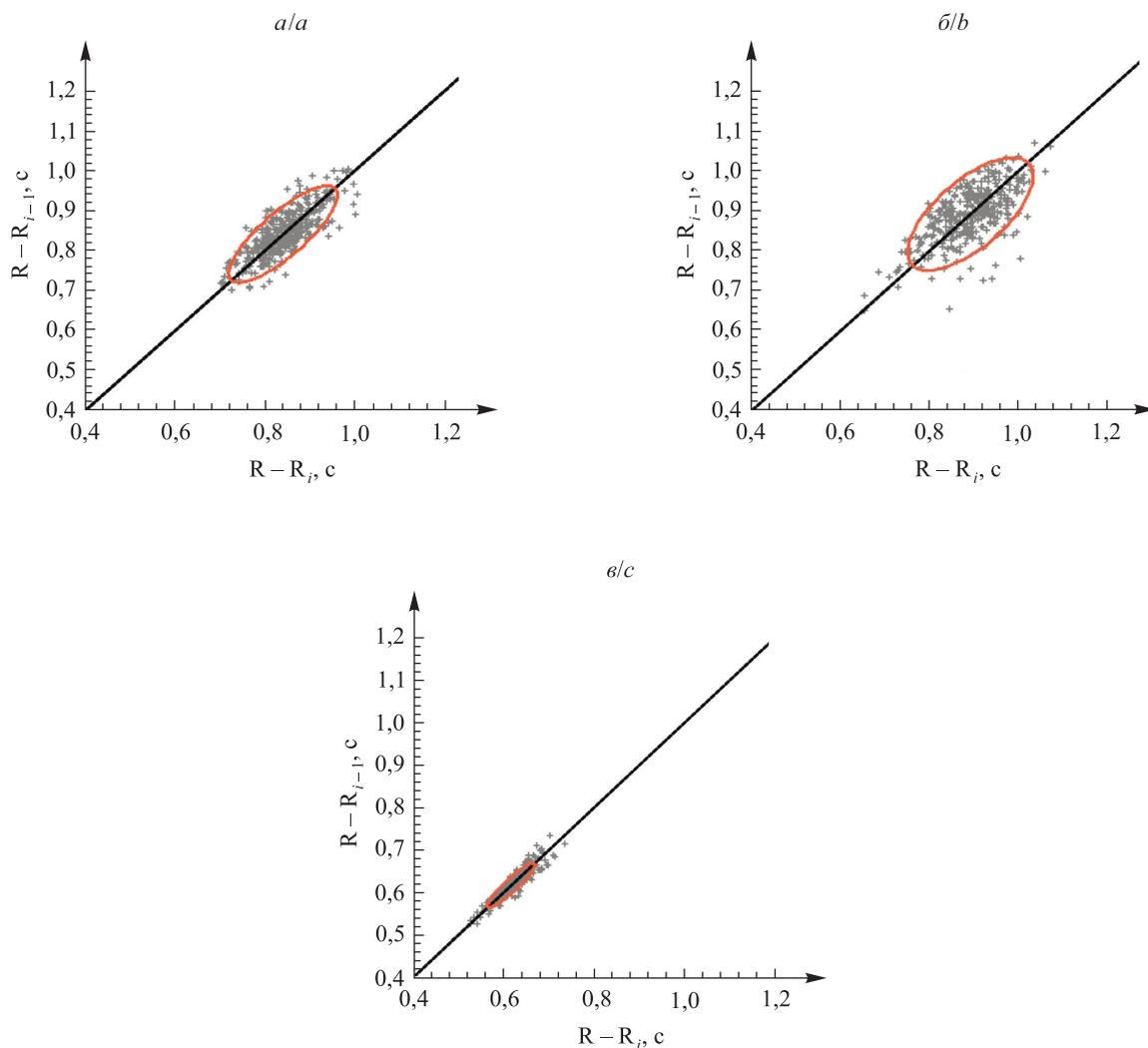


Рис. 1. Вид скаттерграммы в разные фазы менструального цикла (данные одного эксперимента):

*a* – менструальная фаза; *б* – фолликулиновая фаза; *в* – лютеиновая фаза;

$R - R_{i-1}$  – продолжительность текущего  $R - R$ -интервала;

$R - R_i$  – продолжительность последующего  $R - R$ -интервала для каждой точки графика

Fig. 1. Type of scatterogram in different phases of the menstrual cycle (data from one experiment):  
*a* – menstrual phase; *b* – follicular phase; *c* – luteal phase;  $R - R_{i-1}$  – duration of the current  $R - R$ -interval;  
 $R - R_i$  – duration of the following  $R - R$ -interval for each point of the graph

Таблица 3

Изменение параметров спектрограммы у испытуемых

Table 3

Spectrogram parameters in volunteers

| Показатели           | Фаза менструального цикла |                |             | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|----------------------|---------------------------|----------------|-------------|---------------------------------|
|                      | Менструальная             | Фолликулиновая | Лютеиновая  |                                 |
| Группа 1             |                           |                |             |                                 |
| TP, мс <sup>2</sup>  | 2387 ± 1578               | 2905 ± 1410    | 1394 ± 622  | <b>0,04979</b>                  |
| HF, мс <sup>2</sup>  | 572 ± 531                 | 532 ± 324      | 422 ± 467   | 0,36788                         |
| LF, мс <sup>2</sup>  | 933 ± 660                 | 1269 ± 850     | 628 ± 325   | <b>0,04979</b>                  |
| VLF, мс <sup>2</sup> | 882 ± 407                 | 1104 ± 295     | 519 ± 177   | <b>0,04979</b>                  |
| HF norm, n. u.       | 31,6 ± 10,0               | 32,00 ± 5,63   | 32,3 ± 20,8 | 0,71653                         |

Окончание табл. 3  
Ending table 3

| Показатели           | Фаза менструального цикла |                |              | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|----------------------|---------------------------|----------------|--------------|---------------------------------|
|                      | Менструальная             | Фолликулиновая | Лютеиновая   |                                 |
| LF norm, n. u.       | 68,4 ± 10,0               | 68,00 ± 5,63   | 64,4 ± 26,5  | 0,71653                         |
| %HF                  | 19,2 ± 10,7               | 18,20 ± 3,96   | 19,7 ± 16,1  | 0,71653                         |
| %LF                  | 38,20 ± 4,41              | 39,6 ± 11,1    | 41,20 ± 5,45 | 0,71653                         |
| %VLF                 | 42,6 ± 14,4               | 42,2 ± 13,2    | 40,0 ± 11,9  | 0,71653                         |
| Группа 2             |                           |                |              |                                 |
| TP, мс <sup>2</sup>  | 4607 ± 2403               | 1826 ± 702     | 3041 ± 1590  | 0,09697                         |
| HF, мс <sup>2</sup>  | 1375 ± 1772               | 620 ± 404      | 770 ± 1061   | 0,71653                         |
| LF, мс <sup>2</sup>  | 1412 ± 736                | 780 ± 276      | 1308 ± 878   | 0,26360                         |
| VLF, мс <sup>2</sup> | 1751 ± 229                | 607 ± 262      | 3305 ± 3900  | 0,09697                         |
| HF norm, n. u.       | 38,5 ± 24,6               | 34,4 ± 13,1    | 27,6 ± 22,0  | 0,71653                         |
| LF norm, n. u.       | 61,5 ± 24,6               | 63,7 ± 16,0    | 72,4 ± 22,0  | 0,71653                         |
| %HF                  | 22,2 ± 19,0               | 23,8 ± 14,1    | 18,8 ± 21,7  | 1,00000                         |
| %LF                  | 33,3 ± 13,6               | 39,00 ± 7,29   | 40,2 ± 15,5  | 0,36788                         |
| %VLF                 | 44,5 ± 16,2               | 38,3 ± 19,6    | 41,0 ± 26,8  | 1,00000                         |
| Группа 3             |                           |                |              |                                 |
| TP, мс <sup>2</sup>  | 1366 ± 665                | 1187 ± 341     | 1952 ± 720   | 0,11456                         |
| HF, мс <sup>2</sup>  | 154,0 ± 78,4              | 70,7 ± 20,7    | 259 ± 173    | 0,13534                         |
| LF, мс <sup>2</sup>  | 744 ± 383                 | 672 ± 281      | 814 ± 244    | 0,31140                         |
| VLF, мс <sup>2</sup> | 469 ± 268                 | 444 ± 124      | 878 ± 492    | 0,60653                         |
| HF norm, n. u.       | 17,40 ± 5,25              | 10,30 ± 3,38   | 22,4 ± 10,4  | <b>0,03223</b>                  |
| LF norm, n. u.       | 82,60 ± 5,25              | 89,70 ± 3,38   | 77,6 ± 10,4  | <b>0,03223</b>                  |
| %HF                  | 11,50 ± 4,56              | 6,08 ± 1,56    | 13,1 ± 8,5   | 0,08389                         |
| %LF                  | 53,30 ± 6,29              | 55,1 ± 11,4    | 43,5 ± 11,8  | 0,51342                         |
| %VLF                 | 35,2 ± 9,0                | 38,9 ± 11,0    | 43,4 ± 15,3  | 0,51342                         |
| Группа 4             |                           |                |              |                                 |
| TP, мс <sup>2</sup>  | 1815 ± 618                | 2294 ± 766     | 2195 ± 571   | 0,51342                         |
| HF, мс <sup>2</sup>  | 406 ± 363                 | 488 ± 392      | 636 ± 237    | <b>0,03020</b>                  |
| LF, мс <sup>2</sup>  | 625 ± 178                 | 759 ± 331      | 824 ± 252    | 0,31140                         |
| VLF, мс <sup>2</sup> | 784 ± 410                 | 1047 ± 560     | 740 ± 360    | 0,31140                         |
| HF norm, n. u.       | 35,5 ± 15,9               | 37,4 ± 15,3    | 43,5 ± 10,9  | 0,60653                         |
| LF norm, n. u.       | 64,5 ± 15,9               | 62,6 ± 15,3    | 56,5 ± 10,9  | 0,60653                         |
| %HF                  | 20,98 ± 12,10             | 20,3 ± 10,5    | 29,70 ± 9,82 | 0,13534                         |
| %LF                  | 36,7 ± 14,0               | 35,0 ± 18,3    | 37,30 ± 4,71 | 0,84648                         |
| %VLF                 | 42,4 ± 18,7               | 44,7 ± 20,5    | 33,0 ± 9,1   | 0,51342                         |

Примечание. TP – общая мощность спектра; HF – мощность волн высокой частоты; LF – мощность волн низкой частоты; VLF – мощность волн очень низкой частоты; norm – относительное значение мощности волн, выраженное в нормализованных единицах (n. u.); %HF – относительное значение мощности волн высокой частоты в процентах; %LF – относительное значение мощности волн низкой частоты в процентах; %VLF – относительное значение мощности волн очень низкой частоты в процентах.

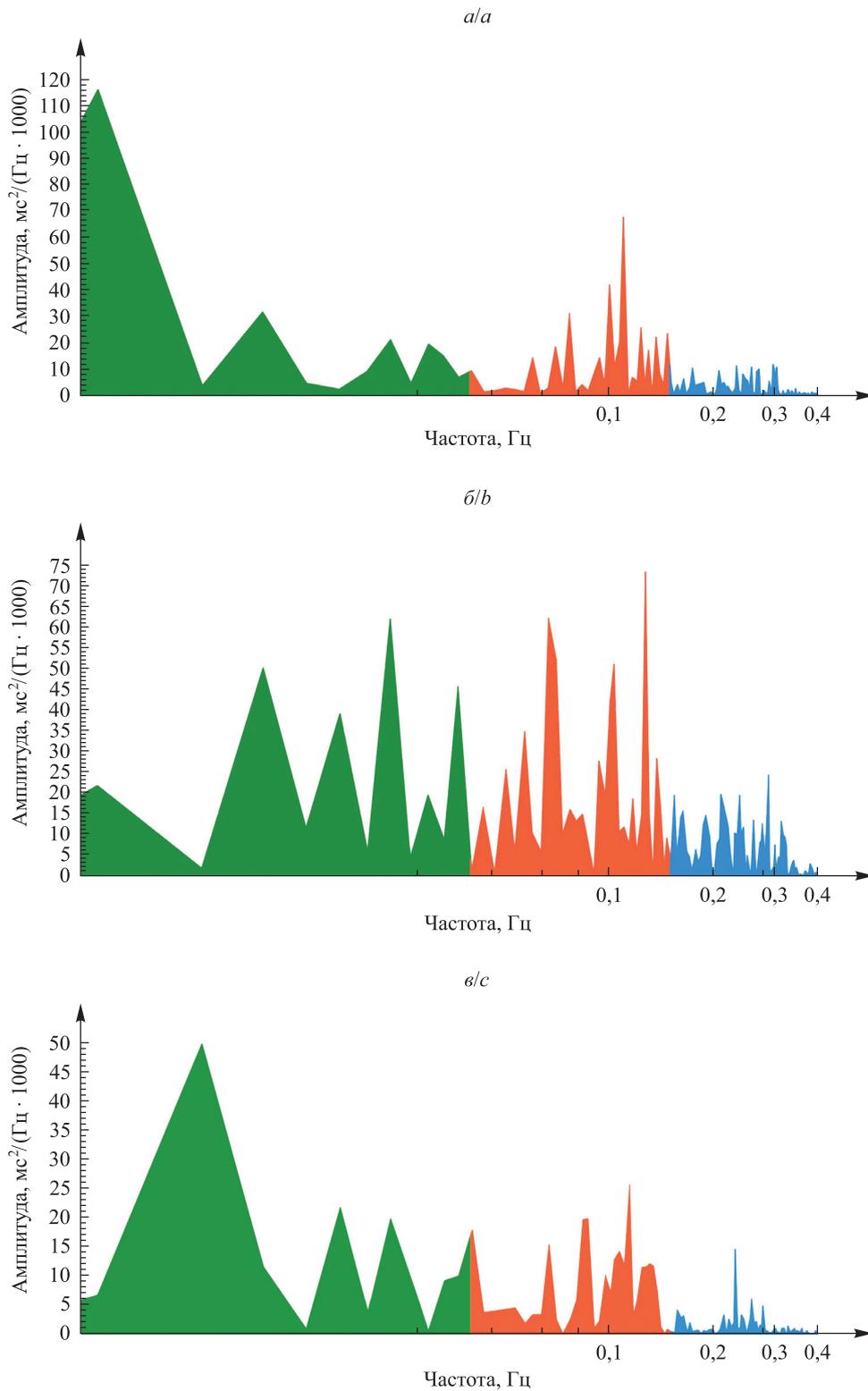


Рис. 2. Волновая структура ритма в разные фазы менструального цикла (данные одного эксперимента):  
*a* – менструальная фаза; *б* – фолликулиновая фаза; *в* – лютеиновая фаза;  
 VLF (мощность волн очень низкой частоты) – зеленая заливка;  
 LF (мощность волн низкой частоты) – красная заливка;  
 HF (мощность волн высокой частоты) – синяя заливка

Fig. 2. The wave structure of the rhythm in different phases of the menstrual cycle (data from one experiment):  
*a* – menstrual phase; *b* – follicular phase; *c* – luteal phase; VLF (very low frequency) – green;  
 LF (low frequency) – red; HF (high frequency) – blue

У девушек из группы 2 достоверных различий показателей спектрограммы по фазам выявлено не было. Направленность изменений TP, HF и LF в группе 3 указывает на усиление тонуса симпатического отдела ВНС в фолликулиновую фазу и повышение вагусной активности в лютеиновую фазу цикла. Максимальное среднее значение VLF, свидетельствующее об активации центральных эрготропных и гуморально-метаболических механизмов регуляции сердечного ритма, отмечено также в лютеиновую фазу. Изменение волновой структуры ритма у испытуемых группы 4 согласуется с динамикой распределения тонуса между отделами ВНС для большинства показателей ВСР: повышение активности симпатического отдела в менструальную (по показателям TP, HF и LF), а парасимпатического отдела – в лютеиновую фазу цикла (по показателям HF, LF, %HF и %LF).

При анализе параметров еще одного метода ВСР – автокорреллограммы – были исследованы изменения СС1 (первый коэффициент автокорреляционной функции, отражающий степень активности автономного контура регуляции) и СС0 (число сдвигов автокорреляции, через которое появляется первое отрицательное значение коэффициента корреляции). У испытуемых группы 1 показатели автокорреллограммы изменялись синхронно (табл. 4).

Таблица 4

Изменение параметров автокорреллограммы у испытуемых

Table 4

Autocorrelation parameters in volunteers

| Показатели | Фаза менструального цикла |                  |               | Уровень значимости ( <i>p</i> ) |
|------------|---------------------------|------------------|---------------|---------------------------------|
|            | Менструальная             | Фолликулиновая   | Лютеиновая    |                                 |
| Группа 1   |                           |                  |               |                                 |
| СС1        | 0,446 ± 0,257             | 0,572 ± 0,280    | 0,601 ± 0,243 | 0,263 60                        |
| СС0        | 4,99 ± 5,57               | 5,65 ± 4,07      | 5,98 ± 3,46   | 0,716 53                        |
| Группа 2   |                           |                  |               |                                 |
| СС1        | 0,576 ± 0,218             | 0,6570 ± 0,036 1 | 0,236 ± 0,236 | 0,716 53                        |
| СС0        | 3,45 ± 1,51               | 4,79 ± 1,38      | 5,39 ± 2,42   | 0,096 97                        |
| Группа 3   |                           |                  |               |                                 |
| СС1        | 0,672 ± 0,173             | 0,715 ± 0,142    | 0,602 ± 0,300 | 0,311 40                        |
| СС0        | 3,850 ± 0,468             | 7,37 ± 8,14      | 4,62 ± 3,78   | 0,664 25                        |
| Группа 4   |                           |                  |               |                                 |
| СС1        | 0,568 ± 0,202             | 0,562 ± 0,168    | 0,508 ± 0,165 | 0,606 53                        |
| СС0        | 4,07 ± 2,22               | 4,45 ± 5,59      | 4,33 ± 4,70   | 0,664 25                        |

Повышение СС1 наблюдается при сильной связи между контурами регуляции сердечного ритма, а снижение – при слабой. Уменьшение СС0 свидетельствует о преобладании автономного, а увеличение – центрального контура регуляции [1; 10]. Достоверных различий значений СС1 и СС0 в разные фазы цикла у испытуемых всех групп выявлено не было. В группе 2 максимальные средние значения СС1 и СС0 отмечены в фолликулиновую и лютеиновую фазы соответственно. Минимальные средние значения этих показателей зарегистрированы в лютеиновую и менструальную фазы цикла. Такая направленность изменений свидетельствует о некотором усилении преобладания автономного контура регуляции в менструальную фазу. Наибольшая активность центрального контура регуляции приходилась на лютеиновую фазу. Самая сильная связь между контурами регуляции была отмечена в фолликулиновую фазу цикла. У испытуемых группы 3 наибольшая связь между контурами регуляции также наблюдалась в фолликулиновую фазу. Автономный контур регуляции преобладал в менструальную, а центральный – в фолликулиновую фазу цикла. Максимальное среднее значение СС1 у испытуемых группы 4 было отмечено в менструальную фазу, т. е. можно говорить о некотором усилении связи между контурами регуляции работы сердца. Минимальное среднее значение этого показателя зарегистрировано в лютеиновую фазу. Направленность изменений СС0 для данной группы указывает на повышение активности центрального контура регуляции в фолликулиновую, а автономного – в менструальную фазу.

По результатам исследования девушки были разделены на четыре группы в соответствии с направленностью изменений тонуса ВНС (табл. 5).

Таблица 5

Перераспределение тонуса отделов автономной нервной системы  
у испытуемых разных групп в зависимости от фазы менструального цикла

Table 5

Redistribution of the autonomic nervous system department's tone  
in volunteers in different groups depending on the phase of the menstrual cycle

| Группа | Менструальная фаза | Фолликулиновая фаза | Лютеиновая фаза |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|
| 1      | –                  | ПНС                 | СНС             |
| 2      | ПНС                | СНС                 | –               |
| 3      | –                  | СНС                 | ПНС             |
| 4      | СНС                | –                   | ПНС             |

Примечание. ПНС – парасимпатический отдел нервной системы; СНС – симпатический отдел нервной системы; прочерком обозначено отсутствие преобладания одного из отделов ВНС.

Вегетативный тонус нервной системы в разные фазы менструального цикла различается. По направлению изменений показателей ВСР можно судить о преобладании тонуса либо симпатического, либо парасимпатического отдела ВНС для трех фаз цикла. Даже на примере 10 испытуемых можно выделить группы с однонаправленными реакциями показателей ВСР на изменения гормонального фона во время цикла. Но только у одной группы испытуемых (группа 1) направленность изменений показателей ВСР согласуется с данными, представленными в других работах. Несмотря на то что прослеживается определенная динамика, достоверные различия были отмечены лишь для некоторых показателей в каждой из групп. Немногие показатели ВСР в разных группах соответствуют норме, приведенной в литературе [1; 10], во все фазы цикла. Несомненная информативность оценки ВСР, доказанная в различных клинических группах, требует постоянного поиска оптимальных нормативных критериев. При определении нормативных параметров ВСР для женщин необходимо учитывать фазу менструального цикла.

### Библиографические ссылки

1. Михайлов ВМ. *Вариабельность ритма сердца. Опыт практического применения*. Иваново: [б. и.]; 2000. 200 с.
2. Воронова НВ, Мейгал АЮ, Елаева ЛЕ, Кузьмина ГИ. Влияние сезона года и фазы менструального цикла женщины на параметры кардиоинтервалограммы. *Экология человека*. 2015;2:20–26.
3. Босенко АИ, Орлик НА. Динамика показателей частоты сердечных сокращений студенток факультета физической культуры в разные фазы менструального цикла. *Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І. П. Шамякіна*. 2017;2:3–7.
4. Tada Y, Yoshizaki T, Tomata Y, Yokoyama Y, Sunami A, Hida A, et al. The impact of menstrual cycle phases on cardiac autonomic nervous system activity: an observational study considering lifestyle (diet, physical activity, and sleep) among female college students. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*. 2017;63(4):249–255. DOI: 10.3177/jnsv.63.249.
5. Schmalenberger KM, Eisenlohr-Moul TA, Würth L, Schneider E, Thayer JF, Ditzen B, et al. A systematic review and meta-analysis of within-person changes in cardiac vagal activity across the menstrual cycle: implications for female health and future studies. *Journal of Clinical Medicine* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 15];8:1946. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0383/8/11/1946>. DOI: 10.3390/jcm8111946.
6. Kurokawa J, Kodama M, Clancy CE, Furukawa T. Sex hormonal regulation of cardiac ion channels in drug-induced QT syndromes. *Pharmacology & Therapeutics*. 2016;168:23–28. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2016.09.004.
7. Гланц С. *Медико-биологическая статистика*. Данилов ЮА, переводчик; Бузикашвили НЕ, Самойлов ДВ, редакторы. Москва: Практика; 1998. 459 с.
8. Вейн АМ, редактор. *Вегетативные расстройства: клиника, диагностика, лечение*. Москва: Медицинское информационное агентство; 2003. 752 с.
9. Рода ОВ, Калитка СВ. Анализ вариабельности сердечного ритма у женщин, специализирующихся в беге на средние дистанции. *Здоровье для всех*. 2014;1:22–28.
10. Бабунц ИВ, Мириджанян ЭМ, Машаех ЮА. *Азбука анализа вариабельности сердечного ритма*. Москва: [б. и.]; 2011. 109 с.

### References

1. Mikhailov VM. *Variabel'nost' ritma serdtsa. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Heart rate variability. Experience of practical application]. Ivanovo: [s. n.]; 2000. 200 p. Russian.
2. Voronova NV, Meigal AYU, Yelaeva LE, Kuzmina GI. Heart rate variability in women during various seasons and phases of the menstrual cycle. *Ekologiya cheloveka*. 2015;2:20–26. Russian.

3. Bosenko AI, Orlik NA. Heart rate frequency indicators dynamics of physical training department female students in various menstrual cycle phases. *Vesnik Mazyrskaga dzjarzhawnaga pedagogichnaga wniwersitjeta imja I. P. Shamjakina*. 2017;2:3–7. Russian.
4. Tada Y, Yoshizaki T, Tomata Y, Yokoyama Y, Sunami A, Hida A, et al. The impact of menstrual cycle phases on cardiac autonomic nervous system activity: an observational study considering lifestyle (diet, physical activity, and sleep) among female college students. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*. 2017;63(4):249–255. DOI: 10.3177/jnsv.63.249.
5. Schmalenberger KM, Eisenlohr-Moul TA, Würth L, Schneider E, Thayer JF, Ditzen B, et al. A systematic review and meta-analysis of within-person changes in cardiac vagal activity across the menstrual cycle: implications for female health and future studies. *Journal of Clinical Medicine* [Internet]. 2019 [cited 2020 April 15];8:1946. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0383/8/11/1946>. DOI: 10.3390/jcm8111946.
6. Kurokawa J, Kodama M, Clancy CE, Furukawa T. Sex hormonal regulation of cardiac ion channels in drug-induced QT syndromes. *Pharmacology & Therapeutics*. 2016;168:23–28. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2016.09.004.
7. Glantz SA. *Primer of biostatistics*. 4<sup>th</sup> edition. New York: McGraw-Hill; 1997. 473 p.  
Russian edition: Glantz S. *Mediko-biologicheskaya statistika*. Danilov YuA, translator; Buzikashvili NE, Samoilov DV, editors. Moscow: Praktika; 1998. 459 p.
8. Vein AM, editor. *Vegetativnye rasstroistva: klinika, diagnostika, lechenie* [Vegetative disorders: clinic, diagnosis, treatment]. Moscow: Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo; 2003. 752 p. Russian.
9. Roda OB, Kalytka SV. Analysis of the heart rate variability for women, specializing in middle distance running. *Zdorov'e dlya vsekh*. 2014;1:22–28. Russian.
10. Babunts IV, Miridzhanyan EM, Mashaekh YuA. *Azbuka analiza variabel'nosti serdechnogo ritma* [ABC of heart rate variability analysis]. Moscow: [s. n.]; 2011. 109 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 15.04.2020.  
Received by editorial board 15.04.2020.

УДК 573.6.086.835

## СТИМУЛЯЦИЯ БИОСИНТЕЗА ВТОРИЧНЫХ МЕТАБОЛИТОВ ФЕНОЛЬНОЙ ПРИРОДЫ В СУСПЕНЗИОННЫХ КУЛЬТУРАХ КЛЕТОК *ECHINACEA PURPUREA* L. MOENCH ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛИСИТОРОВ ДРОЖЖЕВОГО ЭКСТРАКТА

Г. В. НЕСТЕР<sup>1)</sup>, Т. И. ДИТЧЕНКО<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Исследована способность 50–500 мг/л дрожжевого экстракта в качестве комплексного биотического элиситора индуцировать повышение уровней накопления вторичных метаболитов фенольной природы в суспензионных культурах клеток эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea* L. Moench), инициированных из каллусов листового и корневого происхождения. Установлено, что стимулирующий эффект компонентов дрожжевого экстракта более выражен для слабоагрегированной суспензионной культуры листового происхождения по сравнению с культурой корневого происхождения высокоагрегированного типа. Рост содержания фенилпропаноидов (в 2,5 раза) и флавоноидов (в 2,0 раза) в водно-спиртовых экстрактах из культуры листового происхождения в результате 2-суточного воздействия 100–500 мг/л дрожжевого экстракта коррелирует с увеличением их антирадикальной активности в модельной системе по ингибированию радикалов 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразида. Экспозиция клеток суспензионных культур листового и корневого происхождения в присутствии 250–500 мг/л дрожжевого экстракта приводит к повышению активности ключевого фермента биосинтеза фенольных соединений L-фенилаланинаммоний-лиаза в 2,1–2,7 и 1,2–1,3 раза соответственно.

**Ключевые слова:** *Echinacea purpurea* L. Moench; суспензионная культура клеток; дрожжевой экстракт; фенольные соединения; гидроксикоричные кислоты; флавоноиды; антирадикальная активность; L-фенилаланинаммоний-лиаза.

---

### Образец цитирования:

Нестер ГВ, Дитченко ТИ. Стимуляция биосинтеза вторичных метаболитов фенольной природы в суспензионных культурах клеток *Echinacea purpurea* L. Moench под влиянием элиситоров дрожжевого экстракта. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;2:37–48. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-37-48>

### For citation:

Nester GV, Ditchenko TI. Stimulation of phenolic nature secondary metabolites biosynthesis in *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures under influence yeast extract elisitors. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2020;2: 37–48. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-37-48>

---

### Авторы:

**Гражина Владимировна Нестер** – магистрант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета. Научный руководитель – Т. И. Дитченко.  
**Татьяна Ивановна Дитченко** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

### Authors:

**Grazhina V. Nester**, master's degree student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology. [bio.nesterGV1@bsu.by](mailto:bio.nesterGV1@bsu.by)  
**Tatyana I. Ditchenko**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology. [ditchenko@bsu.by](mailto:ditchenko@bsu.by)

## STIMULATION OF PHENOLIC NATURE SECONDARY METABOLITES BIOSYNTHESIS IN *ECHINACEA PURPUREA* L. MOENCH SUSPENSION CELL CULTURES UNDER INFLUENCE YEAST EXTRACT ELISITORS

G. V. NESTER<sup>a</sup>, T. I. DITCHENKO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: T. I. Ditchenko (ditchenko@bsu.by)

The ability of 50–500 mg/L yeast extract as complex biotic elicitor to induce an increase in the accumulation of secondary phenolic metabolites in *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures initiated from calli of leaf and root origin was studied. The yeast extract stimulating effect is more pronounced for a weakly aggregated suspension culture of leaf origin compared with a root origin culture of highly aggregated type. The increase of phenylpropanoids (2.5 times) and flavonoids (2.0 times) content in aqueous-alcoholic extracts from leaf culture as a result of 2-day exposure to 100–500 mg/L of yeast extract correlates with their antiradical activity increase in model system for 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl radicals inhibition. The exposure of suspension cell cultures of leaf and root origin in the presence of 250–500 mg/L yeast extract leads 2.1–2.7 and 1.2–1.3 times increase L-phenylalanine ammonium lyase activity as key enzyme of phenolic compounds biosynthesis.

**Keywords:** *Echinacea purpurea* L. Moench; suspension cell culture; yeast extract; phenolic compounds; hydroxycinnamic acids; flavonoids; antiradical activity; L-phenylalanine ammonium lyase.

### Введение

Применение элиситоров является одной из стратегий метаболической инженерии, обеспечивающих повышение продукции вторичных метаболитов в культурах клеток, тканей и органов растений [1–5]. Биотические и абиотические элиситоры выступают в роли сигналов, которые запускают в обработанных клетках каскад реакций сигнальной трансдукции, приводящих к повышению экспрессии генов, контролируемых биосинтезом фитоалексинов [2; 6–10]. Данная группа индуцибельных защитных соединений включает разные классы продуктов вторичного метаболизма, обладающих широким спектром антимикробного действия и представляющих интерес для фармацевтической промышленности в качестве терапевтических средств. Многочисленные исследования влияния элиситоров на синтез вторичных метаболитов культурами растительных клеток и тканей свидетельствуют, что их эффективность в значительной степени зависит от типа культуры, режима обработки, а также условий культивирования [1; 3; 7; 8; 11]. Для достижения максимальной элиситации крайне важно установить оптимальную концентрацию элиситора и продолжительность его воздействия. Кроме того, степень проявления стимулирующего эффекта зависит от возраста культуры, ее исходного биосинтетического потенциала, стадии ростового цикла, состава питательной среды, наличия дополнительных воздействий [1; 8; 11; 12]. Следует учитывать, что результат использования одного и того же элиситора может существенно отличаться для разных растительных объектов, культивируемых *in vitro*. В связи с этим определение оптимальных режимов обработки культур элиситорами является актуальной задачей при создании клеточных линий – продуцентов экономически важных биологически активных соединений.

К биотическим элиситорам относятся полисахариды, белки, гликопротеины, фрагменты клеточных стенок грибного и бактериального, а также растительного происхождения [1; 2; 4; 6; 13]. Наиболее широкое применение для усиления биосинтеза целевых метаболитов в культурах клеток и тканей растений получили грибные элиситоры [10–12; 14]. На практике часто используются комплексные неочищенные препараты и гомогенаты на основе грибных культур или их клеточных стенок, при этом молекулярная структура отдельных активных ингредиентов может быть неизвестна [12; 13]. Для получения препаратов элиситоров грибного происхождения, как правило, отбирают культуры в фазе логарифмического роста, биомассу которых подвергают сушке, а затем экстракции. Простерилизованный экстракт добавляют в питательные среды для культивирования растительных клеток и тканей. Источником элиситоров также может выступать культуральная среда для выращивания грибных штаммов [15], которую подвергают автоклавированию либо фильтрующей стерилизации. Реже проводят кратковременное совместное культивирование клеток, тканей и органов растений непосредственно с фитопатогенными грибами [1; 4; 16]. Одним из наиболее известных грибных элиситоров является дрожжевой экстракт (ДЭ), который представляет собой водорастворимую фракцию свободных пептидов и аминокислот, образующихся в результате автолиза клеток *Saccharomyces cerevisiae* под действием ферментов или при нагревании.

Биотехнологическим источником фенолпропаноидов с иммуностимулирующей, антиоксидантной, противовирусной и противовоспалительной активностью могут служить культуры клеток, тканей и органов *Echinacea purpurea* L. Moench [17–20]. Коллекция каллусных культур ценных лекарственных растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета БГУ включает длительно пассируемые гетеротрофные каллусные культуры *Echinacea purpurea* L. Moench, продуцирующие гидроксикоричные кислоты (ГКК) и их производные [21]. Показано, что в водно-этанольных экстрактах из каллусов эхинацеи, так же как и в надземной части интактных растений, доминирует цикориевая кислота [22]. Модификация минеральной основы питательной среды, концентрации источника углерода и регуляторов роста приводит к существенному возрастанию уровней накопления не только цикориевой, но и других производных кофейной кислоты, в частности кафтаровой, хлорогеновой [22; 23]. Поскольку биотехнологическое получение вторичных метаболитов растительного происхождения основано на использовании суспензионных культур [24], интерес представляют анализ биосинтетического потенциала суспензионных культур клеток *Echinacea purpurea* L. Moench и разработка приемов его повышения.

Целью настоящей работы явилась оценка способности ДЭ усиливать биосинтез вторичных метаболитов фенольной природы и повышать антирадикальную активность экстрактов из клеток суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench.

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили суспензионные культуры *Echinacea purpurea* L. Moench, инициированные из каллусных тканей разного происхождения (листового, корневого) и различающиеся по степени агрегированности. Суспензионная культура листового происхождения, представленная в основном одиночными клетками округлой формы и небольшими клеточными группами (до 10 клеток), являлась слабоагрегированной, тогда как суспензионная культура корневого происхождения, в которой преобладали многоклеточные агрегаты, состоящие из десятков клеток, относилась к высокоагрегированному типу. В работе использовалась питательная среда по прописи Мурасиге – Скуга [25], включающая 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты, 1 мг/л кинетина и 1 мг/л β-индолил-3-уксусной кислоты. Величина рН питательных сред до автоклавирования составляла 5,8. Суспензионные культуры инкубировали в темноте при 25 °С. Постоянное перемешивание питательной среды обеспечивалось с помощью орбитального шейкера со скоростью вращения 120 об/мин. Продолжительность ростового цикла составляла 15 сут. Проавтоклавированный водный маточный раствор ДЭ (10 мг/мл) добавляли в питательные среды до конечных концентраций 50; 100; 250 и 500 мг/л на 13-е сутки культивирования. Суспензионные культуры инкубировали в присутствии препарата элиситоров в течение 2 сут. Затем биомассу клеточных суспензий отделяли от питательной среды, отбирали навеску для оценки активности L-фенилаланинаммоний-лиазы (ФАЛ), оставшуюся часть высушивали и использовали для получения водно-спиртовых экстрактов, в которых определяли содержание вторичных метаболитов фенольной природы и антирадикальную активность (АРА).

Количественную оценку суммарного содержания фенольных соединений (ФС) в пересчете на феруловую кислоту производили на основе реакции комплексообразования с реактивом Фолина – Дениса, флавоноидов в пересчете на кверцетин – по реакции с  $AlCl_3$  [26]. Содержание ГКК определяли в пересчете на цикориевую кислоту методом прямой спектрофотометрии согласно работе [27]. Для определения АРА экстрактов использовали метод, основанный на взаимодействии антиоксидантов, характеризующихся антирадикальными свойствами, со стабильным хромоген-радикалом 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразилом (ДФПГ) [28; 29]. Ингибирование свободных радикалов ДФПГ ( $I_{ДФПГ}$ ) в процентах рассчитывали по формуле

$$I_{ДФПГ} = ((A - B)/A) \cdot 100,$$

где  $A$  – поглощение контрольной пробы;  $B$  – поглощение опытного образца, содержащего экстракт из суспензионной культуры.

Активность ФАЛ определяли согласно работе [30] и рассчитывали в наномолях коричной кислоты на 1 мг белка в час исходя из того, что изменение поглощения при 290 нм на 0,01 эквивалентно образованию 3,09 нмоль коричной кислоты. Содержание белка в пробах оценивали по методу Бредфорда [31] с помощью калибровочной кривой, полученной для бычьего сывороточного альбумина.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы *Microsoft Excel*. Данные представлены как среднее значение и стандартная ошибка среднего ( $Mean \pm SE$ ). Достоверность различий между контрольным и опытным образцами определяли на основе  $t$ -критерия Стьюдента. Различия считали достоверными при  $p < 0,05$ .

## Результаты и их обсуждение

Наиболее выраженная элиситориндуцированная стимуляция вторичного метаболизма в культурах растительных клеток в большинстве случаев отмечается в поздней логарифмической фазе либо в начале стационарной фазы ростового цикла [12; 24]. В связи с этим внесение ДЭ в среду инкубации клеток суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench производили на 13-е сутки цикла выращивания (переход в стационарную фазу) [32]. В указанных условиях 2-суточная экспозиция клеток в присутствии 50–500 мг/л исследуемого элиситора индуцировала изменения уровней накопления суммы ФС в суспензионной культуре листового происхождения (рис. 1). Обработка клеток ДЭ в концентрациях 50 и 100 мг/л приводила к возрастанию суммарного содержания ФС на 28 и 51 % соответственно. Использование более высоких концентраций препарата элиситоров не сопровождалось усилением стимулирующего эффекта. В случае суспензионной культуры корневого происхождения достоверное повышение уровней накопления ФС отмечалось в присутствии только самой высокой из испытанных концентраций ДЭ – 500 мг/л. Таким образом, ответная реакция слабоагрегированной суспензионной культуры клеток *Echinacea purpurea* L. Moench листового происхождения на действие комплексного элиситора на основе гидролизата *Saccharomyces cerevisiae* проявлялась в гораздо большей степени по сравнению с реакцией высокоагрегированной культуры, инициированной из каллусов корневого происхождения.

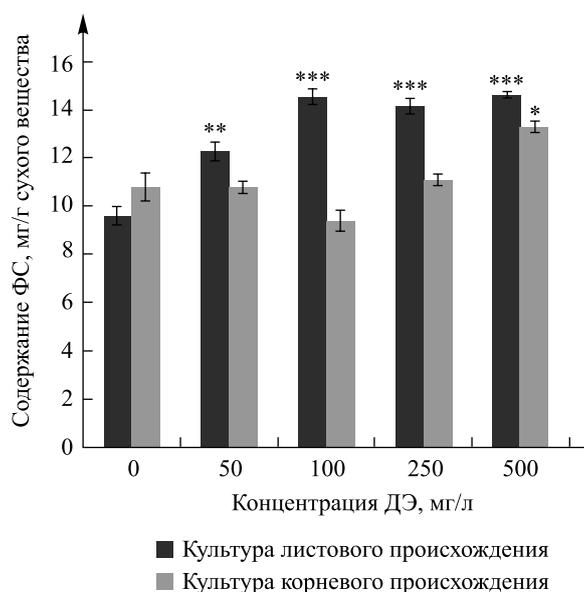


Рис. 1. Уровни накопления фенольных соединений в суспензионных культурах клеток *Echinacea purpurea* L. Moench разного происхождения в результате 2-суточной экспозиции в присутствии дрожжевого экстракта.

Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю:

\* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ ; \*\*\* –  $p < 0,001$  ( $n = 9$ )

Fig. 1. Accumulation levels of phenolic compounds in *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures of different origin in result yeast extract action during 2 d.

The significance of differences was calculated to the control:

\* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$ ; \*\*\* –  $p < 0.001$  ( $n = 9$ )

Как уже отмечалось, доминирующей группой биологически активных соединений фенольного комплекса водно-спиртовых экстрактов из культур клеток и тканей *Echinacea purpurea* L. Moench являются фенолпропаноиды – ГКК и их производные, на основе которых синтезируются флавоноиды, кумарины, стильбены, лигнаны и др. Помимо фенолпропаноидов, эхинацея пурпурная содержит такие ценные ФС, как флавоноиды (кверцетин, кемпферол, лютеолин, апигенин, изорамнетин и их различные гликозиды) [33]. Для оценки элиситорной активности ДЭ в нашей работе были проанализированы изменения уровней накопления указанных выше классов ФС в обработанных клетках исследуемых суспензионных культур. В результате воздействия 100–500 мг/л ДЭ содержание ГКК и их производных в клетках суспензионной культуры листового происхождения возрастало в 2,5 раза относительно контрольного образца (рис. 2).

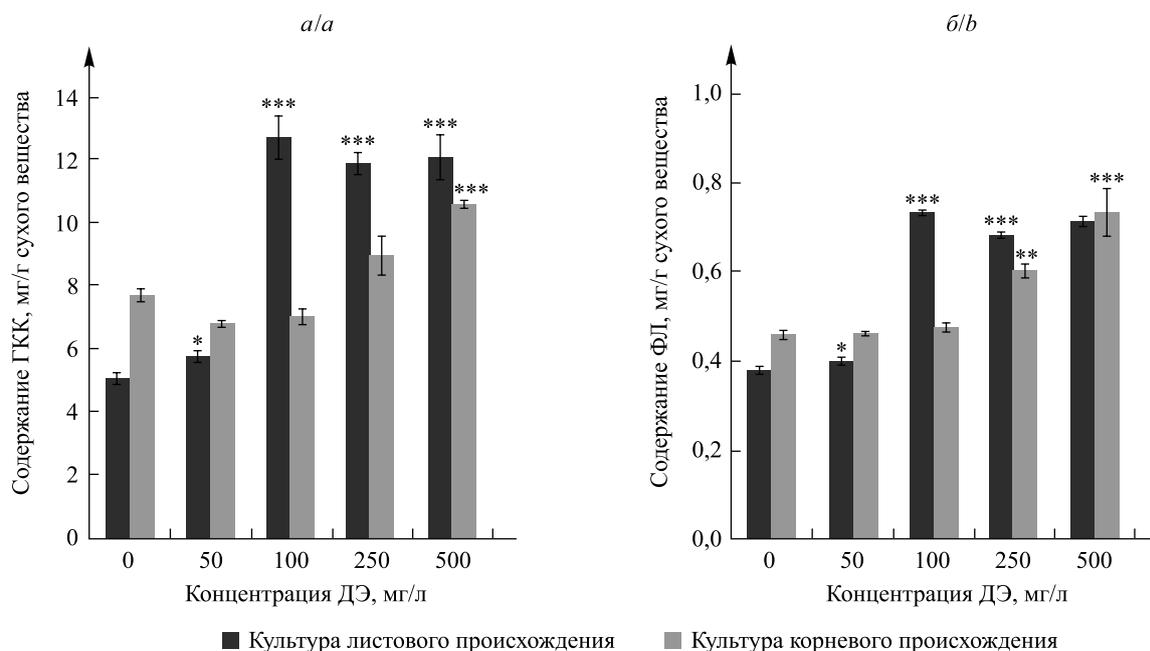


Рис. 2. Уровни накопления гидроксициричных кислот (а) и флавоноидов (б) в суспензионных культурах клеток *Echinacea purpurea* L. Moench разного происхождения в результате 2-суточной экспозиции в присутствии дрожжевого экстракта.

Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю:  
\* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ ; \*\*\* –  $p < 0,001$  ( $n = 9$ )

Fig. 2. Accumulation levels of hydroxycinnamic acids (a) and flavonoids (b) in *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures of different origin in result yeast extract action during 2 d. The significance of differences was calculated to the control:  
\* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$ ; \*\*\* –  $p < 0.001$  ( $n = 9$ )

Модификация биосинтетического потенциала в отношении флавоноидов под влиянием разных концентраций ДЭ имела аналогичный характер. Практически 2-кратное возрастание уровней накопления данных соединений отмечалось у суспензионной культуры листового происхождения при экспозиции в присутствии 100–500 мг/л препарата элиситоров. В клетках суспензионной культуры корневого происхождения, обработанных 500 мг/л ДЭ, рост содержания ГКК и их производных в среднем составил 36 %. Более низкие концентрации не вызывали достоверных изменений уровней их накопления. В отличие от ГКК рост содержания флавоноидов в клетках суспензионной культуры корневого происхождения отмечался в результате воздействия 250 мг/л ДЭ. Величина стимулирующего эффекта составила 1,3 раза. В присутствии 500 мг/л гидролизата дрожжей уровни накопления флавоноидов были в 1,6 раза выше, чем в необработанных клетках.

Способность ДЭ индуцировать усиление биосинтеза вторичных метаболитов разных классов в культурах растительных клеток и тканей, генетически трансформированных корней показана на примере алкалоидов [34; 35], изопреноидов [36–38], а также ФС [39]. Под действием данного биотического элиситора отмечалась выраженная стимуляция фенольного метаболизма, в частности продукции изофлавонов клетками суспензионной культуры *Psoralea corylifolia* L. [40], суммы ФС клетками суспензионной культуры *Astragalus chrysochlorus* [41], лигнанов культурой клеток *Linum album* [42], фенилпропаноидов суспензионной культурой *Hypericum perforatum* L. [43], фенолокислот культурой адвентивных побегов *Eryngium planum* L. [44], розмариновой кислоты культурой генетически трансформированных корней *Salvia miltiorrhiza* [45] и др. Следовательно, полученные для суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench результаты доказывают возможность участия компонентов ДЭ в реализации неспецифических адаптивных реакций растительных клеток, приводящих к усилению биосинтеза фитоалексинов.

Подавляющее большинство известных ФС синтезируются по шикиматному пути. Специфические реакции вторичного метаболизма, ведущие к биосинтезу ФС, начинаются с дезаминирования L-фенилаланина, катализируемого центральным ферментом фенилпропаноидного метаболизма – ФАЛ. В результате образуется коричная кислота, которая хотя и не является фенольным соединением (не содержит обязательной для всех фенолов гидроксогруппы в циклической части молекулы), но дает начало различным ГКК – *para*-кумаровой (оксикоричной), кофейной, феруловой, синаповой кислотам. В связи

с этим представляло интерес оценить степень модификации функционирования ФАЛ в клетках суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench, подвергнутых воздействию ДЭ. Активность указанного фермента последовательно возрастала при повышении концентрации ДЭ от 100 до 500 мг/л в среде инкубации суспензионной культуры, инициированной из каллусов листового происхождения (рис. 3). Стимулирующий эффект для суспензионной культуры корневого происхождения был зарегистрирован при экспозиции клеток в присутствии 250–500 мг/л препарата элиситоров. В максимальной из испытанных концентраций ДЭ индуцировал повышение активности ФАЛ в суспензионной культуре листового происхождения в 2,7 раза, корневого – в 1,3 раза. Менее выраженная способность ДЭ в концентрациях 100–250 мг/л стимулировать работу ключевого фермента биосинтеза ФС в клетках суспензионной культуры корневого происхождения, вероятно, является причиной ее более низкого продукционного потенциала в отношении ГКК и флавоноидов (см. рис. 2).

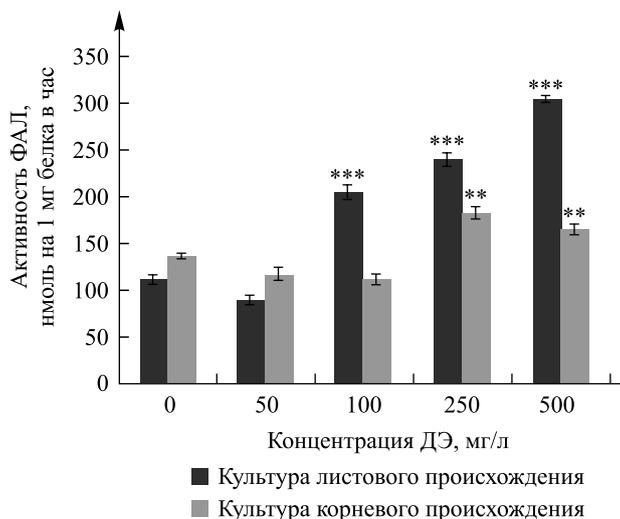


Рис. 3. Активность L-фенилаланинаммоний-лиазы в суспензионных культурах клеток *Echinacea purpurea* L. Moench разного происхождения в результате 2-суточной экспозиции в присутствии дрожжевого экстракта. Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю: \*\* –  $p < 0,01$ ; \*\*\* –  $p < 0,001$  ( $n = 9$ )

Fig. 3. The activity of L-phenylalanine ammonium lyase in *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures of different origin in result yeast extract action during 2 d. The significance of differences was calculated to the control: \*\* –  $p < 0.01$ ; \*\*\* –  $p < 0.001$  ( $n = 9$ )

Достаточно хорошо выраженная корреляция между активностью ФАЛ и уровнями накопления ГКК и их производных проявлялась как для листовой ( $r = 0,88$ ), так и для корневой ( $r = 0,83$ ) суспензионной культуры. Степень положительной корреляции между активностью ФАЛ и содержанием флавоноидов снижалась для суспензионной культуры клеток корневого происхождения ( $r = 0,78$ ) и не претерпевала изменений для культуры листового происхождения ( $r = 0,89$ ). Следовательно, стимуляция продукции ГКК исследуемыми суспензионными культурами клеток *Echinacea purpurea* L. Moench в результате воздействия элиситоров ДЭ обусловлена повышением активности ФАЛ как ключевого фермента биосинтеза указанных соединений.

Как известно, многие ФС являются мощными антиоксидантами. Окислительный стресс выступает патогенетическим фактором развития многих заболеваний и патофизиологических процессов (воспаление, атеросклероз, канцерогенез, диабет и др.), поэтому получение эффективных природных антиоксидантов является актуальной задачей. Антиоксидантная активность фенолокислот связана с наличием в их структуре подвижных атомов водорода в гидроксильных группах, которые легко отдают этот атом водорода при взаимодействии со свободными радикалами. В результате образуются феноксильные радикалы, обладающие меньшей реакционной активностью и способные прерывать цепной механизм окисления [46; 47]. Наиболее простой и удобной моделью для оценки АРА веществ является реакция со свободным стабильным радикалом ДФПГ, который, взаимодействуя с молекулой антиоксиданта, переходит в нерадикальную форму. В нашей работе для определения АРА с помощью ДФПГ получали серию разведений (в 2,5–100,0 раза) водно-спиртовых экстрактов из клеток исследуемых суспензионных культур, обработанных ДЭ. В случае культуры листового происхождения наиболее резкое возрастание ингибирующего эффекта отмечалось при повышении концентрации экстрактов от 0,01 до 0,10 % в результате воздействия 100–500 мг/л ДЭ (рис. 4, а).

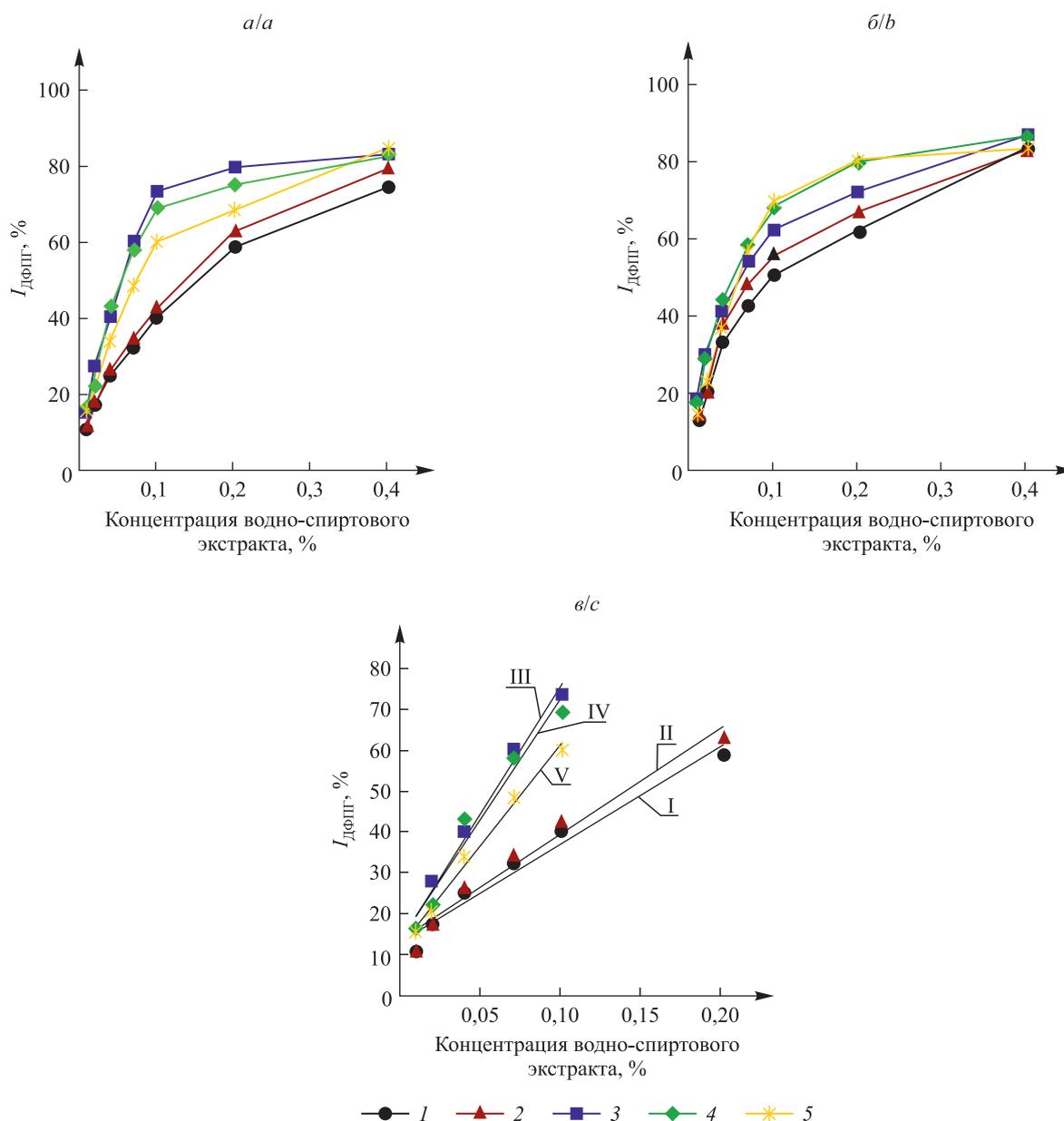


Рис. 4. Зависимости ингибирования радикалов ДФПГ от концентрации водно-спиртовых экстрактов из клеток суспензионной культуры *Echinacea purpurea* L. Moench листового (а, в) и корневого (б) происхождения в результате 2-суточной экспозиции в присутствии дрожжевого экстракта: 1 – контроль; 2 – 50 мг/л ДЭ; 3 – 100 мг/л ДЭ; 4 – 250 мг/л ДЭ; 5 – 500 мг/л ДЭ. Представлены средние значения (маркеры) и линии тренда, построенные на основании уравнения регрессии (y), а также величин достоверности аппроксимации ( $R^2$ ): I –  $y = 243,06x + 13,142$  ( $R^2 = 0,9688$ ); II –  $y = 263,99x + 13,524$  ( $R^2 = 0,9677$ ); III –  $y = 632,96x + 13,078$  ( $R^2 = 0,9822$ ); IV –  $y = 599,82x + 13,209$  ( $R^2 = 0,9629$ ); V –  $y = 505,04x + 11,618$  ( $R^2 = 0,9906$ ).

Величины ошибок средних значений не превышают 5 %

Fig. 4. Dependences of DPPH radicals inhibition on concentration of water-alcohol extracts from *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell culture of leaf (a, c) and root (b) origin in result yeast extract action during 2 d: 1 – control; 2 – 50 mg/L yeast extract; 3 – 100 mg/L yeast extract; 4 – 250 mg/L yeast extract; 5 – 500 mg/L yeast extract. Data presented by markers, trend line are based on regression equation (y) and significantly approximate by  $R^2$  coefficient: I –  $y = 243.06x + 13.142$  ( $R^2 = 0.9688$ ); II –  $y = 263.99x + 13.524$  ( $R^2 = 0.9677$ ); III –  $y = 632.96x + 13.078$  ( $R^2 = 0.9822$ ); IV –  $y = 599.82x + 13.209$  ( $R^2 = 0.9629$ ); V –  $y = 505.04x + 11.618$  ( $R^2 = 0.9906$ ). Error values of averages don't exceed 5 %

Подобный характер имели концентрационные зависимости ингибирования радикалов ДФПГ для контрольного и всех опытных образцов экстрактов, полученных из культуры корневого происхождения (рис. 4, б). В целях сравнительной оценки АРА разных образцов обычно используют величину  $IC_{50}$  – концентрацию, при которой наблюдается 50 % ингибирование радикалов ДФПГ. Для определения  $IC_{50}$  были проанализированы концентрационные зависимости ингибирования ДФПГ, для которых проводили аппроксимацию данных в области полумаксимального ингибирования линейной функцией, как показано на рис. 4, в, на примере суспензионной культуры листового происхождения.

Проведенный анализ величин  $IC_{50}$  свидетельствует, что в контроле водно-спиртовой экстракт из суспензионной культуры корневого происхождения характеризуется более высокой АРА. Воздействие компонентов ДЭ приводило к возрастанию антирадикальных свойств получаемых экстрактов. Самое низкое значение  $IC_{50}$  выявлено у экстракта из суспензионной культуры листового происхождения, обработанной 100 мг/л ДЭ.

**Влияние дрожжевого экстракта на величины  $IC_{50}$  водно-спиртовых экстрактов из клеток суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench в реакции с ДФПГ**

**Influence of yeast extract on  $IC_{50}$  values of water-alcohol extracts from *Echinacea purpurea* L. Moench suspension cell cultures determined using the DPPH assay**

| Концентрация ДЭ, мг/л | $IC_{50}$ , %                                |  |
|-----------------------|--|--|
|                       | Экстракт из культуры листового происхождения | Экстракт из культуры корневого происхождения |
| 0                     | 0,152 ± 0,011                                | 0,091 ± 0,011                                |
| 50                    | 0,138 ± 0,008                                | 0,079 ± 0,006                                |
| 100                   | 0,058 ± 0,004                                | 0,076 ± 0,005                                |
| 250                   | 0,061 ± 0,003                                | 0,070 ± 0,007                                |
| 500                   | 0,076 ± 0,007                                | 0,073 ± 0,006                                |

Таким образом, 2-суточная экспозиция клеток суспензионных культур в присутствии 100–500 мг/л ДЭ приводила к существенному возрастанию в получаемых экстрактах количества соединений с антирадикальными свойствами. Изменения АРА экстрактов из суспензионной культуры *Echinacea purpurea* L. Moench листового происхождения, инкубируемых в присутствии разных концентраций ДЭ, коррелировали с уровнями накопления отдельных групп ФС – ГКК и флавоноидов ( $r = 0,98$ ). В случае суспензионной культуры корневого происхождения положительная корреляция между указанными показателями отсутствовала.

### Заключение

Характер воздействия препарата элиситоров ДЭ на клетки суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench зависит от его концентрации и типа культуры. Различия в степени агрегированности и исходном биосинтетическом потенциале исследуемых суспензионных культур листового и корневого происхождения обуславливают особенности проявления стимулирующего действия ДЭ на уровни накопления фенилпропаноидов и флавоноидов. Как известно, высокая агрегированность суспензионных культур приводит к значительной гетерогенности химического микроокружения составляющих ее клеток, тогда как в слабоагрегированной суспензионной культуре практически все клетки в одинаковой степени «открыты» для внешнего воздействия. Показано, что эффективность применения данного биотического элиситора гораздо выше для слабоагрегированной суспензионной культуры листового происхождения, которая изначально характеризовалась более низким содержанием ГКК по сравнению с культурой корневого происхождения. Воздействие 100–500 мг/л ДЭ индуцировало существенное усиление биосинтеза ГКК, в результате чего их доля в комплексе вторичных метаболитов фенольной природы возрастала до 82–87 % (в контроле в среднем 50–51 %). Одновременно с этим наблюдалась стимуляция образования флавоноидов, однако их удельный вес не превышал 5 % от суммарного содержания ФС. Таким образом, резкое возрастание уровней накопления ГКК при 2-суточной экспозиции клеток суспензионной культуры *Echinacea purpurea* L. Moench листового происхождения в присутствии ДЭ отражает первичную и наиболее чувствительную реакцию, представляющую комплекс биохимических изменений в цепочке биосинтеза индуцибельных защитных соединений фенольной природы. Для суспензионной культуры корневого происхождения, отличающейся преобладанием фракции многоклеточных агрегатов и изначально более высоким содержанием исследуемых вторичных метаболитов, стрессовая реакция, индуцируемая компонентами ДЭ, проявлялась в меньшей степени.

В основе стимулирующего воздействия компонентов ДЭ на продукционный потенциал суспензионных культур *Echinacea purpurea* L. Moench лежит повышение активности ФАЛ. Установленные особенности модуляции работы данного фермента элиситорами ДЭ в культурах разного происхождения определяют различия в уровнях накопления ГKK и флавоноидов. Усиление их биосинтеза в обработанных ДЭ клетках суспензионной культуры листового происхождения коррелирует с ростом АРА получаемых на их основе экстрактов. Отсутствие подобной корреляции в случае суспензионной культуры корневого происхождения указывает на то, что проявление антирадикальных свойств получаемых экстрактов определяется содержанием не только фенилпропаноидов и флавоноидов, но и других групп вторичных метаболитов.

### Библиографические ссылки

1. Angelova Z, Georgiev S, Roos W. Elicitation of plants. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2006;20(2):72–83. DOI: 10.1080/13102818.2006.10817345.
2. Ramirez-Estrada K, Vidal-Limon H, Hidalgo D, Moyano E, Golenioski M, Cusidó RM, et al. Elicitation, an effective strategy for the biotechnological production of bioactive high-added value compounds in plant cell factories. *Molecules* [Internet]. 2016 [cited 2020 March 1];21(2):182. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/2/182/pdf>. DOI: 10.3390/molecules21020182.
3. Ochoa-Villarreal M, Howat S, Hong S, Jang MO, Jin Y-W, Lee E-K, et al. Plant cell culture strategies for the production of natural products. *BMB Reports*. 2016;49(3):149–158. DOI: 10.5483/bmbrep.2016.49.3.264.
4. Halder M, Sarkar S, Jha S. Elicitation: a biotechnological tool for enhanced production of secondary metabolites in hairy root cultures. *Engineering in Life Sciences*. 2019;19(12):880–895. DOI: 10.1002/elsc.201900058.
5. Isah T, Umar S, Mujib A, Sharma MP, Rajasekharan PE, Zafar N, et al. Secondary metabolism of pharmaceuticals in the plant *in vitro* cultures: strategies, approaches, and limitations to achieving higher yield. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2018;132(2):239–265. DOI: 10.1007/s11240-017-1332-2.
6. Vasconsuelo A, Boland R. Molecular aspects of the early stages of elicitation of secondary metabolites in plants. *Plant Science*. 2007;172(5):861–875. DOI: 10.1016/j.plantsci.2007.01.006.
7. Baenas N, García-Viguera C, Moreno DA. Elicitation: a tool for enriching the bioactive composition of foods. *Molecules* [Internet]. 2014 [cited 2020 March 1];19(9):13541–13563. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/19/9/13541/pdf>. DOI: 10.3390/molecules190913541.
8. Namdeo AG. Plant cell elicitation for production of secondary metabolites: a review. *Pharmacognosy Reviews*. 2007;1(1):69–79.
9. Mishra AK, Sharma K, Misra RS. Elicitor recognition, signal transduction and induced resistance in plants. *Journal of Plant Interactions*. 2012;7(2):95–120. DOI: 10.1080/17429145.2011.597517.
10. Zhai X, Jia M, Chen L, Zheng C-J, Rahman K, Han T, et al. The regulatory mechanism of fungal elicitor-induced secondary metabolite biosynthesis in medical plants. *Critical Reviews in Microbiology*. 2017;43(2):238–261. DOI: 10.1080/1040841X.2016.1201041.
11. Naik PM, Al-Khayri JM. Abiotic and biotic elicitors – role in secondary metabolites production through *in vitro* culture of medicinal plants. In: Shanker AK, Shanker C, editors. *Abiotic and biotic stress in plants: recent advances and future perspectives*. Rijeka: InTech; 2016. p. 247–277. DOI: 10.5772/61442.
12. Baldi A, Srivastava AK, Bisaria VS. Fungal elicitors for enhanced production of secondary metabolites in plant cell suspension cultures. In: Varma A, Kharkwal AC, editors. *Symbiotic fungi: principles and practice*. Berlin: Springer-Verlag; 2009. p. 373–380. (Soil Biology; volume 18). DOI: 10.1007/978-3-540-95894-9\_23.
13. Соколов ЮА. Элиситоры и их применение. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя хімічных навук*. 2014; 4:109–121.
14. Shasmita, Singh NR, Rath SK, Behera S, Naik SK. *In vitro* secondary metabolite production through fungal elicitation: an approach for sustainability. In: Prasad R, Kumar V, Kumar M, Wang S, editors. *Fungal nanobionics: principles and applications*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2018. p. 215–242. DOI: 10.1007/978-981-10-8666-3\_9.
15. Netala VR, Kotakadi VS, Gaddam SA, Ghosh SB, Tartte V. Elicitation of gymnemiac acid production in cell suspension cultures of *Gymnema sylvestre* R. Br. through endophytic fungi. *3 Biotech* [Internet]. 2016 [cited 2020 March 1];6(2):232. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-016-0555-y>. DOI: 10.1007/s13205-016-0555-y.
16. Tonk D, Mujib A, Maqsood M, Ali M, Zafar N. *Aspergillus flavus* fungus elicitation improves vincristine and vinblastine yield by augmenting callus biomass growth in *Catharanthus roseus*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2016;126(2):291–303. DOI: 10.1007/s11240-016-0998-1.
17. Parsons JL, Cameron SI, Harris CS, Smith ML. *Echinacea* biotechnology: advances, commercialization and future considerations. *Pharmaceutical Biology*. 2018;56(1):485–494. DOI: 10.1080/13880209.2018.1501583.
18. Murthy HN, Kim Y-S, Park S-Y, Paek K-Y. Biotechnological production of caffeic acid derivatives from cell and organ cultures of *Echinacea* species. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014;98(18):7707–7717. DOI: 10.1007/s00253-014-5962-6.
19. Abbasi BH, Liu R, Saxena PK, Liu C-Z. Cichoric acid production from hairy root cultures of *Echinacea purpurea* grown in a modified airlift bioreactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2009;84(11):1697–1701. DOI: 10.1002/jctb.2233.
20. Ramezannezhad R, Aghdasi M, Fatemi M. Enhanced production of cichoric acid in cell suspension culture of *Echinacea purpurea* by silver nanoparticle elicitation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2019;139(2):261–273. DOI: 10.1007/s11240-019-01678-4.
21. Юрин ВМ, Дитченко ТИ, Филиппова СН, Молчан ОВ, Логвина АО, Глушакова ДЮ и др. Коллекции каллусных культур лекарственных растений. В: *Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира. Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси; 6–8 июня 2017 г.; Минск, Беларусь. Часть 1*. Минск: Медисонт; 2017. с. 481–486.
22. Дитченко ТИ, Шабуня ПС, Фатыхова СА, Молчан ОВ, Юрин ВМ. Анализ производных кофейной кислоты в каллусной культуре *Echinacea purpurea*. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017;7(2):55–63. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-55-63.

23. Дитченко ТИ, Юрин ВМ. Регуляция продукции вторичных метаболитов фенольной природы каллусной культурой *Echinacea purpurea* L. Moench корневого происхождения. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018; 2:57–64.
24. Yue W, Ming Q-L, Lin B, Rahman K, Zheng C-J, Han T, et al. Medicinal plant cell suspension cultures: pharmaceutical applications and high-yielding strategies for the desired secondary metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016;36(2):215–232. DOI: 10.3109/07388551.2014.923986.
25. Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
26. Запрометов МН. Фенольные соединения и методы их исследования. В: Павлинова ОА, редактор. *Биохимические методы в физиологии растений*. Москва: Наука; 1971. с. 185–197.
27. Куркин ВА, Авдеева ОИ, Авдеева ЕВ, Мизина ПГ. Количественное определение суммы гидроксикоричных кислот в надземной части *Echinacea purpurea*. *Растительные ресурсы*. 1998;34(2):81–85.
28. Волков ВА, Дорофеева НА, Пахомов ПМ. Кинетический метод анализа антирадикальной активности экстрактов растений. *Химико-фармацевтический журнал*. 2009;43(6):27–31.
29. Филиппенко ТА, Белая НИ, Николаевский АН. Фенольные соединения растительных экстрактов и их активность в реакции с дифенилпикрилгидразилом. *Химико-фармацевтический журнал*. 2004;38(8):34–36.
30. Zucker M. Sequential induction of phenylalanine ammonia-lyase and a lyase-inactivating system in potato tuber disks. *Plant Physiology*. 1968;43(3):365–374. DOI: 10.1104/pp.43.3.365.
31. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;72(1–2):248–254. DOI: 10.1006/abio.1976.9999.
32. Юрин ВМ, Дитченко ТИ, Филиппова СН, Ключанкова МВ, Логвина АО. Характеристика суспензионной культуры как объекта для промышленного производства фармакологически активных веществ. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*. 2016;11(1):9–31.
33. Куркин ВА, Акушская АС, Авдеева ЕВ, Вельямкина ЕИ, Даева ЕД, Каденцев ВИ. Флавоноиды травы эхинацеи пурпурной. *Химия растительного сырья*. 2010;4:87–89.
34. Loc NH, Anh NHT, Khuyen LTM, An TNT. Effects of yeast extract and methyl jasmonate on the enhancement of solasodine biosynthesis in cell cultures of *Solanum hainanense* Hance. *Journal of BioScience and Biotechnology* [Internet]. 2014 [cited 2020 March 1];3(1):1–6. Available from: [http://www.jbb.uni-plovdiv.bg/documents/27807/352484/jbb\\_2014-3\(1\)-pages\\_1-6.pdf](http://www.jbb.uni-plovdiv.bg/documents/27807/352484/jbb_2014-3(1)-pages_1-6.pdf).
35. Correa-Higuera LJ, Sepúlveda-García EB, Ponce-Noyola T, Trejo-Espino JL, Jiménez-Aparicio AR, Luna-Palencia GR, et al. Glucoindole alkaloid accumulation induced by yeast extract in *Uncaria tomentosa* root cultures is involved in defense response. *Biotechnology Letters*. 2019;41(10):1233–1244. DOI: 10.1007/s10529-019-02714-1.
36. Yuan Y-J, Li C, Hu Z-D, Wu J-C, Zeng A-P. Fungal elicitor-induced cell apoptosis in suspension cultures of *Taxus chinensis* var. *mairei* for taxol production. *Process Biochemistry*. 2002;38(2):193–198. DOI: 10.1016/S0032-9592(02)00071-7.
37. Putalun W, Luealon W, De-Eknamkul W, Tanaka H, Shoyama Y. Improvement of artemisinin production by chitosan in hairy root cultures of *Artemisia annua* L. *Biotechnology Letters*. 2007;29(7):1143–1146. DOI: 10.1007/s10529-007-9368-8.
38. Xu X, Hu X, Neill SJ, Fang J, Cai W. Fungal elicitor induces singlet oxygen generation, ethylene release and saponin synthesis in cultured cells of *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Plant and Cell Physiology*. 2005;46(6):947–954. DOI: 10.1093/pcp/pci103.
39. Roat C, Ramawat KG. Elicitor-induced accumulation of stilbenes in cell suspension cultures of *Cayratia trifolia* (L.) Domin. *Plant Biotechnology Reports*. 2009;3(2):135–138. DOI: 10.1007/s11816-009-0082-y.
40. Shinde AN, Malpathak N, Fulzele DP. Optimized production of isoflavones in cell cultures of *Psoralea corylifolia* L. using elicitation and precursor feeding. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2009;14(5):612. DOI: 10.1007/s12257-008-0316-9.
41. Cakir O, Ari S. Defensive and secondary metabolism in *Astragalus chrysochlorus* cell cultures, in response to yeast extract stressor. *Journal of Environmental Biology*. 2009;30(1):51–55.
42. Bahabadi SE, Sharifi M, Behmanesh M, Safaie N, Murata J, Araki R, et al. Time-course changes in fungal elicitor-induced lignan synthesis and expression of the relevant genes in cell cultures of *Linum album*. *Journal of Plant Physiology*. 2012;169(5):487–491. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.12.006.
43. Gadzovska Simic S, Tusevski O, Maury S, Hano C, Delaunay A, Chabbert B, et al. Fungal elicitor-mediated enhancement in phenylpropanoid and naphthodianthrone contents of *Hypericum perforatum* L. cell cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2015;122(1):213–226. DOI: 10.1007/s11240-015-0762-y.
44. Kikowska M, Kędziora I, Krawczyk A, Thiem B. Methyl jasmonate, yeast extract and sucrose stimulate phenolic acids accumulation in *Eryngium planum* L. shoot cultures. *Acta Biochimica Polonica*. 2015;62(2):197–200. DOI: 10.18388/abp.2014\_880.
45. Yan Q, Shi M, Ng J, Wu JY. Elicitor-induced rosmarinic acid accumulation and secondary metabolism enzyme activities in *Salvia miltiorrhiza* hairy roots. *Plant Science*. 2006;170(4):853–858. DOI: 10.1016/j.plantsci.2005.12.004.
46. Leopoldini M, Marino T, Russo N, Toscano M. Antioxidant properties of phenolic compounds: H-atom versus electron transfer mechanism. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2004;108(22):4916–4922. DOI: 10.1021/jp037247d.
47. Kumar N, Goel N. Phenolic acids: natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports* [Internet]. 2019 [cited 2020 March 1];24:e00370. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2215017X19302383?token=67262F1C86CB4FEDE5B5D42FA891AC21D1B658CF599F9A2C4845FA40EA3101F18397AD015842CE2B786C7B-C7A4E20FE9>. DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00370.

## References

1. Angelova Z, Georgiev S, Roos W. Elicitation of plants. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2006;20(2):72–83. DOI: 10.1080/13102818.2006.10817345.
2. Ramirez-Estrada K, Vidal-Limon H, Hidalgo D, Moyano E, Golenioswki M, Cusidó RM, et al. Elicitation, an effective strategy for the biotechnological production of bioactive high-added value compounds in plant cell factories. *Molecules* [Internet]. 2016 [cited 2020 March 1];21(2):182. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/2/182/pdf>. DOI: 10.3390/molecules21020182.
3. Ochoa-Villarreal M, Howat S, Hong S, Jang MO, Jin Y-W, Lee E-K, et al. Plant cell culture strategies for the production of natural products. *BMB Reports*. 2016;49(3):149–158. DOI: 10.5483/bmbrep.2016.49.3.264.

4. Halder M, Sarkar S, Jha S. Elicitation: a biotechnological tool for enhanced production of secondary metabolites in hairy root cultures. *Engineering in Life Sciences*. 2019;19(12):880–895. DOI: 10.1002/elsc.201900058.
5. Isah T, Umar S, Mujib A, Sharma MP, Rajasekharan PE, Zafar N, et al. Secondary metabolism of pharmaceuticals in the plant *in vitro* cultures: strategies, approaches, and limitations to achieving higher yield. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2018;132(2):239–265. DOI: 10.1007/s11240-017-1332-2.
6. Vasconsuelo A, Boland R. Molecular aspects of the early stages of elicitation of secondary metabolites in plants. *Plant Science*. 2007;172(5):861–875. DOI: 10.1016/j.plantsci.2007.01.006.
7. Baenas N, García-Viguera C, Moreno DA. Elicitation: a tool for enriching the bioactive composition of foods. *Molecules* [Internet]. 2014 [cited 2020 March 1];19(9):13541–13563. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/19/9/13541/pdf>. DOI: 10.3390/molecules190913541.
8. Namdeo AG. Plant cell elicitation for production of secondary metabolites: a review. *Pharmacognosy Reviews*. 2007;1(1):69–79.
9. Mishra AK, Sharma K, Misra RS. Elicitor recognition, signal transduction and induced resistance in plants. *Journal of Plant Interactions*. 2012;7(2):95–120. DOI: 10.1080/17429145.2011.597517.
10. Zhai X, Jia M, Chen L, Zheng C-J, Rahman K, Han T, et al. The regulatory mechanism of fungal elicitor-induced secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Critical Reviews in Microbiology*. 2017;43(2):238–261. DOI: 10.1080/1040841X.2016.1201041.
11. Naik PM, Al-Khayri JM. Abiotic and biotic elicitors – role in secondary metabolites production through *in vitro* culture of medicinal plants. In: Shanker AK, Shanker C, editors. *Abiotic and biotic stress in plants: recent advances and future perspectives*. Rijeka: InTech; 2016. p. 247–277. DOI: 10.5772/61442.
12. Baldi A, Srivastava AK, Bisaria VS. Fungal elicitors for enhanced production of secondary metabolites in plant cell suspension cultures. In: Varma A, Kharkwal AC, editors. *Symbiotic fungi: principles and practice*. Berlin: Springer-Verlag; 2009. p. 373–380. (Soil Biology; volume 18). DOI: 10.1007/978-3-540-95894-9\_23.
13. Sokolov YuA. Elicitors and their application. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2014;4:109–121. Russian.
14. Shasmita, Singh NR, Rath SK, Behera S, Naik SK. *In vitro* secondary metabolite production through fungal elicitation: an approach for sustainability. In: Prasad R, Kumar V, Kumar M, Wang S, editors. *Fungal nanobionics: principles and applications*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2018. p. 215–242. DOI: 10.1007/978-981-10-8666-3\_9.
15. Netala VR, Kotakadi VS, Gaddam SA, Ghosh SB, Tartte V. Elicitation of gymnemic acid production in cell suspension cultures of *Gymnema sylvestris* R. Br. through endophytic fungi. *3 Biotech* [Internet]. 2016 [cited 2020 March 1];6(2):232. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-016-0555-y>. DOI: 10.1007/s13205-016-0555-y.
16. Tonk D, Mujib A, Maqsood M, Ali M, Zafar N. *Aspergillus flavus* fungus elicitation improves vincristine and vinblastine yield by augmenting callus biomass growth in *Catharanthus roseus*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2016;126(2):291–303. DOI: 10.1007/s11240-016-0998-1.
17. Parsons JL, Cameron SI, Harris CS, Smith ML. *Echinacea* biotechnology: advances, commercialization and future considerations. *Pharmaceutical Biology*. 2018;56(1):485–494. DOI: 10.1080/13880209.2018.1501583.
18. Murthy HN, Kim Y-S, Park S-Y, Paek K-Y. Biotechnological production of caffeic acid derivatives from cell and organ cultures of *Echinacea* species. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014;98(18):7707–7717. DOI: 10.1007/s00253-014-5962-6.
19. Abbasi BH, Liu R, Saxena PK, Liu C-Z. Cichoric acid production from hairy root cultures of *Echinacea purpurea* grown in a modified airlift bioreactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2009;84(11):1697–1701. DOI: 10.1002/jctb.2233.
20. Ramezannezhad R, Aghdasi M, Fatemi M. Enhanced production of cichoric acid in cell suspension culture of *Echinacea purpurea* by silver nanoparticle elicitation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2019;139(2):261–273. DOI: 10.1007/s11240-019-01678-4.
21. Yurin VM, Ditchenko TI, Filipava SN, Molchan OV, Lohvina HO, Glushakova DYU, et al. Collection of callus cultures of medicinal plants. In: *Role of botanical gardens and arboreta in conservation, investigation and sustainable using diversity of the plant world. Proceedings of the International conference dedicated to 85<sup>th</sup> anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus; 2017 June 6–8; Minsk, Belarus. Part I*. Minsk: Medisont; 2017. p. 481–486. Russian.
22. Ditchenko TI, Shabunya PS, Fatykhova SA, Molchan OV, Yurin VM. Analysis of caffeic acid derivatives in *Echinacea purpurea* callus culture. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(2):55–63. Russian. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-55-63.
23. Ditchenko TI, Yurin VM. Regulation of phenolic secondary metabolites production by *Echinacea purpurea* L. Moench callus culture of root origin. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2018;2:57–64. Russian.
24. Yue W, Ming Q-L, Lin B, Rahman K, Zheng C-J, Han T, et al. Medicinal plant cell suspension cultures: pharmaceutical applications and high-yielding strategies for the desired secondary metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016;36(2):215–232. DOI: 10.3109/07388551.2014.923986.
25. Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
26. Zaprometov MN. [Phenolic compounds and methods for their research]. In: Pavlinova OA, editor. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rastenii* [Biochemical methods in plant physiology]. Moscow: Nauka; 1971. p. 185–197. Russian.
27. Kurkin VA, Avdeeva OI, Avdeeva EV, Mizina PG. [Quantitative determination of the amount of hydroxycinnamic acids in the aerial part of *Echinacea purpurea*]. *Rastitel'nye resursy*. 1998;34(2):81–85. Russian.
28. Volkov VA, Dorofeeva NA, Pakhomov PM. Kinetic method for studying the antiradical activity of medicinal plant extracts. *Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal*. 2009;43(6):27–31. Russian.
29. Filippenko TA, Belaya NI, Nikolaevskiy AN. [Phenolic compounds of plant extracts and their activity in reaction with diphenylpicrylhydrazyl]. *Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal*. 2004;38(8):34–36. Russian.
30. Zucker M. Sequential induction of phenylalanine ammonia-lyase and a lyase-inactivating system in potato tuber disks. *Plant Physiology*. 1968;43(3):365–374. DOI: 10.1104/pp.43.3.365.
31. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;72(1–2):248–254. DOI: 10.1006/abio.1976.9999.
32. Yurin VM, Ditchenko TI, Filipava SN, Klyuchankova MV, Lohvina HO. Characterization of cell suspension culture as an object for industrial production of pharmacologically active substances. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funkcionirovaniya biosistem*. 2016;11(1):9–31. Russian.

33. Kurkin VA, Akushskaya AS, Avdeeva EV, Vel'myaikina EI, Daeva ED, Kadentsev VI. [*Echinacea purpurea* herb flavonoids]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2010;4:87–89. Russian.
34. Loc NH, Anh NHT, Khuyen LTM, An TNT. Effects of yeast extract and methyl jasmonate on the enhancement of solasodine biosynthesis in cell cultures of *Solanum hainanense* Hance. *Journal of BioScience and Biotechnology* [Internet]. 2014 [cited 2020 March 1];3(1):1–6. Available from: [http://www.jbb.uni-plovdiv.bg/documents/27807/352484/jbb\\_2014-3\(1\)-pages\\_1-6.pdf/](http://www.jbb.uni-plovdiv.bg/documents/27807/352484/jbb_2014-3(1)-pages_1-6.pdf/).
35. Correa-Higuera LJ, Sepúlveda-García EB, Ponce-Noyola T, Trejo-Espino JL, Jiménez-Aparicio AR, Luna-Palencia GR, et al. Glucoindole alkaloid accumulation induced by yeast extract in *Uncaria tomentosa* root cultures is involved in defense response. *Biotechnology Letters*. 2019;41(10):1233–1244. DOI: 10.1007/s10529-019-02714-1.
36. Yuan Y-J, Li C, Hu Z-D, Wu J-C, Zeng A-P. Fungal elicitor-induced cell apoptosis in suspension cultures of *Taxus chinensis* var. *mairei* for taxol production. *Process Biochemistry*. 2002;38(2):193–198. DOI: 10.1016/S0032-9592(02)00071-7.
37. Putalun W, Luealon W, De-Eknamkul W, Tanaka H, Shoyama Y. Improvement of artemisinin production by chitosan in hairy root cultures of *Artemisia annua* L. *Biotechnology Letters*. 2007;29(7):1143–1146. DOI: 10.1007/s10529-007-9368-8.
38. Xu X, Hu X, Neill SJ, Fang J, Cai W. Fungal elicitor induces singlet oxygen generation, ethylene release and saponin synthesis in cultured cells of *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Plant and Cell Physiology*. 2005;46(6):947–954. DOI: 10.1093/pcp/pci103.
39. Roat C, Ramawat KG. Elicitor-induced accumulation of stilbenes in cell suspension cultures of *Cayratia trifolia* (L.) Domin. *Plant Biotechnology Reports*. 2009;3(2):135–138. DOI: 10.1007/s11816-009-0082-y.
40. Shinde AN, Malpathak N, Fulzele DP. Optimized production of isoflavones in cell cultures of *Psoralea corylifolia* L. using elicitation and precursor feeding. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2009;14(5):612. DOI: 10.1007/s12257-008-0316-9.
41. Cakir O, Ari S. Defensive and secondary metabolism in *Astragalus chrysochlorus* cell cultures, in response to yeast extract stressor. *Journal of Environmental Biology*. 2009;30(1):51–55.
42. Bahabadi SE, Sharifi M, Behmanesh M, Safaie N, Murata J, Araki R, et al. Time-course changes in fungal elicitor-induced lignan synthesis and expression of the relevant genes in cell cultures of *Linum album*. *Journal of Plant Physiology*. 2012;169(5):487–491. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.12.006.
43. Gadzovska Simic S, Tusevski O, Maury S, Hano C, Delaunay A, Chabbert B, et al. Fungal elicitor-mediated enhancement in phenylpropanoid and naphthodianthrone contents of *Hypericum perforatum* L. cell cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2015;122(1):213–226. DOI: 10.1007/s11240-015-0762-y.
44. Kikowska M, Kędziora I, Krawczyk A, Thiem B. Methyl jasmonate, yeast extract and sucrose stimulate phenolic acids accumulation in *Eryngium planum* L. shoot cultures. *Acta Biochimica Polonica*. 2015;62(2):197–200. DOI: 10.18388/abp.2014\_880.
45. Yan Q, Shi M, Ng J, Wu JY. Elicitor-induced rosmarinic acid accumulation and secondary metabolism enzyme activities in *Salvia miltiorrhiza* hairy roots. *Plant Science*. 2006;170(4):853–858. DOI: 10.1016/j.plantsci.2005.12.004.
46. Leopoldini M, Marino T, Russo N, Toscano M. Antioxidant properties of phenolic compounds: H-atom versus electron transfer mechanism. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2004;108(22):4916–4922. DOI: 10.1021/jp037247d.
47. Kumar N, Goel N. Phenolic acids: natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports* [Internet]. 2019 [cited 2020 March 1];24:e00370. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2215017X19302383?token=67262F1C86CB4FEDE5B5D42FA891AC21D1B658CF599F9A2C4845FA40EA3101F18397AD015842CE2B786C7B-C7A4E20FE9>. DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00370.

Статья поступила в редколлегию 19.03.2020.  
Received by editorial board 19.03.2020.

ОЦЕНКА БИОХИМИЧЕСКИХ И ДЕГУСТАЦИОННЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ПЛОДОВ *PRUNUS CERASUS* L.Н. Ю. КОЛБАС<sup>1)</sup>, А. П. КОЛБАС<sup>1)</sup>, А. С. ДОМАСЬ<sup>1)</sup>, Д. ПРВУЛОВИЧ<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина,  
буль. Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь<sup>2)</sup>Университет г. Нови Сад, пл. Доситея Обрадовича, 8, 21000, г. Нови Сад, Сербия

Представлены данные о влиянии содержания сахаров, органических кислот, фенольных соединений (антоцианов, фенолкарбоновых кислот и флавонолов) на органолептические параметры плодов 9 сортов вишни обыкновенной (*Prunus cerasus* L.). Общее содержание фенольных соединений в 100 г плодов составило 72,52–180,61 мг галловой кислоты, антоцианов – от 32,69 до 259,45 мг цианидин-3-О-рутинозида, фенолкарбоновых кислот – от 48,45 до 75,20 мг кофейной кислоты, флавонолов – от 8,53 до 21,46 мг кверцетина. Наибольшее влияние на дегустационные параметры плодов вишни оказывает содержание антоцианов и сахаров.

**Ключевые слова:** плоды вишни; сорта вишни; антоцианы; фенолкарбоновые кислоты; флавонолы; дегустационная оценка.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность директору РУП «Институт пловодства» А. А. Таранову, старшему научному сотруднику отдела селекции плодовых культур И. Г. Полубятко, директору ОАО «Агро-сад Рассвет» В. П. Желенговскому и сотруднице предприятия Е. Г. Рой за оказанную помощь. Работа выполнена в рамках белорусско-сербского научно-технического проекта Б18СРБГ-010 «Фенольные соединения и антиоксидантная активность плодов вишни и черешни сербской и белорусской селекции» (№ ГР 20180998 от 28.06.2018 г.).

**Образец цитирования:**

Колбас НЮ, Колбас АП, Домась АС, Првулович Д. Оценка биохимических и дегустационных параметров плодов *Prunus cerasus* L. Журнал Белорусского государственного университета. Биология. 2020;2:49–57.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-49-57>

**For citation:**

Kolbas NY, Kolbas AP, Domas AS, Prvulović D. Evaluation of biochemical and tasting parameters of *Prunus cerasus* L. fruits. Journal of the Belarusian State University. Biology. 2020;2: 49–57. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-49-57>

**Авторы:**

**Наталья Юрьевна Колбас** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой химии биологического факультета.

**Александр Петрович Колбас** – кандидат биологических наук, доцент; начальник Центра экологии.

**Андрей Степанович Домась** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; декан биологического факультета.

**Дэян Првулович** – кандидат биохимических наук; доцент кафедры полевых и овощных культур сельскохозяйственного факультета.

**Authors:**

**Natallia Y. Kolbas**, PhD (biology), docent; head of the department of chemistry, faculty of biology.  
[n.kolbas@gmail.com](mailto:n.kolbas@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-2293-2880>

**Aliaksandr P. Kolbas**, PhD (biology), docent; chief of the Ecology Center.

[kolbas77@mail.ru](mailto:kolbas77@mail.ru)

**Andrei S. Domas**, PhD (agricultural sciences), docent; dean of the faculty of biology.

[wolf-983@mail.ru](mailto:wolf-983@mail.ru)

**Dejan Prvulović**, PhD (biochemistry); associate professor at the department of field and vegetable crops, faculty of agriculture.

[dejan.prvulovic@polj.uns.ac.rs](mailto:dejan.prvulovic@polj.uns.ac.rs)

<https://orcid.org/0000-0002-1880-4934>

## EVALUATION OF BIOCHEMICAL AND TASTING PARAMETERS OF *PRUNUS CERASUS* L. FRUITS

N. Y. KOLBAS<sup>a</sup>, A. P. KOLBAS<sup>a</sup>, A. S. DOMAS<sup>a</sup>, D. PRVULVIĆ<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Brest State A. S. Pushkin University, 21 Kasmanaŭtaŭ Boulevard, Brest 224016, Belarus

<sup>b</sup>University of Novi Sad, 8 Dositeja Obradovića Square, Novi Sad 21000, Serbia

Corresponding author: N. Y. Kolbas (n.kolbas@gmail.com)

Data on the effect of the content of phenolic compounds, including anthocyanins, phenolic acids and flavonols on the organoleptic parameters of fruits of 9 varieties of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) are presented in this article. The total phenolic content varied from 72.52 to 180.61 mg of gallic acid per 100 g of fresh weight (FW) fruit. The total anthocyanins content varied from 32.69 to 259.45 mg of cyanidin-3-O-rutinoside, the total phenolic acids content varied from 48.45 to 75.20 mg of caffeic acid and the total flavonols content varied from 8.53 to 21.46 mg of quercetin per 100 g of FW fruit. The anthocyanins and sugars content of significantly affect in the tasting parameters of sour cherry fruits.

**Keywords:** sour cherry fruits; varieties of sour cherry; anthocyanins; phenolic acids; flavonols; tasting evaluation.

**Acknowledgements.** The authors thank to A. A. Taranov, director of the Institute for Fruit Growing; to I. G. Palubiatka, senior researcher at the department of fruit crop selection, and also to the director of the Agro-Garden Rassvet V. P. Zhelengovsky and employee at the enterprise E. G. Roy for their technical assistance. Researches were supported by Belarusian-Serbian scientific and technical project B18SRBG-010 «Phenolic compounds and antioxidant activity of fruits of cherry and cherries of the Serbian and Belarusian selection» (No. SR 20180998 of 28.06.2018).

### Введение

Плоды вишни являются ценным источником таких биологически активных соединений, как органические кислоты, пектины, витамины, полифенолы и др. В Беларуси вишня обыкновенная (*Prunus cerasus* L.) культивируется на площади около 6188 га, что составляет 3,3 % от общемировых значений. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН<sup>1</sup>, по состоянию на 2018 г. в рейтинге 33 стран – производителей вишни Беларусь занимала 15-е место (0,57 % от мирового производства, или 6877 т в год). В государственный реестр сортов Республики Беларусь [1, с. 134] на 2019 г. были включены 7 сортов (Новодворская, Тургеневка, Жывица<sup>2</sup>, Гриот белорусский, Уйфехертой фюртош, Ливенская и Ласуха) и 1 семенной подвой вишни (*Prunus mahaleb* L.). Кроме того, учеными Беларуси создаются новые высокопродуктивные и устойчивые к болезням сорта и гибриды вишни [1, с. 134; 2]. Среди европейских сортов наиболее популярными остаются Облачинска (или Облачинская) [3], Монморанси (Montmorency), Норд Стар (Northstar), Шумадинка (Šumadinka), Балатон (Balaton) и Лютовка (Lutowka) [4].

Стоит отметить, что в процессе созревания сочных плодов происходит снижение количества свободных органических кислот с одновременным накоплением растворимых сахаров [5–7], а также фенольных соединений (ФС), которые, в свою очередь, во многом определяют органолептические свойства (вкус, аромат и окраску) растительной продукции [8].

Несмотря на имеющиеся в литературе данные о биохимическом составе плодов вишни, сведения о влиянии содержания ФС на их органолептические показатели фрагментарны.

Цель настоящего исследования – проанализировать влияние кислотности, содержания сахаров, ФС (в том числе антоцианов, фенолкарбоновых кислот и флавонолов) на дегустационную оценку плодов вишни.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить помологические (количество плодов в навеске 100 г, выход сока) и биохимические (содержание сахаров и сухих веществ, титруемая кислотность, сахарокислотный индекс) параметры плодов вишни потребительской спелости;
- 2) дать дегустационную оценку плодам вишни;
- 3) оценить параметры окраски сока вишни;
- 4) определить влияние содержания ФС (антоцианов, фенолкарбоновых кислот и флавонолов) на органолептические показатели плодов вишни.

<sup>1</sup>См.: <http://www.fao.org/faostat>.

<sup>2</sup>Здесь и далее наименование сорта приводится в соответствии с государственным реестром сортов Республики Беларусь.

## Материалы и методы исследования

Объектами исследования были плоды 8 сортов вишни белорусской селекции (Глубокская, Гриот белорусский, Жывица, Конфитюр, Ласуха, Милавица, Остромечевская и Вянок), культивируемых в РУП «Институт плодоводства» (аг. Самохваловичи, Минский район), и 1 сорта сербской селекции (Облачинска), выращиваемого в ОАО «Агро-сад Рассвет» (аг. Вистычи, Брестский район). Плоды заготавливали в стадии потребительской зрелости. Дегустационную оценку проводили закрытым способом путем анкетирования респондентов обоих полов различных возрастных групп по четырем показателям (внешний вид, аромат, вкус и сочность плодов) [9]. На основании среднего значения этих четырех параметров была дана общая оценка.

Для проведения лабораторных исследований порции плодов (100 г) каждого сорта гомогенизировали, получали сок, который далее анализировали.

Титруемую кислотность определяли потенциометрическим методом в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [7]. Для этого сок разбавляли дистиллированной водой в соотношении 1 : 10. Титрование вели 0,1 моль/л NaOH до pH 8,1 под контролем pH-метра СТ-6021А (*Kedida*, Китай). Титруемую кислотность выражали в граммах лимонной кислоты (ЛК) на 100 г сырых плодов (далее – г ЛК/100 г). Содержание растворимых сахаров определяли рефрактометрически при помощи рефрактометра ИРФ 454 Б2М (АО «КОМЗ», Россия) с учетом температурных поправок и выражали в градусах Брикса (далее – °Вх). Сахарокислотный индекс рассчитывали как отношение общего содержания растворимых сахаров к титруемой кислотности [10].

Содержание сухих веществ определяли гравиметрическим методом: 10 г плодов (без косточки) сушили в термостате при 80 °С не менее 20 ч до постоянной массы.

Общее содержание ФС определяли по стандартизированной методике [11]. Для этого к 0,1 мл сока плодов вишни добавляли 2,8 мл дистиллированной воды и 0,2 мл 2 н реактива Фолина – Чокальтеу, перемешивали, выдерживали 1 мин при комнатной температуре и вводили 0,8 мл 20 % раствора карбоната натрия. Полученную смесь перемешивали, выдерживали 40 мин при комнатной температуре. Оптическую плотность смеси измеряли с помощью спектрофотометра при  $\lambda = 765$  нм и длине пути светового монохромного луча 1 см. В качестве раствора сравнения использовали холостую пробу. Значение абсорбции при  $\lambda = 765$  нм пропорционально концентрации ФС в пересчете на галловую кислоту (ГК). Общее количество ФС выражали в миллиграммах ГК на 100 г сырых плодов вишни (далее – мг ГК/100 г).

Содержание фенолкарбоновых кислот и флавонолов определяли по модифицированной методике [12]. Для этого 0,25 мл сока плодов вишни смешивали с 0,25 мл 0,1 % HCl в 95 % этаноле, добавляли 4,5 мл 2 % HCl и выдерживали 20 мин при комнатной температуре. Изменение оптической плотности регистрировали при  $\lambda = 280$  нм (для фенолкарбоновых кислот) и  $\lambda = 360$  нм (для флавонолов). Содержание фенолкарбоновых кислот выражали в миллиграммах кофейной кислоты на 100 г плодов, флавонолов – в миллиграммах кверцетина на 100 г.

Общее количество антоцианов определяли pH-дифференцированным методом согласно работе [13]. Для анализа использовали 0,025 моль/л хлоридный (pH 1,0) и 0,4 моль/л ацетатный (pH 4,5) буферные растворы, которые готовили в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [13]. Точность значений pH буферных растворов контролировали с помощью pH-метра СТ-6021А (*Kedida*, Китай). Далее готовили по два разбавления (1 : 9 по объему) для каждого сока с применением хлоридного и ацетатного буферов. Оптическую плотность каждого из полученных растворов измеряли при  $\lambda = 510$  нм и  $\lambda = 700$  нм. В качестве растворов сравнения использовали соответствующие буферные растворы. Содержание антоцианов выражали в миллиграммах цианидин-3-О-рутинозида [14; 15] на 100 г сырых плодов, учитывая коэффициент разбавления и молярную экстинкцию доминирующего антоциана ( $7000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [13]).

Для спектрофотометрической характеристики окраски полученный сок центрифугировали в течение 10 мин при скорости 12 000 об/мин. Желтый цвет в окраске сока определяли по абсорбции при  $\lambda = 420$  нм ( $A_{420}$ ), красный – при  $\lambda = 520$  нм ( $A_{520}$ ), пурпурный – при  $\lambda = 620$  нм ( $A_{620}$ ) и длине оптического пути 1 см. Для каждого цвета рассчитывали процент от общей цветовой интенсивности, бурый индекс (тон) – как отношение  $A_{420}/A_{520}$ , фиолетовый индекс (ФИ) – как отношение  $A_{620}/A_{520}$  [16].

Все спектрофотометрические измерения осуществляли на спектрофотометре Proscan MC 122 (СООО «Проскан специальные инструменты», Беларусь). Опыты проведены в трехкратной повторности на базе кафедры химии биологического факультета БрГУ имени А. С. Пушкина.

Статистическая обработка данных, а также анализ главных компонентов (*principal component analysis*, PCA-тест) выполнены с использованием программ *Microsoft Excel* и *R* (версия 3.6.1) (*Foundation for Statistical Computing*, Вена, Австрия).

### Результаты и их обсуждение

Некоторые pomологические и биохимические параметры плодов вишни приведены в табл. 1. Согласно градации, представленной в работе [9, с. 344], наиболее крупноплодными являются сорта Остромечевская (средняя масса плода 5,5 г), Гриот белорусский и Ласуха (5,1 г). Сорта Глубокская, Жывица, Конфитюр, Милавица и Вянок характеризуются средним размером плодов (от 3,8 до 4,7 г), сорт Облачинска имеет мелкие плоды (2,8 г).

Таблица 1

Помологические и биохимические параметры плодов вишни потребительской спелости

Table 1

Pomological and biochemical parameters of ripe sour cherry fruits

| Сорт | <i>n</i> , шт. | <i>m</i> , г | $\eta$ , %   | Сухое вещество, % | СРС, °Вх     | ТК, г ЛК/100 г | СКИ          |
|------|----------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|----------------|--------------|
| GB   | 21,000 ± 0,009 | 12,3 ± 0,6   | 51,32 ± 4,47 | 15,11 ± 0,42      | 14,51 ± 0,43 | 0,510 ± 0,043  | 28,70 ± 2,31 |
| Gi   | 23,33 ± 0,50   | 8,78 ± 0,25  | 51,33 ± 2,33 | 16,86 ± 0,43      | 16,46 ± 0,42 | 0,47 ± 0,03    | 34,73 ± 1,84 |
| Glb  | 22,67 ± 0,50   | 9,75 ± 0,18  | 49,60 ± 1,03 | 16,74 ± 0,47      | 16,24 ± 0,46 | 0,47 ± 0,02    | 34,77 ± 0,84 |
| Kn   | 22,67 ± 0,50   | 10,74 ± 0,19 | 44,93 ± 1,08 | 17,17 ± 0,39      | 16,68 ± 0,37 | 0,47 ± 0,02    | 35,46 ± 0,92 |
| Las  | 19,67 ± 0,50   | 9,78 ± 0,31  | 52,14 ± 2,88 | 17,44 ± 0,31      | 17,04 ± 0,32 | 0,58 ± 0,04    | 29,54 ± 1,94 |
| Mil  | 23,33 ± 0,50   | 8,10 ± 0,13  | 56,97 ± 2,25 | 17,68 ± 0,21      | 17,18 ± 0,22 | 0,43 ± 0,02    | 39,72 ± 2,14 |
| Os   | 19,33 ± 1,00   | 7,52 ± 0,22  | 55,61 ± 1,85 | 16,77 ± 0,46      | 16,17 ± 0,45 | 0,72 ± 0,05    | 22,47 ± 1,59 |
| Vn   | 23,67 ± 0,50   | 10,06 ± 0,29 | 53,44 ± 2,07 | 16,38 ± 0,21      | 15,88 ± 0,22 | 0,58 ± 0,01    | 25,14 ± 5,88 |
| Ob   | 38,33 ± 0,99   | 8,29 ± 0,24  | 50,17 ± 1,95 | 23,48 ± 0,33      | 23,37 ± 0,36 | 0,88 ± 0,05    | 26,44 ± 1,09 |

Примечание. *n* – количество плодов в навеске 100 г, *m* – масса косточек в навеске 100 г,  $\eta$  – выход сока, СРС – содержание растворимых сахаров, ТК – титруемая кислотность, СКИ – сахарокислотный индекс; GB – Гриот белорусский, Gi – Жывица, Glb – Глубокская, Kn – Конфитюр, Las – Ласуха, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Vn – Вянок, Ob – Облачинска.

Отметим, что такой комплексный дегустационный параметр, как внешний вид плодов, включающий и их размер, является одним из определяющих в общей дегустационной оценке вишни (рис. 1).

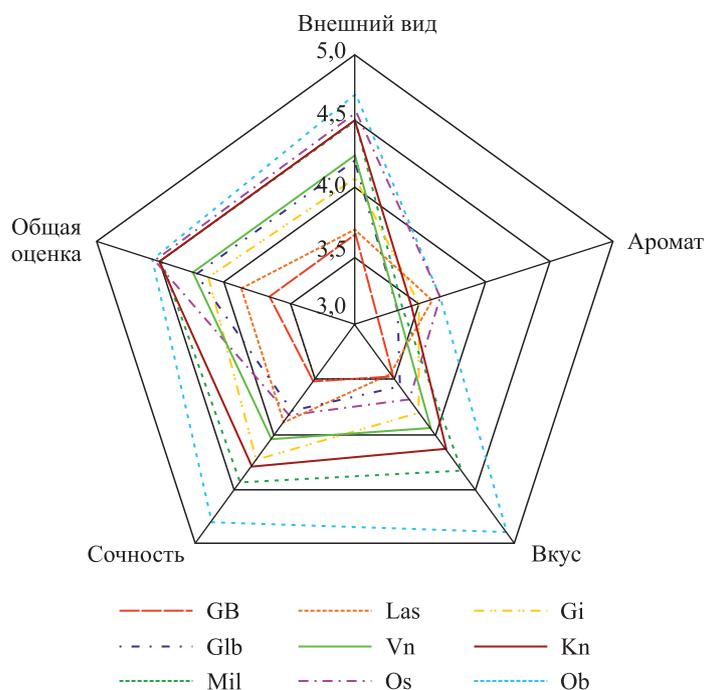


Рис. 1. Структура дегустационной оценки плодов вишни потребительской спелости: GB – Гриот белорусский, Las – Ласуха, Gi – Жывица, Glb – Глубокская, Vn – Вянок, Kn – Конфитюр, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Ob – Облачинска

Fig. 1. The structure of the tasting evaluation of ripe sour cherry fruits: GB – Griot belaruskiy, Las – Lasuha, Gi – Zhivitsa, Glb – Glubokskaya, Vn – Vianok, Kn – Confiture, Mil – Milavitsa, Os – Ostromechevskaya, Ob – Oblachinska

Выход сока составлял от 44,93 до 56,97 % и снижался в последовательности: Милавица > Остромечевская > Вянок > Ласуха > Жывица ≈ Гриот белорусский > Облачинска ≈ Глубокская > Конфитюр (см. табл. 1). Согласно дегустационной оценке сочность плодов вишни варьировалась от 3,5 до 4,8 балла и уменьшалась в последовательности: Облачинска > Милавица > Конфитюр ≈ Жывица > Вянок ≈ Ласуха > Остромечевская ≈ Глубокская > Гриот белорусский (см. рис. 1).

Содержание растворимых сахаров составило 14,51–23,37 °Вх, и в порядке снижения значений этого параметра изученные сорта вишни ранжируются следующим образом: Облачинска > Милавица ≈ Ласуха > Конфитюр > Жывица ≈ Остромечевская ≈ Глубокская > Вянок > Гриот белорусский (см. табл. 1).

Титруемая кислотность 100 г плодов вишни в пересчете на лимонную кислоту варьировалась от 0,43 до 0,88 и снижалась в последовательности: Облачинска > Остромечевская > Ласуха ≈ Вянок > Гриот белорусский > Жывица ≈ Глубокская ≈ Конфитюр > Милавица (см. табл. 1).

Характер вкуса вишни, как и большинства плодовых и ягодных культур, определяется сочетанием сахаров и кислот, а также наличием индивидуальных вкусовых оттенков, реже терпкости и горечи [8]. Сахарокислотный индекс плодов вишни составил 22,47–39,72 (см. табл. 1). Анализ вкусовых предпочтений дегустаторов показал значительное преобладание сладких сортов вишни (39,6 %), далее по убыванию следуют кисло-сладкие (33,3 %) и сладко-кислые (27,1 %). Предпочтений кислым сортам вишни среди дегустаторов не выявлено.

По вкусовым предпочтениям изученные сорта вишни можно ранжировать следующим образом: Облачинска > Милавица > Конфитюр > Вянок > Жывица > Остромечевская > Глубокская > Гриот белорусский ≈ Ласуха (в порядке снижения дегустационной оценки от 4,9 до 3,5 балла) (см. рис. 1).

Общая дегустационная оценка в эксперименте была незначительно ниже профессиональной<sup>3</sup> и составила 3,70–4,57 балла (рис. 2). В связи с тем что сорта вишни Глубокская и Остромечевская находятся на сортоиспытании и не входят в государственный реестр, данные об их профессиональной дегустационной оценке нами не найдены. В нашем исследовании высокая общая дегустационная оценка (более 4,0 балла) отмечена для большинства изученных сортов, средняя (в диапазоне 3,7–4,0 балла) – для 2 сортов (Гриот белорусский и Ласуха).

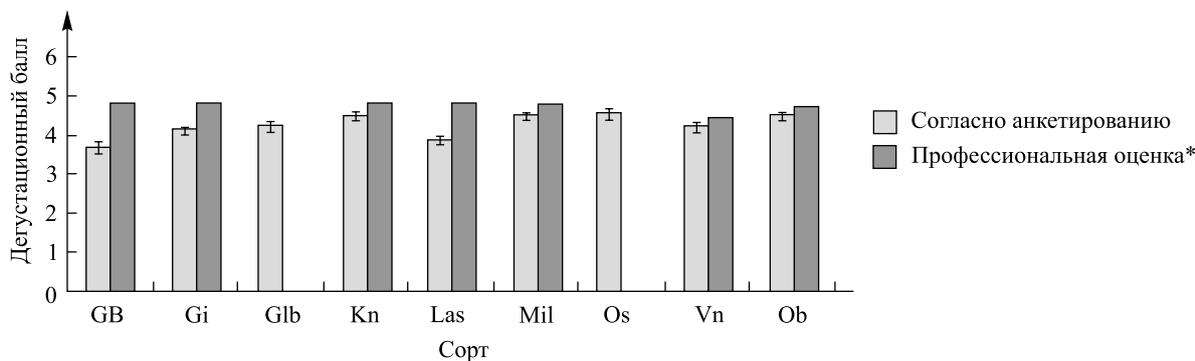


Рис. 2. Общая дегустационная оценка плодов вишни:

\* – дегустационный балл приведен только для включенных в государственный реестр сортов согласно их сортоописанию как оценка профессиональных дегустаторов; GB – Гриот белорусский, Gi – Жывица, Glb – Глубокская, Kn – Конфитюр, Las – Ласуха, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Vn – Вянок, Ob – Облачинска

Fig. 2. Total tasting evaluation of sour cherry fruits:

\* – degustation points were marked only for varieties included in the state register according to their description as a professional evaluation; GB – Griot beloruskiy, Gi – Zhivitsa, Glb – Glubokskaya, Kn – Confiture, Las – Lasuha, Mil – Milavitsa, Os – Ostromechevskaya, Vn – Vianok, Ob – Oblachinska

Общее содержание ФС варьировалось от 72,52 до 180,61 мг ГК/100 г и уменьшалось в последовательности: Ласуха > Конфитюр > Облачинска > Глубокская > Милавица > Гриот белорусский > Жывица > Остромечевская > Вянок (табл. 2).

Данные о составе ФС (антоцианов, фенолкарбоновых кислот и флавонолов) плодов вишни представлены на рис. 3. Содержание фенолкарбоновых кислот варьировалось от 48,45 до 75,20 мг кофейной кислоты на 100 г плодов вишни и снижалось в последовательности: Облачинска > Милавица > Ласуха > Конфитюр > Глубокская > Жывица > Остромечевская > Вянок ≈ Гриот белорусский. Содержание флавонолов

<sup>3</sup>Вишня // Каталог сортов. Плодовые [Электронный ресурс]. URL: <http://www.belsad.by/site/ru/catalog.html?func=viewcategory&catid=21> (дата обращения: 15.01.2020).

в 100 г плодов вишни составляло от 8,53 до 21,46 мг кверцетина и снижалось в последовательности: Об-  
лачинска > Милавица > Конфитюр > Глубокская > Вянок > Ласуха > Жывица ≈ Остромечевская > Гриот  
белорусский.

Таблица 2

**Общее содержание фенольных соединений (ОСФС)  
в плодах вишни потребительской спелости и параметры окраски их сока**

Table 2

**Total phenolic content of ripe sour cherry fruits  
and color parameters of cherry juice**

| Сорт | ОСФС,<br>мг ГК/100 г       | Параметры окраски сока |              |              |      |      |
|------|----------------------------|------------------------|--------------|--------------|------|------|
|      |                            | Желтый, %              | Красный, %   | Пурпурный, % | Тон  | ФИ   |
| GB   | 102,17 ± 13,81 <i>c, d</i> | 36,72 ± 2,56           | 59,53 ± 2,83 | 3,75 ± 0,28  | 0,62 | 0,06 |
| Gi   | 87,63 ± 10,62 <i>d, e</i>  | 39,35 ± 3,57           | 39,71 ± 3,16 | 20,94 ± 0,58 | 1,00 | 0,53 |
| Glb  | 138,17 ± 9,01 <i>b, c</i>  | 43,59 ± 2,36           | 46,59 ± 2,90 | 9,82 ± 0,66  | 0,94 | 0,21 |
| Kn   | 142,29 ± 12,26 <i>b</i>    | 33,83 ± 2,13           | 38,31 ± 1,74 | 27,86 ± 2,30 | 0,88 | 0,73 |
| Las  | 180,61 ± 6,56 <i>a</i>     | 28,01 ± 1,53           | 50,26 ± 0,93 | 21,73 ± 0,60 | 0,56 | 0,43 |
| Mil  | 120,23 ± 13,72 <i>c, d</i> | 42,38 ± 1,08           | 46,14 ± 0,78 | 11,47 ± 0,71 | 0,92 | 0,25 |
| Os   | 75,09 ± 6,16 <i>e</i>      | 40,52 ± 4,85           | 54,94 ± 5,46 | 4,55 ± 0,73  | 0,75 | 0,08 |
| Vn   | 72,52 ± 7,29 <i>e</i>      | 32,59 ± 3,55           | 63,10 ± 4,09 | 4,31 ± 0,54  | 0,52 | 0,07 |
| Ob   | 140,38 ± 5,75 <i>b</i>     | 41,42 ± 0,88           | 54,10 ± 0,82 | 4,48 ± 0,06  | 0,77 | 0,08 |

Примечание. GB – Гриот белорусский, Gi – Жывица, Glb – Глубокская, Kn – Конфитюр, Las – Ласуха, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Vn – Вянок, Ob – Облачинска; *a, b, c, d, e* – статистические различия (Tukey-тест при  $p < 0,05$ ).

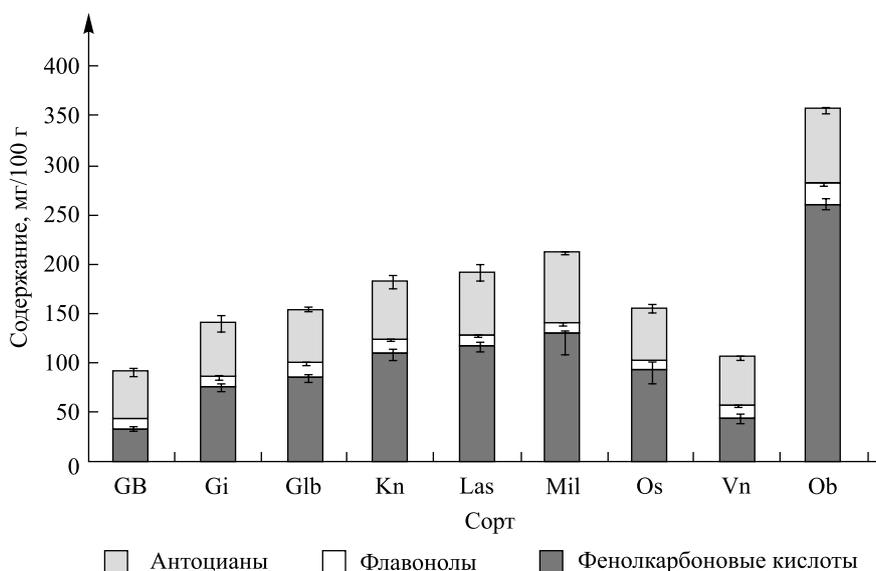


Рис. 3. Содержание антоцианов (в миллиграммах цианидин-3-О-рутинозида), флавонолов (в миллиграммах кверцетина) и фенолкарбоновых кислот (в миллиграммах кофейной кислоты) в 100 г плодов вишни: GB – Гриот белорусский, Gi – Жывица, Glb – Глубокская, Kn – Конфитюр, Las – Ласуха, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Vn – Вянок, Ob – Облачинска

Fig. 3. The anthocyanins content (in milligrams of cyanidin-3-O-rutinoside), flavonols content (in milligrams of quercetin) and phenolic acids content (in milligrams caffeic acid) of sour cherry fruits (100 g of FW): GB – Griot beloruskiy, Gi – Zhivitsa, Glb – Glubokskaya, Kn – Confiture, Las – Lasuha, Mil – Milavitsa, Os – Ostromechevskaya, Vn – Vianok, Ob – Oblachinska

Все изученные сорта вишни являются типичными морелями. Содержание антоцианов варьировалось от 32,69 до 259,45 мг цианидин-3-О-рутинозида на 100 г вишни и снижалось в последовательности: Облачинска > Милавица > Ласуха > Конфитюр > Остромечевская > Глубокская > Жывица > Вянок > Гриот белорусский (см. рис. 3). Параметры окраски сока их плодов представлены в табл. 2. В окраске сока вишни преобладают красные тона (вклад красного цвета в общую окраску составил 38,31–63,10 %), особенно у сортов Вянок, Гриот белорусский и Остромечевская. Доля желтого цвета в окраске сока была 28,01–43,59 %, больше всего его в окраске сортов Глубокская, Милавица и Облачинска, меньше всего – Ласуха и Вянок. Относительно высок процент пурпурного цвета (до 27,86 %), особенно в соке вишни сортов Конфитюр, Ласуха и Жывица, эти же сорта характеризуются самыми высокими значениями фиолетового индекса. В целом фиолетовый индекс сока варьировался от 0,06 до 0,73 (см. табл. 2).

Тон (бурый индекс) составлял от 0,52 до 1,00 и снижался в последовательности: Жывица > Глубокская ≈ Милавица > Конфитюр > Облачинска ≈ Остромечевская > Гриот белорусский > Ласуха ≈ Вянок (см. табл. 2).

Проведенный статистический анализ (РСА-тест) показал высокую репрезентативность результатов (рис. 4): ось абсцисс описывает 13,42 % варьирования признаков, ось ординат – 49,08 %.

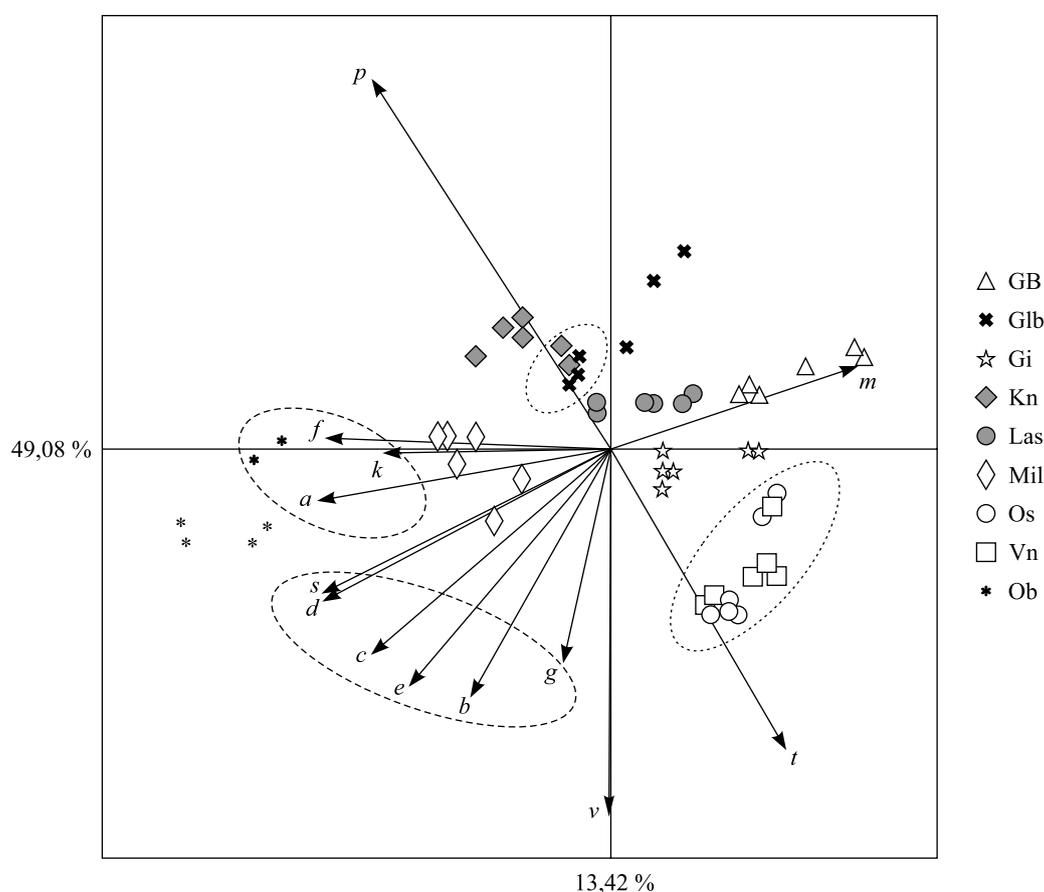


Рис. 4. Диаграмма статистического анализа главных компонент (РСА-тест) для плодов вишни: GB – Гриот белорусский, Glb – Глубокская, Gi – Жывица, Kn – Конфитюр, Las – Ласуха, Mil – Милавица, Os – Остромечевская, Vn – Вянок, Ob – Облачинска.

Дегустационные параметры: *b* – внешний вид, *c* – сочность, *e* – вкус, *g* – аромат.

Биохимические параметры: *a* – содержание антоцианов, *f* – содержание флавонолов, *k* – содержание фенолкарбоновых кислот, *p* – общее содержание фенольных соединений, *d* – содержание сухих веществ, *t* – титруемая кислотность, *s* – содержание сахаров.

Помологические параметры: *m* – масса плода, *v* – выход сока

Fig. 4. Principal component analysis for cherry fruits:

GB – Griot beloruskiy, Glb – Glubokskaya, Gi – Zhivitsa, Kn – Confiture, Las – Lasuha, Mil – Milavitsa, Os – Ostromechevskaya, Vn – Vianok, Ob – Oblachinska.

Degustation parameters: *b* – appearance, *c* – juiciness, *e* – taste, *g* – aroma.

Biochemical parameters: *a* – anthocyanins content, *f* – flavonols content, *k* – phenolic acids content, *p* – total phenolic content,

*d* – dry matter content, *t* – titratable acidity, *s* – sugar content.

Pomological parameters: *m* – fruit mass, *v* – juice yield

Для плодов вишни дегустационные параметры (внешний вид плодов, аромат, вкус и сочность) находятся в обратной зависимости от массы плода (помологический параметр), а титруемая кислотность – от содержания ФС (биохимические параметры). Наиболее близки между собой биохимические и дегустационные показатели, в частности сочность плодов, содержание сухих веществ и растворимых сахаров. На диаграмме все дегустационные параметры находятся в одной области. Среди ФС ближе всего к дегустационным параметрам было содержание антоцианов (см. рис. 4).

Из 9 изученных сортов самым высоким содержанием фенолкарбоновых кислот, антоцианов и флавонолов характеризуются плоды сортов Облачинска и Милавица. Для этих же сортов выявлены близкие корреляционные связи между дегустационными показателями и содержанием антоцианов, флавонолов и фенолкарбоновых кислот. Наиболее близки по биохимическим и помологическим параметрам плоды сортов Конфитюр и Глубокская, а также Остромечевская и Вянок (см. рис. 4).

Необходимо отметить, что наибольшее число дегустаторов (16,42 % от общего количества) отдали предпочтение сорту Облачинска (общий дегустационный балл – 4,57), который имеет мелкие плоды, отличается средним сахарокислотным индексом, высоким содержанием ФС, в частности флавонолов и антоцианов. Кроме того, по сравнению с остальными сортами вишни он характеризуется высокой антиоксидантной активностью плодов [17]. Вместе с тем 14,92 % дегустаторов отдали предпочтение другому сорту – Остромечевская (общий дегустационный балл – 4,57). Данный сорт является крупноплодным, отличается сбалансированным соотношением сахаров и кислот, но содержит меньше ФС, в частности флавонолов и антоцианов. Среди сортов белорусской селекции, внесенных в государственный реестр Республики Беларусь [1], предпочтение отдано среднеплодному сорту Милавица (12,68 % дегустаторов, общий дегустационный балл – 4,53), который также обладает сбалансированным вкусом. Отметим, что для плодов данного сорта характерен средний уровень содержания ФС, в том числе антоцианов, флавонолов и фенолкарбоновых кислот, а также средняя антиоксидантная активность (результаты представлены в работе [17]). В то же время при треугольном дегустационном анализе не выявлена способность достоверно различать межсортовые отличия вишни по вкусу и внешнему виду плодов.

### Заключение

Проведенные исследования по изучению влияния ФС на органолептические показатели плодов вишни указывают на наличие достоверной отрицательной корреляционной зависимости между массой плодов и содержанием антоцианов, фенолкарбоновых кислот, флавонолов, сахаров, а также дегустационными параметрами. Среди биохимических показателей наибольшее влияние на дегустационную оценку плодов вишни оказывает содержание антоцианов, но при этом она не зависит от общего количества ФС.

По совокупности изученных параметров можно рекомендовать к использованию сорта Облачинска и Милавица для расширения площадей, отводимых под культивирование вишни. Эти же сорта и сорт Остромечевская могут быть использованы в качестве исходных форм при создании новых сортов и гибридов вишни с высокими дегустационными показателями в сочетании с повышенной пищевой ценностью.

### Библиографические ссылки

1. Привалов ФИ, Гриб СИ, Матыс ИС, Козловская ЗА, Кильчевский АВ, Лемеш ВА и др., редакторы. *Генетические ресурсы растений в Беларуси: мобилизация, сохранение, изучение и использование*. Минск: Четыре четверти; 2019. 452 с.
2. Таранов АА. Новый сорт вишни Милавица. В: Самусь ВА, Матвеев ВА, Шмыглевская НА, Васеха ВВ, Гашенко ТА, Дмитриева АМ и др., редакторы. *Плодоводство. Том 27*. Самохваловичи: [б. и.]; 2015. с. 115–121.
3. Mitić MN, Obradović MV, Kostić DA, Micić RJ, Pecev ET. Polyphenol content and antioxidant activity of sour cherries from Serbia. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2012;18(1):53–62. DOI: 10.2298/CICEQ110701046M.
4. Wojdyło A, Nowicka P, Laskowski P, Oszmiański J. Evaluation of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) fruits for their polyphenol content, antioxidant properties, and nutritional components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014;62(51):12332–12345. DOI: 10.1021/jf504023z.
5. Çelik H, Özgen M, Serçe S, Kaya C. Phytochemical accumulation and antioxidant capacity at four maturity stages of cranberry fruit. *Scientia Horticulturae*. 2008;117(4):345–348. DOI: 10.1016/j.scienta.2008.05.005.
6. Doshi P, Adsule P, Banerjee K. Phenolic composition and antioxidant activity in grapevine parts and berries (*Vitis vinifera* L.) cv. Kishmish chornyi (Sharad seedless) during maturation. *International Journal of Food Science and Technology*. 2006;41(suppl. 1):1–9. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01214.x.
7. Kader AA. Fruit maturity, ripening, and quality relationships. In: Michalczyk L, editor. *Proceedings of the International symposium on effect of pre- and postharvest factors on storage of fruit*. [S. l.]: International Society for Horticultural Science; 1999. p. 203–208. (Acta Horticulturae; 485). DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.485.27.
8. Колбас НЮ, Троянчук ВА, Полулятко ИГ, Првулович Д. Фенольные соединения в дегустационной оценке плодов черешни. *Вестник Брэскага ўніверсітэта. Серыя 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі*. 2019;2:25–33.

9. Седов ЕН, Огольцова ТП, редакторы. *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур*. Орел: Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур; 1999. 606 с.
10. Kaack K. Maturation and picking time for sweet cherries (*Prunus avium*) and sour cherries (*Prunus cerasus* L.). *European Food Research and Technology*. 2017;243(4):539–546. DOI: 10.1007/s00217-016-2753-6.
11. Waterhouse AL. Determination of total phenolics. In: *Current protocols in food analytical chemistry*. [S. l.]: John Wiley & Sons; 2002. p. 11.1.1–11.1.8.
12. Fukumoto LR, Mazza G. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000;48(8):3597–3604. DOI: 10.1021/jf000220w.
13. Giusti MM, Wrolstad RE. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. In: *Current protocols in food analytical chemistry*. [S. l.]: John Wiley & Sons; 2001. p. F1.2.1–F1.2.13.
14. Wang H, Nair MG, Iezzoni AF, Strasburg GM, Booren AM, Gray JI. Quantification and characterization of anthocyanins in Balaton tart cherries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997;45(7):2556–2560. DOI: 10.1021/jf960896k.
15. Kim D-O, Padilla-Zakour OI. Jam processing effect on phenolics and antioxidant capacity in anthocyanin-rich fruits: cherry, plum, and raspberry. *Journal of Food Science*. 2004;69(9):S395–S400. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb09956.x.
16. Zozio S, Pallet D, Dornier M. Evaluation of anthocyanin stability during storage of a coloured drink made from extracts of the Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth.), açai (*Euterpe oleracea* Mart.) and black carrot (*Daucus carota* L.). *Fruits*. 2011;66(3):203–215. DOI: 10.1051/fruits/2011030.
17. Колбас НЮ. Антоциановый комплекс и антиоксидантная активность плодов некоторых представителей семейства розоцветные (*Rosaceae* Juss.). Решетников ВН, редактор. Брест: БрГУ; 2019. 173 с.

## References

1. Privalov FI, Grib SI, Matys IS, Kozlovskaya ZA, Kil'chevskii AV, Lemesh VA, et al., editors. *Geneticheskie resursy rastenii v Belarusi: mobilizatsiya, sokhranenie, izuchenie i ispol'zovanie* [Plant genetic resources in Belarus: mobilization, conservation, study and use]. Minsk: Chetyre chetverti; 2019. 452 p. Russian.
2. Taranov AA. New sour cherry cultivar Milavitsa. In: Samus VA, Matveyev VA, Shmiglevskaya NA, Vasekha VV, Gashenko TA, Dmitrieva AM, et al., editors. *Fruit-growing. Volume 27*. Samokhvalovich: [s. n.]; 2015. p. 115–121. Russian.
3. Mitić MN, Obradović MV, Kostić DA, Micić RJ, Pecev ET. Polyphenol content and antioxidant activity of sour cherries from Serbia. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2012;18(1):53–62. DOI: 10.2298/CICEQ110701046M.
4. Wojdyło A, Nowicka P, Laskowski P, Oszmiański J. Evaluation of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) fruits for their polyphenol content, antioxidant properties, and nutritional components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014;62(51):12332–12345. DOI: 10.1021/jf504023z.
5. Çelik H, Özgen M, Serçe S, Kaya C. Phytochemical accumulation and antioxidant capacity at four maturity stages of cranberry fruit. *Scientia Horticulturae*. 2008;117(4):345–348. DOI: 10.1016/j.scienta.2008.05.005.
6. Doshi P, Adsule P, Banerjee K. Phenolic composition and antioxidant activity in grapevine parts and berries (*Vitis vinifera* L.) cv. Kishmish chornyi (Sharad seedless) during maturation. *International Journal of Food Science and Technology*. 2006;41(suppl. 1):1–9. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01214.x.
7. Kader AA. Fruit maturity, ripening, and quality relationships. In: Michalczuk L, editor. *Proceedings of the International symposium on effect of pre- and postharvest factors on storage of fruit*. [S. l.]: International Society for Horticultural Science; 1999. p. 203–208. (Acta Horticulturae; 485). DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.485.27.
8. Kolbas NY, Trayanchuk VA, Palubiatka IG, Prvulović D. The phenolic compounds in tasting evaluation of the sweet cherries fruits. *Vesnik of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*. 2019;2:25–33. Russian.
9. Sedov EN, Ogoľ'tsova TP, editors. *Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kul'tur* [The program and methodology of variety studies of fruit, berry and nut-bearing crops]. Орел: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut selektsii plodovykh kul'tur; 1999. 606 p. Russian.
10. Kaack K. Maturation and picking time for sweet cherries (*Prunus avium*) and sour cherries (*Prunus cerasus* L.). *European Food Research and Technology*. 2017;243(4):539–546. DOI: 10.1007/s00217-016-2753-6.
11. Waterhouse AL. Determination of total phenolics. In: *Current protocols in food analytical chemistry*. [S. l.]: John Wiley & Sons; 2002. p. 11.1.1–11.1.8.
12. Fukumoto LR, Mazza G. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000;48(8):3597–3604. DOI: 10.1021/jf000220w.
13. Giusti MM, Wrolstad RE. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. In: *Current protocols in food analytical chemistry*. [S. l.]: John Wiley & Sons; 2001. p. F1.2.1–F1.2.13.
14. Wang H, Nair MG, Iezzoni AF, Strasburg GM, Booren AM, Gray JI. Quantification and characterization of anthocyanins in Balaton tart cherries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997;45(7):2556–2560. DOI: 10.1021/jf960896k.
15. Kim D-O, Padilla-Zakour OI. Jam processing effect on phenolics and antioxidant capacity in anthocyanin-rich fruits: cherry, plum, and raspberry. *Journal of Food Science*. 2004;69(9):S395–S400. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb09956.x.
16. Zozio S, Pallet D, Dornier M. Evaluation of anthocyanin stability during storage of a coloured drink made from extracts of the Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth.), açai (*Euterpe oleracea* Mart.) and black carrot (*Daucus carota* L.). *Fruits*. 2011;66(3):203–215. DOI: 10.1051/fruits/2011030.
17. Kolbas NY. *Antotsianovyi kompleks i antioksidantnaya aktivnost' plodov nekotorykh predstavitelei semeistva rozotsvetnyye (Rosaceae Juss.)* [Anthocyanin complex and antioxidant activity in the fruits of some Rosaceae species]. Reshetnikov VN, editor. Brest: Brest State A. S. Pushkin University; 2019. 173 p. Russian.

УДК 599.363

### НОВЫЕ ДАННЫЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ И БИОЛОГИИ РЕДКИХ ВИДОВ СЕМЕЙСТВА ЗЕМЛЕРОЙКОВЫХ (SORICIDAE, MAMMALIA) В БЕЛАРУСИ

В. В. ГРИЧИК<sup>1)</sup>, А. В. БАЛАШ<sup>1)</sup>, А. В. РАК<sup>2)</sup>, А. М. СПРИНГЕР<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Березинский биосферный заповедник, 211188, д. Домжерицы, Лепельский р-н, Витебская обл., Беларусь

На основе сборов 1990–2018 гг. приведены новые данные, уточняющие границы ареалов четырех видов семейства землеройковых – равнозубой (*Sorex isodon*) и крошечной (*S. minutissimus*) бурозубок, малой куторы (*Neomys anomalus*) и белобрюхой белозубки (*Crocidura leucodon*) – на территории Республики Беларусь. Проанализированы имеющиеся данные по этим видам. Для крошечной бурозубки пока единственным известным местом обитания является Березинский биосферный заповедник, где осенью 2018 г. отловлен еще один экземпляр. Для этой же охраняемой территории вновь подтверждено обитание равнозубой бурозубки и малой куторы, но для последнего вида выявлен еще ряд точек обитания на территории страны. В сентябре – октябре 2018 г. 11 особей белобрюхих белозубок отловлены в населенном пункте недалеко от г. Барановичи Брестской области,

---

#### Образец цитирования:

Гричик ВВ, Балаш АВ, Рак АВ, Спрингер АМ. Новые данные о распространении и биологии редких видов семейства землеройковых (Soricidae, Mammalia) в Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2020;2:58–65.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-58-65>

#### For citation:

Grichik VV, Balash AV, Rak AV, Springer AM. New data on rare shrew species (Soricidae, Mammalia) distribution and biology in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2020;2:58–65. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-58-65>

---

#### Авторы:

**Василий Витальевич Гричик** – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета.  
**Александр Вячеславович Балаш** – старший преподаватель кафедры зоологии биологического факультета.  
**Александр Викторович Рак** – научный сотрудник.  
**Александр Михайлович Спрингер** – научный сотрудник.

#### Authors:

**Vasilij V. Grichik**, doctor of science (biology), full professor; head of the department of general ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.  
[gritshik@mail.ru](mailto:gritshik@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6274-0165>  
**Aliaksandr V. Balash**, senior lecturer at the department of zoology, faculty of biology.  
[balashal@mail.ru](mailto:balashal@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-1986-5429>  
**Aliaksandr V. Rak**, researcher.  
[sasha.vesp@gmail.com](mailto:sasha.vesp@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-0196-033X>  
**Alexandr M. Springer**, researcher.  
[springervit@tut.by](mailto:springervit@tut.by)  
<https://orcid.org/0000-0003-1974-5814>

т. е. на 75-м километре к северо-востоку от ранее известного ближайшего места обитания в этом регионе. Приведены данные о биотопических связях этих видов, а также морфометрии и линьке белобрюхой белозубки. Описана разработанная и апробированная методика отлова землеройковых модифицированными ловчими цилиндрами с приманкой из яблочного уксуса.

**Ключевые слова:** семейство землеройковых; фауна; методика отлова.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность выпускникам биологического факультета Белорусского государственного университета В. Н. Викторovichу, Д. В. Журавлёву, М. Н. Колоскову и П. В. Велигурову за помощь в сборе материала для настоящей работы.

## NEW DATA ON RARE SHREW SPECIES (SORICIDAE, MAMMALIA) DISTRIBUTION AND BIOLOGY IN BELARUS

V. V. GRICHIK<sup>a</sup>, A. V. BALASH<sup>a</sup>, A. V. RAK<sup>b</sup>, A. M. SPRINGER<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

<sup>b</sup>Berezinsky biosphere reserve, Domzhericu Village 211188, Liepel District, Viciebsk Region, Belarus

Corresponding author: A. V. Rak (sasha.vesp@gmail.com)

New data on the range borders in the Republic of Belarus based on the collecting in 1990–2018 are given for four shrew species, Taiga Shrew (*Sorex isodon*), Miniscule Shrew (*S. minutissimus*), Southern Water Shrew (*Neomys anomalus*) and Bicolored Shrew (*Crocidura leucodon*). Published data on the local distribution of these species were critically analyzed. The only known locality for the Miniscule Shrew is the Berezinsky biosphere reserve, where one extra specimen was collected in the autumn of 2018. The presence of Taiga and Southern Water Shrews was confirmed for the same locality, but several additional Belarusian localities are also reported for the latter species. Eleven individuals of the Bicolored Shrew were collected in September – October 2018 near Baranavichy, Brest Region, about 75 km northeast of the nearest known locality in this region. Data on the habitat connections of these species are given as well as on morphometrics and molt of Bicolored White-toothed Shrew. A new shrew trapping method with modified trapping cylinders baited with apple vinegar developed and tested by the authors is described.

**Keywords:** Soricidae; fauna; trapping methods.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to V. N. Viktorovich, D. V. Zhuravlev, M. N. Koloskov, and P. V. Veligurov, graduates of the faculty of biology, Belarusian State University, for their help in collecting material for this work.

### Введение

Семейство землеройковых (Soricidae) объединяет узкоспециализированную группу мелких млекопитающих отряда насекомоядных (Lipotyphla), выполняющих важную экологическую роль в природных сообществах. Однако из-за высокой степени сходства внешнего облика и трудностей в определении видов, которое зачастую невозможно без детального исследования морфологии черепа либо применения методов молекулярной диагностики, особенности географического и ландшафтно-биотопического распределения, популяционной экологии, трофических связей и ряда других аспектов биологии видов этой группы остаются слабоисследованными. Показателен тот факт, что два из девяти видов этого семейства в фауне Беларуси были обнаружены сравнительно недавно – во второй половине 1990-х гг., причем в значительной мере случайно.

Данные по географическому распределению видов семейства землеройковых на территории Республики Беларусь в наиболее полном объеме были обобщены в работе [1]. Однако с момента выхода в свет этой публикации накопилось много информации, существенно уточняющей и дополняющей изложенные в ней сведения. В частности, приходится признать во многом устаревшими и данные по видам этого семейства, включенным в Красную книгу Республики Беларусь [2, прил.]. В настоящей работе рассмотрены новые материалы о распространении и биологии четырех наименее исследованных видов семейства землеройковых.

### Материалы и методы исследования

Публикуемые данные собраны как традиционно применяемым для учета мелких млекопитающих методом стандартных ловушко-линий [3], так и по разработанной нами методике, направленной на избирательный отлов именно землероек. По принципу действия эта методика несколько схожа как с широкой

практикуемыми в энтомологических исследованиях модифицированными ловушками Барбера с приманкой, так и с методом ловчих цилиндров, нередко применяемым для отлова мелких млекопитающих. В качестве замены ловчих цилиндров нами использовались двухлитровые пластиковые бутылки с обрезанным дном. Перевернутая бутылка закапывается в землю до края обрезанной части, пробка предварительно откручивается, а в горлышко на случай дождя вставляется камень подходящего диаметра, который позволяет попадающей в бутылку воде свободно стекать в почву, но препятствует вылезанию через горлышко попавшим в ловушку зверькам. В качестве приманки, повышающей уловистость особей, нами использовался яблочный уксус, заливаемый в небольшую пробирку приблизительно на 1/4 ее объема. Она свободно ставится на дно емкости, где находится в полувертикальном положении и благодаря форме горлышка бутылки не опрокидывается. При дождливой погоде ловушки дополнительно прикрываются сверху кусками коры так, чтобы не препятствовать проникновению под них зверьков.

Простота изготовления таких ловушек в сочетании с явно повышающим уловистость действием приманки позволяет рекомендовать эту методику для исследования видового состава и относительного обилия видов семейства землеройковых как при стационарной работе, так и при непродолжительном пребывании в исследуемом районе. Важно, что отловленные зверьки на момент проверки зачастую оказываются живыми, а те, которые к этому времени погибают, как правило, остаются сухими и неповрежденными (за исключением случаев, когда в одной ловушке оказываются две особи или более). Ловушки нами выставлялись в линии, по 10 шт. в каждой, на расстоянии около 5 м между ними. Эта методика успешно апробирована летом 2018 и 2019 гг. В. В. Гричином на территории Воложинского района Минской области, осенью 2018 г. А. В. Раком и А. М. Спрингером – в Березинском биосферном заповеднике [4].

Для надежного определения вида добытые экземпляры препарировались по принятой методике, из них изготавливались стандартные коллекционные тушки, рассчитанные на длительное хранение в музейной коллекции, очищались и сохранялись черепа. Определение проводилось по современным определителям с учетом всех морфологических признаков, в первую очередь оценивалось строение черепа [5]. Собранный коллекционный материал хранится на кафедре общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета БГУ и доступен для исследования специалистами.

### Результаты и их обсуждение

**Равнозубая бурозубка** (*Sorex isodon* Turon, 1924). Этот вид обитает в таежной зоне, на территорию Беларуси заходит южным краем ареала [5]. Впервые одна особь (самец) была обнаружена специалистами из Швейцарии 24 сентября 1996 г. на территории Березинского биосферного заповедника – в зоне заповедного ядра. Взятый экземпляр передан на хранение в коллекцию Института зоологии и экологии животных (Лозанна, Швейцария) [1]. В 2000 г. еще одна особь (самка) отловлена также на территории Березинского биосферного заповедника А. П. Каштальяном; тушка и череп переданы в Зоологический музей Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова [1]. Кроме того, в августе 1997 г. одна особь этого вида (молодой самец) была отловлена гораздо южнее, в 42 км к юго-западу от г. Барановичи в долине р. Щары (Ивацевичский район Брестской области, 52° 59,824' с. ш., 25° 40,162' в. д.) [6]. К сожалению, в процитированной публикации название населенного пункта Барановичи, к которому сделана привязка, напечатано с ошибками: *Borovichi* (по личному сообщению А. В. Мишта). Других мест обитания этого вида на территории Беларуси до сих пор не выявлено.

Осенью 2018 г. на территории Березинского биосферного заповедника (2,5 км к югу от д. Домжерицы) нами были отловлены две особи этого вида: 23 октября – самка, 31 октября – самец. Масса тела самца – 6,4 г, самки – 8,65 г (обе особи – первородки). Зверьки пойманы в ловушки с укусными приманками в одном и том же биотопе – сыром 70-летнем черноольшанике, переходящем в ельник кисличный. По личному сообщению А. В. Мишта, в Ивацевичском районе экземпляр равнозубой бурозубки тоже отловлен в черноольшанике. Какие-либо другие данные по распространению и биологии этого вида на территории Республики Беларусь отсутствуют. Заметим, что у исследованных нами экземпляров, кроме краниологических признаков, были обнаружены некоторые внешние особенности, отличавшие этих зверьков от отловленных в тех же местах обыкновенных бурозубок (*Sorex araneus* L., 1758). Кроме часто указываемого в определителях такого отличительного признака, как очень темная окраска меха нижней стороны тела, своеобразно выглядели передние конечности: они были более широкие и массивные, чем у обыкновенной бурозубки, с насыщенной темно-розовой окраской кожи. Последний признак, хотя и слабее выраженный, мы неоднократно наблюдали у средней бурозубки (*Sorex caecutiens* Laxman, 1758), но никогда не отмечали у обыкновенной. На высохших шкурках отпрепарированных для коллекции зверьков эти признаки видны намного хуже, чем на свежих.

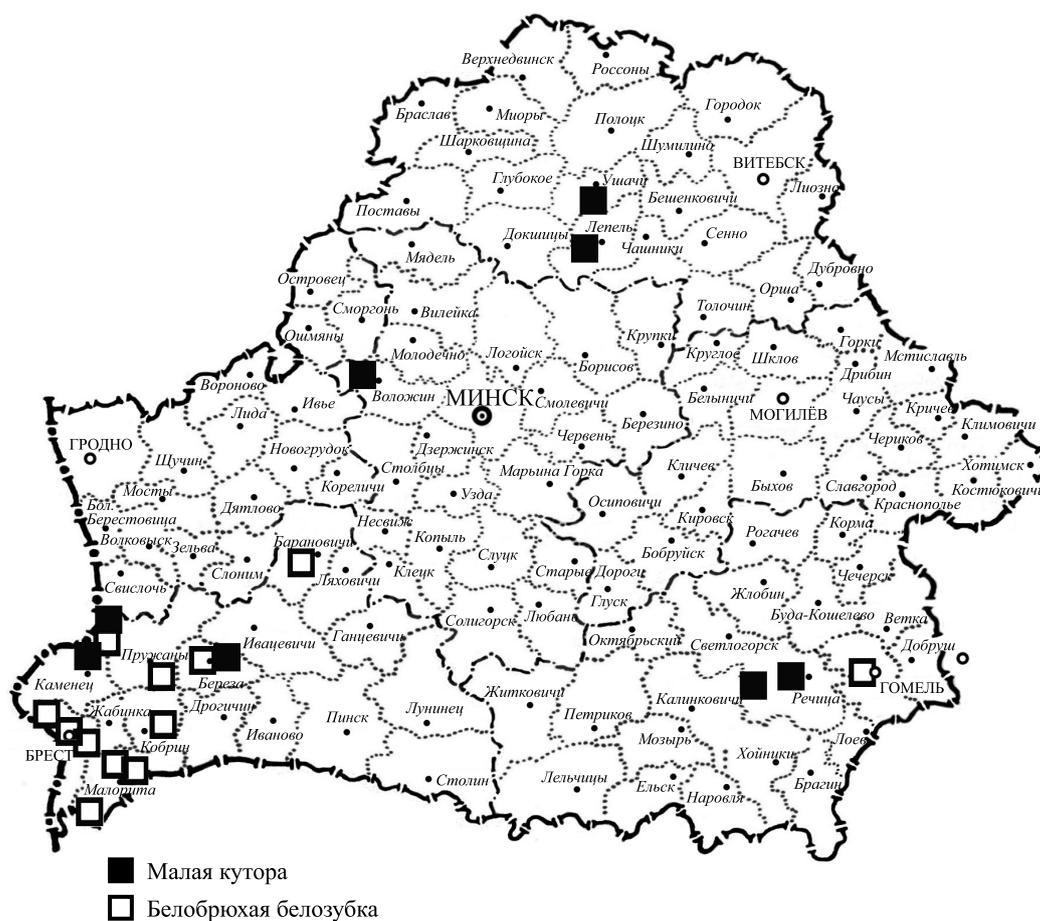
**Крошечная бурозубка** (*Sorex minutissimus* Zimm., 1780). Сложный для определения вид, распространенный преимущественно в зоне тайги и на территории нашей страны, видимо представленный

краевой зоной ареала [5]. Еще 8 октября 1978 г. и 1 июля 1980 г. две особи этого вида были отловлены в ельниках в Березинском биосферном заповеднике (окрестности д. Крайцы), но ошибочно определены как молодые обыкновенные бурозубки. Сохраненные в коллекции черепа были позже переопределены известным специалистом по данной группе Б. И. Шефтелем как принадлежащие крошечным бурозубкам [1]. Эти две находки до последнего времени оставались единственными для территории Республики Беларусь.

Одна особь этого вида (самка-первогодок) отловлена нами в ловушку с приманкой из яблочного уксуса 5 ноября 2018 г. на территории Березинского биосферного заповедника (0,5 км к востоку от д. Кветчи), в березняке по краю верхового болота (первый ярус – 7Б2Е1Ос; подлесок – крушина, рябина, единично лещина). Масса тела этой особи – 1,75 г. Таким образом, Березинский биосферный заповедник пока остается единственным местом в нашей стране, где зарегистрирован этот вид. В коллекции сохранены шкурка и череп этой особи.

**Малая кутора** (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907). Долгое время считалось, что распространение этого вида в нашей стране не простирается севернее Брестской и Гомельской областей [7], но уже в 1998–2000 гг. четыре экземпляра были отловлены в Березинском биосферном заповеднике (Лепельский район Витебской области) [1], а в 2005 г. присутствие этого вида установлено для Воложинского района Минской области. Поскольку регистрации данного вида происходят редко и существует необходимость уточнения границ его ареала на территории Республики Беларусь, будет уместным привести все известные места его регистрации (см. рисунок).

**Брестская область.** Впервые малая кутора отловлена на территории Беловежской пуцци летом 1913 г. А. К. Мордвилко [7], а в августе 1953 г. – С. С. Туровым [8]. У северных границ Беловежской пуцци, в Пружанском районе, на территории болота Дикое 16 октября 2016 г. одна особь поймана в живоловушку М. Н. Колосковым и Д. В. Журавлёвым (экземпляр исследован В. В. Гричиком). 18 мая 2015 г. самка-первогодок отловлена на территории станции очистки сточных вод г. Березы Березовского района [9].



Места регистрации малой куторы (*Neomys anomalus*) и белобрюхой белозубки (*Crocidura leucodon*) на территории Республики Беларусь

The registration of the water shrew (*Neomys anomalus*) and bicolored shrew (*Crocidura leucodon*) in the Republic of Belarus

*Гомельская область.* Малая кутора поймана экспедицией А. В. Федюшина 22 октября 1929 г. на территории бывшего Василевичского района (в настоящее время большей частью входит в состав Речицкого района) и летом 1930 г. вблизи д. Деражной Речицкого района [1; 7].

*Минская область.* При проведении учетов мелких млекопитающих стандартным методом ловушкочиний П. В. Велигуровым 8 июля 2005 г. взрослая самка отловлена в пойме р. Западной Березины возле д. Калдыки Воложинского района. Масса зверька – 15,0 г, в матке находилось девять эмбрионов диаметром около 6 мм. Шкурка и череп сохранены в коллекции.

*Витебская область.* На территории Березинского биосферного заповедника (в пределах Лепельского района) в общей сложности зарегистрировано восемь особей этого вида: в 1998–2000 гг. – четыре экземпляра А. П. Каштальяном [1; 10] и в октябре 2018 г. – четыре экземпляра нами [4] – 22, 23 и 24 октября 2018 г. три самки-первогодки отловлены в ловушки с приманкой из яблочного уксуса вблизи деревень Домжерицы и Кветчи Лепельского района и еще одна такая же самка найдена мертвой в д. Домжерицы 8 октября 2018 г. Масса этих особей составила 6,7; 7,75; 8,0; 9,8 г соответственно. Несколько далее к северу, в Ушачском районе, вблизи оз. Борковщина в июле 2018 г. четыре особи малой куторы пойманы А. А. Савариным [11]; точные даты отлова, пол и возраст этих особей в указанной публикации не сообщаются.

Представляет интерес выяснение специфики биотопической приуроченности этого вида в условиях нашей страны, в том числе и в сравнении с более крупным и более обычным видом этого рода – куторой обыкновенной (*Neomys fodiens* Pennant, 1771). Большинство малых кутор, об отловах которых сообщалось в литературе, были пойманы вблизи водоемов: в ельнике у лесного ручья, на протоках между озерами, на прудах-отстойниках очистных сооружений и т. п. [1; 9; 11]. В Пружанском районе (болото Дикое) экземпляр этого вида пойман на заросшей ольхой и ивняком насыпи старой узкоколейки, пересекающей обширное низинное болото (по личному сообщению М. Н. Колоскова), экземпляр из Воложинского района – на краю заболоченного участка открытой поймы р. Западной Березины у опушки леса, приблизительно в 40 м от речной старицы (по нашим данным). Описание биотопов, в которых отловы представителей семейства землеройковых осенью 2018 г. проводились в Березинском биосферном заповеднике, приведено ниже; число особей каждого из пойманных видов отражено в табл. 1.

1. Лепельский район, 1,5 км к югу от д. Домжерицы. Сосняк елово-мшистый на краю многолетнего ветровала. Первый ярус – 5С3Е2Б, единично осина; второй ярус – 10Е; подрост – ель; подлесок – крушина, лещина, единично рябина и малина; напочвенный покров: преобладают мхи – плерозиум, дикраниум, а также черника, встречаются кислица, брусника, ожика и др. Даты отловов: 8 октября – 23 ноября 2018 г.

2. Лепельский район, 0,5 км к востоку от д. Кветчи. Березняк на краю верхового болота. Первый ярус – 7Б2Е1Ос; подрост – ель, береза; подлесок – крушина, рябина, единично лещина; напочвенный покров не сплошной, образован черникой, брусникой, кукушкиным льном, сфагнумом, ситником, вейником. Даты отловов: 15 октября – 12 ноября 2018 г.

3. Лепельский район, 0,5 км к востоку от д. Кветчи. Ельник черничный 80–90-летнего возраста на краю верхового болота. Первый ярус – 7Е1С1Ос1Б; подрост – ель, осина; подлесок – крушина, рябина; напочвенный покров не сплошной, образован мхами (сфагнум, кукушкин лен и др.), присутствуют также черника, брусника, вейник. Даты отловов: 17 октября – 12 ноября 2018 г.

4. Лепельский район, 2,5 км к югу от д. Домжерицы. Черноольшаник 70-летнего возраста, переходящий в кисличный ельник. Первый ярус – 7Ол2Е1Б; подрост – ель, ольха черная; подлесок – черемуха, малина, рябина, лещина; напочвенный покров: зеленчук желтый, кислица, бодяк, крапива, сныть, папоротники, мхи, осока. Даты отловов: 22 октября – 12 ноября 2018 г.

Таблица 1

Результаты отлова млекопитающих семейства землеройковых (*Soricidae*) в Березинском биосферном заповеднике осенью 2018 г.

Table 1

Results of shrew (*Soricidae*) trapping in Berezinsky biosphere reserve in the autumn of 2018

| Вид  | Число отловленных особей |         |         |         |       |
|--|--------------------------|---------|---------|---------|-------|
|  | Линия 1                  | Линия 2 | Линия 3 | Линия 4 | Всего |
| <i>S. araneus</i> (обыкновенная бурозубка) | 8                        | 7       | 3       | 4       | 22    |
| <i>S. isodon</i> (равнозубая бурозубка)    | –                        | –       | –       | 2       | 2     |
| <i>S. caecutiens</i> (средняя бурозубка)   | 6                        | 4       | 2       | –       | 12    |
| <i>S. minutus</i> (малая бурозубка)        | 3                        | 4       | 2       | 3       | 12    |

Окончание табл. 1  
Ending table 1

| Вид  | Число отловленных особей |         |         |         |       |
|--|--------------------------|---------|---------|---------|-------|
|  | Линия 1                  | Линия 2 | Линия 3 | Линия 4 | Всего |
| <i>S. minutissimus</i> (крошечная бурозубка) | –                        | 1       | –       | –       | 1     |
| <i>N. fodiens</i> (обыкновенная кутора)      | –                        | 1       | 2       | –       | 3     |
| <i>N. anomalus</i> (малая кутора)            | 2                        | –       | –       | 1       | 3     |

Таким образом, малые куторы, пойманные в октябре 2018 г. в Березинском биосферном заповеднике, отлавливались на значительном удалении (сотни метров) от непересыхающих водоемов. Это указывает на широкий спектр заселяемых (или посещаемых) этим видом биотопов и наводит на мысль о возможной сезонной изменчивости его биотопических связей. К сожалению, данных для каких-либо обобщающих выводов в этом отношении пока недостаточно.

**Белобрюхая белозубка** (*Crocidura leucodon* Hermann, 1780). Белозубки рода *Crocidura* представлены в нашей фауне двумя видами и тоже относятся к числу наименее изученных млекопитающих Беларуси. Существует необходимость обобщения имеющихся к настоящему времени данных о местах их обитания в республике. С тех пор как один экземпляр этого вида был отловлен в сентябре 1958 г. в Малоритском районе Брестской области [7], накопилось довольно много его регистраций в южной части нашей страны – Брестской и Гомельской областях (см. рисунок).

**Брестская область.** После упомянутой находки 1958 г. на территории Малоритского района Беларуси белобрюхая белозубка была обнаружена еще неоднократно: в 2008 г. – на 20-м километре трассы Брест – Ковель [12]; летом 2014 г. – возле д. Перевиси [13], 2 сентября 2015 г. – без указания более точного места находки [13]; 16 июля 2018 г. – в погадке домового сыча (*Athene noctua*) между деревнями Мокраны и Полики [14].

**Брестский район.** Ряд мест регистрации перечислен в публикации [12]: заказник «Бугский» (2002); берег мелиоративного канала у д. Семиссоны (1997); д. Мощенка (2005, 2009); 12-й и 24-й километры автомагистрали Козловичи – Минск (2008, 2010); садоводческое товарищество «Журавинка» у д. Заболотье (2013).

**Кобринский район.** 30 апреля 2009 г. взрослая самка белобрюхой белозубки найдена мертвой на окраине д. Городец вблизи жилых построек студентом БГУ В. Н. Викторovichем и доставлена нам. Масса зверька – 8,7 г, свежие плацентарные пятна и состояние сосков свидетельствовали о недавнем рождении этой самкой детенышей. Шкурка и череп сохранены в коллекции.

**Березовский район.** 2 сентября 2014 г. и 2 июня 2016 г. две особи пойманы в г. Березе и его ближайших окрестностях [12].

**Пружанский район.** В южной части района 21 октября 2002 г. самка этого вида отловлена в ловушку-давилку к югу от д. Оранчицы на зарастающей вырубке вблизи черноольшаника и открытого осушенного торфяника [15]. В северной части района 17 октября 2016 г. М. Н. Колосковым (по личному сообщению) и Д. В. Журавлёвым одна особь отловлена в живоловушку у края мелиоративного канала на польдере возле аг. Ровбицк (52° 40' 15,96" с. ш., 24° 2' 14,42" в. д.). Экземпляр исследован В. В. Гричиком.

**Барановичский район.** 16 сентября – 10 октября 2018 г. 11 особей белобрюхой белозубки (все первого года жизни, судя по состоянию зубов) отловлено на территории аг. Лесная (25 км к юго-западу от г. Барановичи); 10 из них отпрепарированы и сохранены в коллекции, из одной изготовлено чучело, экспонируемое в Зоологическом музее Белорусского государственного университета. Все зверьки пойманы в стандартные ловушки-давилки на территории жилой усадьбы возле хозяйственных построек. Эта точка регистрации заметно расширяет представления о северной границе ареала белобрюхой белозубки. Не исключено, что данный факт связан с расселением вида в северном направлении, однако однозначно утверждать это будет преждевременным, поскольку в данном населенном пункте специальные отловы мелких млекопитающих до этого не проводились.

**Гомельская область.** К настоящему времени известна единственная регистрация, сильно удаленная от остальных мест поимки этого вида, в Гомельском районе: одна особь (пол не указан) отловлена 9 сентября 2007 г. у периметра городской свалки г. Гомеля [16]. В источнике [2] утверждается, что в 2001 г. на территории Национального парка «Припятский» И. М. Зениной отмечен пик численности белобрюхой белозубки. По ее мнению, данные не соответствуют действительности, так как в этом случае должна идти речь о малой белозубке (*Crocidura suaveolens* Pall., 1811), которая в тот год особенно часто встречалась в названном регионе.

К сожалению, пока приходится констатировать практически полную неизученность большинства аспектов экологии этого вида: параметров размножения, динамики популяции, трофических связей и др. В публикациях [12; 13] можно найти лишь данные о биотопической приуроченности части находок, паразитофауне и фрагментарные данные по морфометрии, изменчивости окраски меха и диагностике, основанные на единичных экземплярах, порой даже без определения пола и указания возраста и сезонной стадии состояния меха. В связи с этим могут представлять определенный интерес данные, полученные на основе собранного нами коллекционного материала. В табл. 2 приведены морфометрические характеристики выборки осенних особей-первогодков белобрюхой белозубки, собранных на территории Барановичского (десять экземпляров) и Пружанского (один экземпляр) районов.

Таблица 2

**Морфометрические характеристики белобрюхих белозубок (*Crocidura leucodon*)**

Table 2

**Morphometric data of Bicolored white-toothed shrew (*Crocidura leucodon*)**

| Параметры                         | Самцы    |              |           | Самки    |              |           |
|-----------------------------------|----------|--------------|-----------|----------|--------------|-----------|
|                                   | <i>n</i> | $M \pm S_x$  | Lim.      | <i>n</i> | $M \pm S_x$  | Lim.      |
| Масса тела, г                     | 5        | 7,90 ± 0,21  | 7,4–8,6   | 6        | 7,84 ± 0,63  | 6,15–10,4 |
| Длина тела, мм                    | 5        | 76,0 ± 1,98  | 72–82     | 6        | 74,3 ± 2,73  | 65–81     |
| Длина хвоста, мм                  | 5        | 31,2 ± 0,72  | 29–33     | 6        | 32,3 ± 1,16  | 30–37     |
| Длина стопы, мм                   | 5        | 11,8 ± 0,26  | 11,0–12,5 | 6        | 11,8 ± 0,21  | 11,0–12,5 |
| Кандилобазальная длина черепа, мм | 4        | 18,13 ± 0,31 | 17,3–18,8 | 4        | 18,30 ± 0,26 | 17,8–19,0 |
| Межглазничная ширина черепа, мм   | 4        | 4,34 ± 0,04  | 4,2–4,4   | 4        | 4,13 ± 0,62  | 4,0–4,3   |
| Наибольшая ширина черепа, мм      | 4        | 9,00 ± 0,09  | 8,8–9,2   | 4        | 9,13 ± 0,14  | 8,9–9,5   |
| Длина верхнего зубного ряда, мм   | 4        | 8,44 ± 0,08  | 8,2–8,6   | 4        | 8,65 ± 0,06  | 8,5–8,8   |

Примечание. *n* – число исследованных экземпляров;  $M \pm S_x$  – среднее ± ошибка среднего; Lim. – предельные значения.

Все зверьки серии, собранной 16 сентября – 10 октября 2018 г. в Барановичском районе, находились в состоянии линьки. Как показал осмотр снятых шкурок, в этот период изменения наружных покровов наблюдались в области крестца, спины и боков, причем темные зоны на мездре в форме двух симметричных клиньев в передней части тела доходили до плеч. Весенняя самка, отловленная 30 апреля 2009 г. в Кобринском районе, также интенсивно линяла: свежий летний мех, отличающийся более светлой окраской, покрывал голову и верх шеи, на остальных частях тела был более темный зимний мех. Контраст между ним и вылинявшими участками был сильно заметен и сохранился на коллекционном экземпляре до настоящего времени.

**Библиографические ссылки**

1. Kashtalian AP. Soricidae of Belarus – modern status and geographical distribution. In: Merritt JF, Churchfield S, Hutterer R, Sheftel BI, editors. *Advances in the biology of shrews II. Special publication of the International Society of Shrew Biologists. Volume 1*. New York: International Society of Shrew Biologists; 2005. p. 115–124.
2. Красная книга Республики Беларусь. Животные: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных. Качановский ИМ, редактор. Минск: Беларуская энцыклапедыя імя Петруся Броўкі; 2015. 317 с.
3. Карасева ЕВ, Телицына АЮ, Жигальский ОА. *Методы изучения грызунов в полевых условиях*. Москва: Издательство ЛКИ; 2008. 416 с.
4. Рак АВ, Спрингер АМ, Гричик ВВ. Результаты мониторинга видов семейства землеройковых (Soricidae) в Березинском биосферном заповеднике. В: *Зоологические чтения – 2019. Сборник статей V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Гродненского зоологического парка; 20–22 марта 2019 г.; Гродно, Беларусь*. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы; 2019. с. 234–236.
5. Зайцев МВ, Войта ЛЛ, Шефтель БИ. *Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Насекомоядные*. Санкт-Петербург: Наука; 2014. 385 с.
6. Mishta A. New data on distribution range of some Soricidae in Eastern Europe. In: *Abstracts of the conference poster and oral papers, presented at 8<sup>th</sup> Baltic theriological conference; 2011 October 7–9; Palanga, Lithuania*. Palanga: [s. n.]; 2011. p. 24–25.
7. Сержанин ИИ. *Млекопитающие Белоруссии*. Минск: Издательство Академии наук БССР; 1961. 318 с.
8. Туров СС. Предварительные замечания о фауне млекопитающих Беловежской пушчи. *Ученые записки Московского городского педагогического института имени В. П. Потемкина*. 1955;38:5–12.

9. Саварин АА, Молош АН. О находке куторы малой (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) на территории станции по очистке сточных вод г. Береза (Брестская область). *Вісник Одеського національного університету. Біологія*. 2017;1(40):71–77. DOI: 10.18524/2077-1746.2017.1(40).105177.
10. Каштальян АП. Материалы по видовому составу и географическому распространению землероек Беларуси. В: *Биология насекомыхных млекопитающих. Тезисы докладов международной конференции; 25–28 октября 1999 г.; Кемерово, Россия*. Кемерово: Кузбассвузиздат; 1999. с. 50–53.
11. Саварин АА. Находка куторы малой (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) в Ушачском районе Витебской области. *Вестник Витебского университета*. 2019;2(103):66–71.
12. Шималов ВВ. Мониторинг белозубки белобрюхой (*Crocidura leucodon* Hermann, 1780) и ее гельминтофауны в юго-западной Беларуси. В: Дунай ВИ, Позняк СС, Лысухо НА, редакторы. *Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века. Материалы 14-й Международной научной конференции; 29–30 мая 2014 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Международный государственный экологический университет имени А. Д. Сахарова; 2014. с. 183–184.
13. Саварин АА, Молош АН. К экологии и видовой диагностике белозубок (*Crocidura*, *Soricidae*), обитающих на территории Белорусского Полесья. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. 2015;6:29–33.
14. Саварин АА, Кителъ ДА. О находке белобрюхой белозубки (*Crocidura leucodon*) в погадке домового сыча (*Athene noctua*) на юго-западе Беларуси. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. 2018;6(111):116–118.
15. Гричик ВВ, Гаевский ЕЕ. Новые данные о белобрюхой белозубке (*Crocidura leucodon* Herm.) в Беларуси. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2. Химия. Биология. География*. 2003;1:107.
16. Саварин АА. О поимке белозубки белобрюхой (*Crocidura leucodon*) в юго-восточной части Беларуси. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2. Химия. Биология. География*. 2008;2:112.

## References

1. Kashtalian AP. Soricidae of Belarus – modern status and geographical distribution. In: Merritt JF, Churchfield S, Hutterer R, Sheftel BI, editors. *Advances in the biology of shrews II. Special publication of the International Society of Shrew Biologists. Volume 1*. New York: International Society of Shrew Biologists; 2005. p. 115–124.
2. *Krasnaya kniga Respubliki Belarus'. Zhivotnye: redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoi ischeznoventiya vidy dikikh zhivotnykh* [The Red Book of the Republic of Belarus. Animals: rare and endangered species of wild animals]. Kachanovskii IM, editor. Minsk: Belaruskaja jencyklapedyja imja Petrusja Browki; 2015. 317 p. Russian.
3. Karaseva EV, Telitsina AYU, Zhigalski OA. *The methods of studying rodents in the wild nature*. Moscow: Izdatel'stvo LKI; 2008. 416 p. Russian.
4. Rak AV, Springer AM, Grichik VV. [The result of monitoring of Soricidae in Berezinsky biosphere reserve]. In: *Zoologicheskie chteniya – 2019. Sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu Grodnenskogo zoologicheskogo parka; 20–22 marta 2019 g.; Grodno, Belarus'* [Zoological Readings – 2019. Collection of articles of the V International scientific and practical conference dedicated to the 90<sup>th</sup> anniversary of the Grodno Zoological Park; 2019 March 20–22; Grodno, Belarus]. Grodno: Yanka Kupala State University of Grodno; 2019. p. 234–236. Russian.
5. Zaitsev MV, Voyta LL, Sheftel BI. *Mlekovitayushchie fauny Rossii i soprodel'nykh territorii. Nasekomoyadnye* [The mammals of Russia and adjacent territories. Lipotyphlans]. Saint Petersburg: Nauka; 2014. 385 p. Russian.
6. Mishta A. New data on distribution range of some Soricidae in Eastern Europe. In: *Abstracts of the conference poster and oral papers, presented at 8<sup>th</sup> Baltic theriological conference; 2011 October 7–9; Palanga, Lithuania*. Palanga: [s. n.]; 2011. p. 24–25.
7. Serzanin IN. *Mlekovitayushchie Belorussii* [Mammals of Belorussia]. Minsk: Izdatel'stvo Akademii nauk BSSR; 1961. 318 p. Russian.
8. Turov SS. [Preliminary remarks on the fauna of mammals of the Bialowieza forest]. *Uchenye zapiski Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo instituta imeni V. P. Potemkina*. 1955;38:5–12. Russian.
9. Savarin AA, Molosh AN. [About finding the Mediterranean Water Shrew (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) on the territory of waste water treatment plant in Bereza town (Brest Region)]. *Вісник Одеського національного університету. Біологія*. 2017;1(40):71–77. Russian. DOI: 10.18524/2077-1746.2017.1(40).105177.
10. Kashtalian AP. [Materials on the species composition and geographic distribution of shrews of Belarus]. In: *Biology of insectivorous mammals. Proceedings of the International conference; 1999 October 25–28; Kemerovo, Russia*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 1999. p. 50–53. Russian.
11. Savarin AA. [The find of Mediterranean water shrew (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) in Ushachy District of Vitebsk Region]. *Vestnik Vitebskogo universiteta*. 2019;2(103):66–71. Russian.
12. Shimalov VV. [Monitoring of the helminth fauna of the white-toothed shrew (*Crocidura leucodon* Hermann, 1780) in south-west Belarus]. In: Dunai VI, Poznyak SS, Lysukho NA, editors. *Sakharovskie chteniya 2014 goda: ekologicheskie problemy XXI veka. Materialy 14-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii; 29–30 maya 2014 g.; Minsk, Belarus'* [Sakharov readings 2014: environmental problems of the XXI century. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International scientific conference; 2014 May 29–30; Minsk, Belarus]. Minsk: International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University; 2014. p. 183–184. Russian.
13. Savarin AA, Molosh AN. On the ecology and species diagnosis of white-toothed shrews (*Crocidura*, *Soricidae*), living on the territory of Belarusian Polesye. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2015;6:29–33. Russian.
14. Savarin AA, Kitel DA. On the finding of bicolored shrew (*Crocidura leucodon*) in the pellet of little owl (*Athene noctua*) in southwestern Belarus. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2018;6(111):116–118. Russian.
15. Grichik VV, Gaevskii EE. New data on bicolored shrew (*Crocidura leucodon* Herm.) in Belarus. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2003;1:107. Russian.
16. Savarin AA. About catching of *Crocidura leucodon* in the south-east region of Belarus. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2008;2:112. Russian.

Статья поступила в редакцию 19.03.2020.  
Received by editorial board 19.03.2020.

УДК 598.2

## МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ ПТИЦ ЦЕНТРАЛЬНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ (МИНСК)

В. В. САХВОН<sup>1)</sup>, К. А. ФЕДОРИНЧИК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Анализируется межгодовая динамика видовой разнообразия гнездящихся птиц на территории Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (Минск). Результаты количественных учетов птиц в 2016–2019 гг. сопоставлены с данными 1982–1985 и 1991–1992 гг. Всего на указанной территории было зарегистрировано пребывание 86 видов птиц, из них для 59 видов доказано гнездование. Межгодовая динамика обилия прослежена для 42 гнездящихся видов. Общая плотность гнездования птиц варьировалась от 2,03 до 8,76 пар/га. В число доминантов в разное время входили 16 видов: *Fringilla coelebs*, *Erithacus rubecula*, *Turdus merula*, *T. philomelos*, *T. pilaris*, *Parus major*, *Cyanistes caeruleus*, *Sylvia atricapilla*, *S. borin*, *S. curruca*, *Phylloscopus sibilatrix*, *Ph. collybita*, *Ph. trochilus*, *Sturnus vulgaris*, *Pica pica* и *Columba palumbus*, доля которых в населении птиц в разные годы составляла 61,5–71,5 %. В XXI в. произошло заметное увеличение видовой богатства и общей плотности гнездования птиц, а также изменился качественный состав гнездовой орнитофауны (2 вида исчезли с данной территории, появились 17 новых гнездящихся видов). Факторы, оказавшие влияние на организацию ассамблей гнездящихся птиц на территории Центрального ботанического сада НАН Беларуси, обсуждаются.

**Ключевые слова:** орнитофауна; ассамблея гнездящихся птиц; плотность гнездования; численность; парк; урбанизированная территория; синурбизация.

## INTERANNUAL DYNAMICS OF BREEDING BIRD ASSEMBLAGE WITHIN THE CENTRAL BOTANICAL GARDEN OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS (MINSK)

V. V. SAKHVON<sup>a</sup>, K. A. FEDORYNCHIK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

We studied the dynamics of the composition and diversity of breeding bird assemblage within the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus in Minsk during 2016–2019 and compared with census data from breeding seasons of 1982–1985 and 1991–1992. Total 86 species were recorded and the breeding was confirmed for 59 of them. The interannual dynamics of breeding density for 42 species is analysed. Overall bird densities varied from 2.03 pairs/ha to 8.76 pairs/ha during single year; 16 species (*Fringilla coelebs*, *Erithacus rubecula*, *Turdus merula*, *T. philomelos*, *T. pilaris*, *Parus major*, *Cyanistes caeruleus*, *Sylvia atricapilla*, *S. borin*, *S. curruca*, *Phylloscopus sibilatrix*, *Ph. collybita*, *Ph. trochilus*, *Sturnus vulgaris*, *Pica pica* and *Columba palumbus*) were shown to be the dominants in

### Образец цитирования:

Сахвон ВВ, Федоринчик КА. Межгодовая динамика видовой разнообразия птиц Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (Минск). *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2020;2:66–74.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-66-74>

### For citation:

Sakhvon VV, Fedorynchik KA. Interannual dynamics of breeding bird assemblage within the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk). *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2020;2:66–74. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-66-74>

### Авторы:

**Виталий Валерьевич Сахвон** – кандидат биологических наук, доцент; заместитель декана по учебно-воспитательной работе и социальным вопросам биологического факультета.  
**Карина Артемовна Федоринчик** – студентка биологического факультета. Научный руководитель – В. В. Сахвон.

### Authors:

**Vital V. Sakhvon**, PhD (biology), docent; deputy dean for educational work and social issues, faculty of biology.  
[sakhvon@gmail.com](mailto:sakhvon@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6673-8118>  
**Karyna A. Fedorynchik**, student at the faculty of biology.

assemblage during these years. We found that there was increased in species richness (17 new breeding species appeared, 2 breeding species disappeared) and the overall breeding bird density (by almost 3–4 times) since 1982. The main factors explaining the dynamics of some assemblage characteristics such as synurbization of some bird species and change in habitat structure are discussed.

**Keywords:** urban bird assemblage; bird diversity; breeding bird density; park; city; synurbization.

## Введение

Зеленые древесные насаждения (городские леса, парки, скверы и пр.) являются неотъемлемым элементом ландшафтно-рекреационного комплекса городов, призванного в первую очередь снизить техногенную нагрузку как на городское население, так и на городские экосистемы в целом. Вместе с тем они представляют собой местообитания, важные для сохранения и поддержания биологического разнообразия, в том числе и видового богатства птиц [1; 2]. Несмотря на значительную антропогенную (прежде всего рекреационную) нагрузку, оказываемую на городские зеленые насаждения, и особый режим хозяйственной деятельности на таких территориях, население птиц здесь зачастую характеризуется высоким разнообразием, близким к таковому естественных лесов [3–7], а плотность гнездования отдельных видов (например, вяхиря (*Columba palumbus*) [4]) нередко может быть даже выше, чем в природных лесных экосистемах.

Долговременные исследования межгодовой динамики структуры видового разнообразия гнездящихся птиц зеленых насаждений в центрально- и западноевропейских городах обнаружили достаточно схожие тенденции даже в географически отдаленных регионах. Так, с течением времени происходила смена видового состава птиц, часто его расширение, при этом среди доминантов появлялись новые виды, до этого гнездившиеся лишь в небольшом количестве либо полностью отсутствовавшие на гнездовании здесь. Как следствие, такого рода качественные и количественные изменения в структуре населения птиц влекли за собой возрастание общей плотности их гнездования [4; 8; 9]. Схожие особенности динамики структуры ассамблей гнездящихся птиц были зарегистрированы на урбанизированных территориях Беларуси [7], Украины [10] и европейской части России [11], что может свидетельствовать о направленности выявленных процессов в условиях городских древесных насаждений под влиянием урбанизации.

Вместе с тем в ряде исследований было показано обеднение видового состава птиц и снижение общей плотности их гнездования с усилением антропогенного воздействия на древесные насаждения с течением времени [12; 13]. Как правило, урбанизация самым негативным образом сказывается на орнитофауне городов вне зависимости от их географического положения или пространственной структуры, приводя к сокращению видового богатства птиц и увеличению его «однородности» [14; 15]. При этом заметное распространение получают экологически пластичные виды, тогда как узкоспециализированные постепенно исчезают с урбанизированных территорий, чутко реагируя на повышение уровня трансформации экосистем [16; 17]. Этим, в частности, можно объяснить сходство выявленных трендов в динамике общей плотности гнездования птиц городских парков в Европе. Поскольку многие из успешно освоивших урбоэкосистемы видов птиц (синурбистов) экологически связаны с древесно-кустарниковой растительностью, их участие в формировании ассамблей гнездящихся птиц в условиях древесных насаждений на урбанизированных территориях является значительным и зачастую определяющим. Очевидно, что для выяснения многих общетеоретических и практических вопросов организации ассамблей гнездящихся птиц в условиях урбоэкосистем требуется накопление данных о многолетней динамике населения птиц.

Целью настоящей работы было оценить динамику структуры ассамблей гнездящихся птиц на территории Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (далее – ЦБС). Для этого требовалось: 1) выяснить современный состав гнездовой орнитофауны и его изменения, произошедшие с начала исследований на данной территории; 2) проанализировать межгодовую динамику видового разнообразия гнездящихся птиц и установить факторы, ее обуславливающие; 3) определить тренды численности отдельных видов птиц.

## Материалы и методы исследования

Изучение видового разнообразия птиц древесно-кустарниковых насаждений на территории ЦБС проводилось на протяжении 4 гнездовых сезонов в период с 2016 по 2019 г. Несмотря на то что для полного выявления видового состава птиц ЦБС неоднократно посещался в течение всего года, наиболее интенсивные исследования приходились на время гнездового сезона (со второй половины марта

до середины июня). Количественные учеты птиц проводились с помощью метода картирования их гнездовых территорий на площадках [18]. Для увеличения полноты и точности учетов дополнительно в ходе детального обследования учетной площадки осуществлялся поиск гнезд трудно регистрируемых видов, таких как дрозды (*Turdus*) [19]. Учеты выполнялись в утреннее время (после восхода солнца и до 12 ч) при благоприятных для выявления птиц погодных условиях. При посещении учетной площадки все птицы с признаками гнездования регистрировались на карте. За гнездящуюся пару при этом принимались отмеченный визуально или по голосу территориальный самец, жилое гнездо либо птицы с признаками гнездования (самки с кормом, беспокоящиеся особи и пр.). Ввиду значительного размера учетной площадки (22,5 га), не позволяющего провести полноценный количественный учет птиц за одно посещение, она была разбита на 3 сектора. Для удобства регистрации гнездовых территорий птиц исследования выполнялись на каждом из секторов в отдельности. При этом повторность учетов в один гнездовой сезон на всех из них была от 4 до 8. В конце каждого гнездового сезона составлялась общая карта, на которую наносились гнездовые территории всех отмеченных видов, а плотность гнездования птиц, выраженная в количестве пар на 1 га, рассчитывалась для площадки в целом.

ЦБС был образован в 1932 г. на месте соснового мелколесья и сейчас представляет собой уникальный природный объект садово-паркового искусства. Он располагается в центральной части Минска (53° 54' 47" с. ш., 27° 36' 43" в. д.) и в настоящее время имеет площадь 93 га, половина которой занята древесно-кустарниковой растительностью, разделенной аллеями посадками деревьев местной и мировой дендрофлоры на тематические сектора. В экспозиции Беларуси отражены основные растительные сообщества лесов республики, как хвойных, так и лиственных. По численности экспонируемых таксонов экзотов 38 % всей коллекции – деревья и кустарники родом из Восточной Азии, 28 % – Северной Америки, 20 % – Европы, на долю остальных регионов приходится 14 %. Средний возраст деревьев составляет не менее 60–70 лет. Всего же в коллекции растений представлено свыше 5 тыс. видов [20]. Несмотря на свое местоположение, ЦБС – это не полностью изолированные урбанизированным ландшафтом древесные насаждения, поскольку с восточной стороны через фрагменты городских лесов ЦБС соединяется с лесным массивом пригородного леса, формируя своего рода зеленый коридор, по которому птицы могут проникать в центральную часть Минска.

### Результаты и их обсуждение

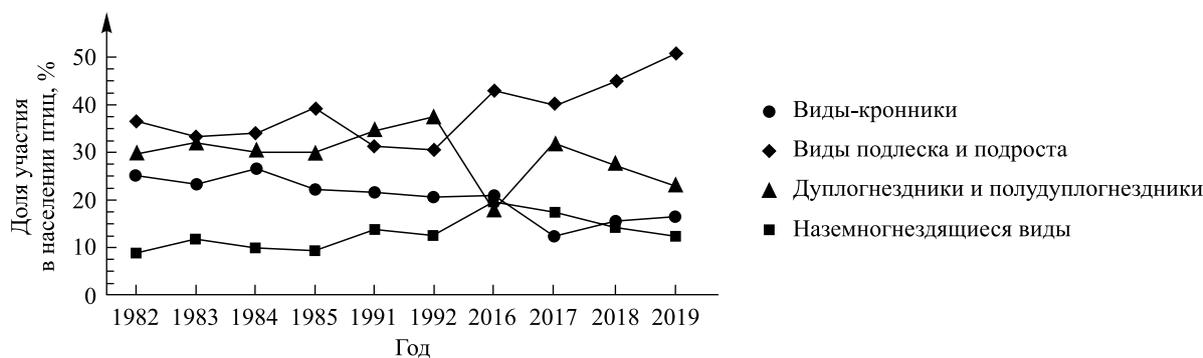
В ходе проведенных исследований и анализа данных, накопленных на кафедре зоологии биологического факультета БГУ, было установлено, что ЦБС характеризуется сравнительно высоким видовым богатством птиц, заметно большим, чем в некоторых других городских древесных насаждениях Минска [7]. В общей сложности на территории сада зарегистрировано пребывание 86 видов птиц (25,7 % всей орнитофауны Беларуси). Абсолютное большинство из отмеченных здесь видов (59, т. е. 68,6 %) относятся к категории гнездящихся или предположительно гнездящихся. Остальные виды птиц являются посетителями данной территории в ходе сезонных кочевок и миграций. При этом к настоящему времени лишь отдельные из них регистрируются в ЦБС более-менее регулярно (например, клёст-еловик (*Loxia curvirostra*), свиристель (*Bombycilla garrulus*)), тогда как многие известны только по единичным наблюдениям (обыкновенный козодой (*Caprimulgus europaeus*), обыкновенный сверчок (*Locustella naevia*)).

По сравнению с данными исследований 1980–90-х гг. на территории ЦБС произошли заметные изменения в структуре гнездовой орнитофауны, выражающиеся в первую очередь в смене видового состава. В частности, здесь прекратили гнездиться кольчатая горлица (*Streptopelia decaocto*), серая куропатка (*Perdix perdix*), обыкновенный жулан (*Lanius collurio*), обыкновенная овсянка (*Emberiza citrinella*). По всей видимости, к настоящему времени из числа гнездящихся видов исчез и малый дятел (*Dendrocopos minor*). Интересно, что ранее на территории ботанического сада так же регулярно, как и в некоторых других крупных по площади городских древесных насаждениях, гнездилися белобровик (*Turdus iliacus*), однако сейчас этот вид лишь изредка отмечается на периферии города в сезон миграций. Вместе с тем за последние 20–25 лет на гнездовании появилось 17 новых видов птиц, многие из которых стали обычными гнездящимися, например вяхирь (*Columba palumbus*), певчий (*Turdus philomelos*) и черный (*T. merula*) дрозды. Некоторые из таких видов начали регулярно регистрироваться на гнездовании лишь недавно, в частности садовая камышевка (*Acrocephalus dumetorum*) или зеленая пеночка (*Phylloscopus trochiloides*).

Анализ результатов количественных учетов гнездового населения птиц показал, что, помимо динамики видового состава, в первую очередь его расширения за счет появления на гнездовании целого ряда новых видов в последние десятилетия, наблюдались изменения плотностей гнездования отдельных видов и, как следствие, общей плотности гнездования птиц. Всего количественными учетами охвачено 42 вида птиц, а количество гнездящихся видов на учетной площадке было заметно большим

в 2010-х гг. и варьировалось от 20 (в 1984 г.) до 32 (в 2018 г.) в отдельный гнездовой сезон (см. таблицу). При этом лишь 11 видов регистрировались в ходе учетов во все годы исследований: серая ворона (*Corvus cornix*), рябинник (*Turdus pilaris*), обыкновенный соловей (*Luscinia luscinia*), черноголовая славка (*Sylvia atricapilla*), славка-завирушка (*S. curruca*), пеночка-теньковка (*Phylloscopus collybita*), большая синица (*Parus major*), обыкновенная лазоревка (*Cyanistes caeruleus*), обыкновенный скворец (*Sturnus vulgaris*), зеленушка (*Chloris chloris*) и зяблик (*Fringilla coelebs*), хотя их участие в населении птиц варьировалось между годами. Для общей плотности гнездования птиц также установлен положительный тренд: к 2019 г. она увеличилась более чем в 3 раза (до 6,98 пар/га) по сравнению с 1982 г. (2,03 пар/га). В число доминантов в разное время входили 16 видов (7–9 видов в отдельный сезон), а их доля в населении птиц составляла от 61,5 % (в 2018 г.) до 71,5 % (в 1983 г.). Наряду с этим стоит отметить, что структура доминантов также претерпела изменения со временем. Зяблик был доминантом во все годы исследований, равно как и вяхирь и черный дрозд, которые стали отмечаться в учетах лишь в 2010-х гг. К этим видам следует добавить черноголовую славку и большую синицу, которые являлись доминантами в абсолютном большинстве гнездовых сезонов. Если в прошлом столетии в числе доминантов неизменно были рябинник, сорока (*Pica pica*), садовая славка (*Sylvia borin*) и обыкновенный скворец, а также, хотя и не ежегодно, пеночка-теньковка и пеночка-трещотка (*Phylloscopus sibilatrix*), то в последующем их заменили зарянка (*Erithacus rubecula*), певчий дрозд и уже упоминавшиеся выше вяхирь и черный дрозд.

Участие в населении птиц видов разных экологических групп, различающихся по предпочитаемому месту расположения гнезда, также варьировалось между годами. При этом суммарно доля видов, гнездящихся в кронах и дуплах деревьев, имела тенденцию к снижению, несмотря на то что в их состав входили несколько видов с положительной межгодовой динамикой численности (вяхирь, большая синица, лазоревка и зарянка). Например, если в 1980-х гг. участие кронников в ассамблеях гнездящихся птиц составляло в среднем ( $24,30 \pm 1,88$ ) % (максимум 26,5 % в 1985 г.), то в 2010-х гг. уменьшилось до ( $15,90 \pm 3,51$ ) % (максимум 20,6 % в 2016 г.). В свою очередь, доля видов, устраивающих гнезда в подлеске и подросте, постепенно увеличивалась как за счет расширения видового состава (в XXI в. на гнездовании появилось сразу 8 видов данной экологической группы), так и за счет возрастания плотностей гнездования отдельных из них (зяблик, черноголовая славка, обыкновенная зеленушка) (см. рисунок).



Соотношение экологических групп птиц по месторасположению гнезда в ассамблеях гнездящихся птиц ЦБС (Минск) в разные годы  
The ratio of ecological groups in nests location preferences of breeding birds in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk) in different years

Сравнение межгодовых плотностей гнездования птиц позволило констатировать, что к настоящему времени по меньшей мере у 13 видов произошло увеличение численности, тогда как численность 3 видов заметно сократилась, а 2 вида и вовсе исчезли с данной территории, хотя ранее гнездились здесь регулярно. При этом причины снижения численности отдельных видов птиц или даже полного исчезновения некоторых из них с рассматриваемой территории всецело связаны с усилением урбанизации, обусловленной значительным разрастанием площади Минска. Это справедливо в первую очередь для таких видов, как обыкновенная чечевица (*Carpodacus erythrinus*) и белобровик, а также для черноголового щегла, численность которого в центральных кварталах города значительно сократилась в последние годы. Нерегулярное гнездование некоторых других видов птиц в ЦБС (крапивник (*Troglodytes troglodytes*), обыкновенный снегирь (*Pyrrhula pyrrhula*) и пр.), по всей видимости, свидетельствует о том, что в ближайшем будущем они исчезнут в качестве гнездящихся с данной территории. К тому же к настоящему времени в ботаническом саду заметно уменьшилось количество гнездящихся пар сороки.

**Плотность гнездования и тренды численности птиц  
в условиях древесных насаждений на территории ЦБС (Минск)**  
**The breeding bird densities and species population trends in the Central Botanical Garden  
of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk)**

| Экологическая группа                              | Вид                                  | Плотность гнездования, пар/га |      |      |      |      |      |       |      |      |      |   |  |  | Тренд |
|---|--------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|---|--|--|-------|
|   |                                      | 1982                          | 1983 | 1984 | 1985 | 1991 | 1992 | 2016  | 2017 | 2018 | 2019 |   |  |  |       |
| Гнездящиеся преимущественно в кронах деревьев     | <i>Turdus pilaris</i>                | 0,23                          | 0,3  | 0,26 | 0,2  | 0,19 | 0,23 | 0,6   | 0,23 | 0,36 | 0,3  | F |  |  |       |
|   | <i>Columba palumbus</i>              | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,46  | 0,33 | 0,5  | 0,5  | I |  |  |       |
|   | <i>Pica pica</i>                     | 0,21                          | 0,24 | 0,29 | 0,26 | 0,24 | 0,28 | –     | –    | 0,03 | 0,03 | D |  |  |       |
|   | <i>Corvus cornix</i>                 | 0,02                          | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03  | 0,03 | 0,1  | 0,1  | I |  |  |       |
|   | <i>Carduelis carduelis</i>           | 0,03                          | 0,02 | 0,06 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,03  | 0,03 | –    | –    | S |  |  |       |
|   | <i>Garrulus glandarius</i>           | 0,02                          | –    | 0,02 | –    | 0,04 | 0,04 | –     | 0,03 | 0,1  | 0,03 | S |  |  |       |
|   | <i>Coccothraustes coccothraustes</i> | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,13  | 0,03 | 0,1  | 0,06 | F |  |  |       |
|   | <i>Serinus serinus</i>               | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,13  | –    | 0,06 | 0,06 | S |  |  |       |
|   | <i>Regulus regulus</i>               | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –    | 0,03 | 0,03 | ? |  |  |       |
|   | <i>Accipiter nisus</i>               | –                             | –    | –    | –    | 0,02 | 0,02 | –     | 0,03 | 0,03 | –    | S |  |  |       |
| Гнездящиеся преимущественно в подросте и подлеске | Всего 10 видов                       | 0,51                          | 0,59 | 0,68 | 0,54 | 0,57 | 0,65 | 1,38  | 0,71 | 1,31 | 1,11 | – |  |  |       |
|   | <i>Fringilla coelebs</i>             | 0,18                          | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,21 | 0,24 | 0,86  | 0,8  | 1,1  | 1,0  | I |  |  |       |
|   | <i>Sylvia atricapilla</i>            | 0,15                          | 0,21 | 0,2  | 0,21 | 0,12 | 0,18 | 0,4   | 0,4  | 0,6  | 0,83 | I |  |  |       |
|   | <i>Sylvia borin</i>                  | 0,15                          | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,28 | 0,28 | –     | 0,06 | 0,23 | 0,23 | F |  |  |       |
|   | <i>Sylvia curruca</i>                | 0,1                           | 0,12 | 0,1  | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,4   | 0,03 | 0,26 | 0,03 | F |  |  |       |
|   | <i>Chloris chloris</i>               | 0,09                          | 0,06 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,11 | 0,03* | 0,16 | 0,23 | 0,23 | I |  |  |       |
|   | <i>Turdus merula</i>                 | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,56  | 0,43 | 0,7  | 0,6  | I |  |  |       |
|   | <i>Turdus philomelos</i>             | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,3   | 0,33 | 0,7  | 0,5  | I |  |  |       |
|   | <i>Turdus iliacus</i>                | 0,02                          | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | –     | –    | –    | –    | E |  |  |       |
|   | <i>Hippolais icterina</i>            | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,2   | 0,06 | –    | 0,03 | D |  |  |       |
| Гнездящиеся преимущественно в подросте и подлеске | <i>Carpodacus erythrinus</i>         | 0,05                          | 0,02 | –    | 0,02 | 0,02 | 0,02 | –     | –    | –    | –    | E |  |  |       |
|   | <i>Troglodytes troglodytes</i>       | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,03  | –    | –    | –    | ? |  |  |       |
|   | <i>Prunella modularis</i>            | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | 0,06  | –    | –    | –    | ? |  |  |       |
|   | <i>Acrocephalus palustris</i>        | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –    | 0,03 | –    | ? |  |  |       |
|   | <i>Acrocephalus dumetorum</i>        | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | –     | –    | 0,03 | 0,03 | ? |  |  |       |
|   | <i>Pyrhula pyrrhula</i>              | –                             | –    | –    | –    | –    | –    | –     | 0,03 | –    | –    | ? |  |  |       |
| Всего 15 видов                                    | 0,74                                 | 0,84                          | 0,87 | 0,95 | 0,83 | 0,97 | 2,84 | 2,3   | 3,88 | 3,48 | –    |   |  |  |       |

| Экологическая группа                | Вид                        | Плотность гнездования, пар/га |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |      |      | Тренд |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------|------|-------|
|                                     |                            | 1982                          | 1983             | 1984             | 1985             | 1991            | 1992            | 2016             | 2017             | 2018             | 2019 |      |       |
| Дуплогнездящие и полудуплогнездящие | <i>Parus major</i>         | 0,18                          | 0,21             | 0,24             | 0,24             | 0,32            | 0,37            | 0,26             | 0,4              | 0,73             | 0,46 | I, F |       |
|                                     | <i>Erethacus rubecula</i>  | 0,03                          | 0,06             | 0,05             | 0,05             | –               | 0,02            | 0,46             | 0,73             | 0,6              | 0,36 | I, F |       |
|                                     | <i>Sturnus vulgaris</i>    | 0,18                          | 0,3              | 0,26             | 0,21             | 0,32            | 0,33            | 0,03*            | 0,3              | 0,43             | 0,26 | F    |       |
|                                     | <i>Cyanistes caeruleus</i> | 0,08                          | 0,09             | 0,1              | 0,09             | 0,16            | 0,19            | 0,03*            | 0,2              | 0,26             | 0,33 | I    |       |
|                                     | <i>Muscicapa striata</i>   | 0,03                          | 0,05             | 0,03             | 0,05             | 0,04            | 0,05            | –                | –                | 0,06             | –    | F    |       |
|                                     | <i>Ficedula hypoleuca</i>  | 0,1                           | 0,1              | 0,09             | 0,08             | 0,05            | 0,09            | 0,26             | 0,16             | 0,16             | –    | F    |       |
|                                     | <i>Dendrocopos major</i>   | –                             | –                | –                | –                | 0,02            | 0,02            | 0,06             | 0,03*            | 0,03             | 0,03 | S    |       |
|                                     | <i>Ficedula parva</i>      | –                             | –                | –                | –                | –               | –               | 0,03             | –                | 0,03             | 0,03 | S    |       |
|                                     | <i>Certhia familiaris</i>  | –                             | –                | –                | –                | –               | 0,12            | –                | –                | 0,06             | –    | ?    |       |
|                                     | <i>Jynx torquilla</i>      | –                             | –                | –                | –                | –               | –               | 0,06             | –                | –                | –    | ?    |       |
|                                     | <i>Periparus ater</i>      | –                             | –                | –                | –                | –               | –               | –                | –                | –                | 0,1  | ?    |       |
|                                     | <i>Parus montanus</i>      | –                             | –                | –                | –                | –               | –               | –                | 0,03             | –                | –    | ?    |       |
|                                     | Всего 12 видов             | 0,6                           | 0,81             | 0,77             | 0,72             | 0,91            | 1,19            | 1,19             | 1,19             | 1,85             | 2,36 | 1,57 | –     |
|                                     | Гнездящиеся на земле       | <i>Phylloscopus collybita</i> | 0,09             | 0,08             | 0,1              | 0,08            | 0,11            | 0,12             | 0,5              | 0,2              | 0,46 | 0,26 | I, F  |
| <i>Luscinia luscinia</i>            |                            | 0,02                          | 0,05             | 0,03             | 0,03             | 0,07            | 0,09            | 0,33             | 0,26             | 0,23             | 0,2  | I    |       |
| <i>Phylloscopus sibilatrix</i>      |                            | –                             | 0,02             | –                | 0,02             | 0,04            | 0,07            | 0,33             | 0,23             | 0,36             | 0,36 | I    |       |
| <i>Phylloscopus trochilus</i>       |                            | 0,07                          | 0,14             | 0,12             | 0,09             | 0,14            | 0,11            | 0,13             | 0,3              | 0,1              | –    | F    |       |
| <i>Phylloscopus trochiloides</i>    |                            | –                             | –                | –                | –                | –               | –               | –                | –                | 0,06             | –    | ?    |       |
| Всего 5 видов                       | 0,18                       | 0,29                          | 0,25             | 0,22             | 0,36             | 0,39            | 1,29            | 0,99             | 1,21             | 0,82             | –    |      |       |
| Всего 42 вида                       | 2,03<br>(n = 21)           | 2,53<br>(n = 21)              | 2,57<br>(n = 20) | 2,43<br>(n = 21) | 2,67<br>(n = 23) | 3,2<br>(n = 25) | 6,7<br>(n = 26) | 5,85<br>(n = 27) | 8,76<br>(n = 32) | 6,98<br>(n = 27) | –    |      |       |

Примечание. I – увеличение численности, D – снижение численности, S – численность стабильна, F – флуктуация, E – исчезнувший вид, ? – тренд неизвестен, \* – возможно, неполные количественные данные; полужирным выделены виды, которые являлись доминантами (не менее 5 % всего населения).

Причиной этого является синурбизация названного вида в Минске, в результате чего птицы смогли успешно освоить даже центральные городские кварталы, часто гнездясь здесь со сравнительно высокой плотностью [21]. Аналогичная картина была свойственна развитию городских группировок серой вороны (*Corvus cornix*) в условиях Минска [22].

### Заключение

Подытоживая, можно констатировать следующего рода тенденции в межгодовой динамике организации ассамблей гнездящихся птиц на территории ЦБС в Минске. К настоящему моменту произошло увеличение видового богатства гнездящихся птиц и одновременно общей плотности их гнездования. При этом широкое распространение получили экологически пластичные виды, часть которых появились на гнездовании здесь лишь в последние десятилетия (например, вяхирь, черный и певчий дрозды). Эти виды (синурбисты) являются успешными колонизаторами урбанизированных территорий в Европе, а в последние годы и в Беларуси, где демонстрируют многие адаптационные черты, свойственные особям из уже сформировавшихся городских популяций птиц на западе ареала [23; 24]. Схожая динамика структуры ассамблей гнездящихся птиц была установлена для памятника природы республиканского значения «Дубрава» у юго-западной границы Минска [7]. С другой стороны, наблюдалось постепенное сокращение численности и даже полное исчезновение с территории ботанического сада некоторых видов птиц, предъявляющих специфические требования к местам размножения (белобровик, обыкновенная чечевица). По всей видимости, негативным фактором здесь выступило усиление урбанизации, сопровождавшееся расширением административных границ города, что, в свою очередь, привело к нарушению пространственной структуры (фрагментации) городских древесных насаждений, в том числе и ЦБС, некогда составлявших сплошной единый лесной массив с пригородным лесом. Мы предполагаем, что сейчас ассамблея гнездящихся птиц ЦБС находится на пике своего насыщения видами и в ближайшем будущем видовое богатство гнездящихся птиц здесь будет сокращаться. Намечившаяся негативная тенденция для ряда узкоспециализированных видов птиц в скором времени приведет к исчезновению с данной территории 5–7 видов.

### Библиографические ссылки

1. Fernández-Juricic E, Jokimäki J. A habitat island approach to conserving birds in urban landscapes: case studies from southern and northern Europe. *Biodiversity & Conservation*. 2001;10(12):2023–2043. DOI: 10.1023/A:1013133308987.
2. Caula S, de Villalobos AE, Marty P. Seasonal dynamics of bird communities in urban forests of a Mediterranean city (Montpellier, Southern France). *Urban Ecosystems*. 2014;17(1):11–26. DOI: 10.1007/s11252-013-0295-2.
3. Tomiałojć L. Quantitative studies on the synanthropic avifauna of Legnica and its environs. *Acta Ornithologica*. 1970;12(9):293–392.
4. Tomiałojć L. Zmiany awifauny lęgowej w dwóch parkach Legnicy po 40 latach. *Notatki Ornitologiczne*. 2007;48(4):232–245.
5. Tomiałojć L, Profus P. Comparative analysis of breeding bird communities in two parks of Wrocław and in adjacent Quercus-Carpinetum forest. *Acta Ornithologica*. 1977;16(4):117–177.
6. Abs M, Bergen F. A long term survey of the avifauna in an urban park. In: Marzluff JM, Shulenberger E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, et al., editors. *Urban ecology: an international perspective on the interaction between humans and nature*. New York: Springer; 2008. p. 373–376. DOI: 10.1007/978-0-387-73412-5\_24.
7. Сахвон ВВ, Домбровский ВЧ. Многолетняя динамика населения гнездящихся птиц на территории памятника природы республиканского значения «Дубрава» (Минск). *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018;3:48–54.
8. Biaduń W. The breeding avifauna of the parks and cemeteries of Lublin (SE Poland). *Acta Ornithologica*. 1994;29(1):1–13.
9. Tomiałojć L. Breeding bird densities in some urban versus non-urban habitats: the Dijon case. *Acta Ornithologica*. 1998;33(3–4):159–171.
10. Бокотей АА. Гніздова орнітофауна міста Львова та основні причини її змін (за результатами складання гніздових атласів птахів у 1994–1995 та 2005–2007 рр.). *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2008;23:17–25.
11. Морозов НС. Птицы городских лесопарков как объект синэкологических исследований: наблюдаются ли обеднение видового состава и компенсация плотностью? В: Бабенко АБ, Матвеева НВ, Макарова ОЛ, Головач СИ, редакторы. *Виды и сообщества в экстремальных условиях. Сборник, посвященный 75-летию академика Юрия Ивановича Чернова*. Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2009. с. 429–486. Совместное издание с PENSOFT.
12. Biaduń W, Żmihorski M. Factors shaping a breeding bird community along an urbanization gradient: 26-year study in medium size city (Lublin, SE Poland). *Polish Journal of Ecology*. 2011;59(2):381–389.
13. Albrycht M, Ciach M. Changes in the breeding avifauna of the Rakowice Cemetery in Krakow over last 40 years. *Ornis Polonica*. 2013;54(4):247–256.
14. Ferenc M, Sedláček O, Fuchs R, Dinetti M, Fraissinet M, Storch D. Are cities different? Patterns of species richness and beta diversity of urban bird communities and regional species assemblages in Europe. *Global Ecology and Biogeography*. 2014;23(4):479–489. DOI: 10.1111/geb.12130.
15. Hagen EO, Hagen O, Ibáñez-Álamo JD, Petchey OL, Evans KL. Impacts of urban areas and their characteristics on avian functional diversity. *Frontiers in Ecology and Evolution* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 15];5:84. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2017.00084/pdf>. DOI: 10.3389/fevo.2017.00084.

16. Clergeau P, Croci S, Jokimäki J, Kaisanlahti-Jokimäki M-L, Dinetti M. Avifauna homogenisation by urbanisation: analysis at different European latitudes. *Biological Conservation*. 2006;127(3):336–344. DOI: 10.1016/j.biocon.2005.06.035.
17. Caula SA, Sirami C, Marty P, Martin J-L. Value of an urban habitat for the native Mediterranean avifauna. *Urban Ecosystems*. 2010;13(1):73–89. DOI: 10.1007/s11252-009-0104-0.
18. Бибби К, Джонс М, Марсден С. *Методы полевых экспедиционных исследований. Исследования и учеты птиц*. Москва: Союз охраны птиц России; 2000. 186 с.
19. Tomiałojć L. The combined version of mapping method. In: Oelke H, editor. *Bird census work and nature conservation. Proceedings of the VI International conference on bird census work, University Göttingen; 1979 September 24–28; Göttingen, Germany*. Göttingen: Dachverband Deutscher Avifaunisten; 1980. p. 92–106.
20. Титок ВВ, Решетников ВН, редакторы. *Центральный ботанический сад НАН Беларуси: сохранение, изучение и использование биоразнообразия мировой флоры*. Минск: Беларуская навука; 2012. 345 с.
21. Сахвон ВВ. Плотность гнездования и особенности пространственного распределения сороки (*Pica pica*) в городе Минске. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*. 2016;11(2):286–290.
22. Сахвон ВВ. История формирования и особенности пространственного распределения синурбизированной популяции серой вороны (*Corvus cornix*) в г. Минске (Беларусь). *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. 2018;1:26–30.
23. Tomiałojć L. The urban population of the woodpigeon *Columba palumbus* Linnaeus, 1758 in Europe – its origin, increase and distribution. *Acta Zoologica Cracoviensia*. 1976;21(18):585–632.
24. Luniak M. Synurbization – adaptation of animal wildlife to urban development. In: Shaw WW, Harris LK, Vandruuff L, editors. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International symposium on urban wildlife conservation; 1999 May 1–5; Tucson, USA*. Tucson: University of Arizona; 2004. p. 50–55.

## References

1. Fernández-Juricic E, Jokimäki J. A habitat island approach to conserving birds in urban landscapes: case studies from southern and northern Europe. *Biodiversity & Conservation*. 2001;10(12):2023–2043. DOI: 10.1023/A:1013133308987.
2. Caula S, de Villalobos AE, Marty P. Seasonal dynamics of bird communities in urban forests of a Mediterranean city (Montpellier, Southern France). *Urban Ecosystems*. 2014;17(1):11–26. DOI: 10.1007/s11252-013-0295-2.
3. Tomiałojć L. Quantitative studies on the synanthropic avifauna of Legnica and its environs. *Acta Ornithologica*. 1970;12(9):293–392.
4. Tomiałojć L. Zmiany awifauny lęgowej w dwóch parkach Legnicy po 40 latach. *Notatki Ornitologiczne*. 2007;48(4):232–245.
5. Tomiałojć L, Profus P. Comparative analysis of breeding bird communities in two parks of Wrocław and in adjacent Quercocarpinetum forest. *Acta Ornithologica*. 1977;16(4):117–177.
6. Abs M, Bergen F. A long term survey of the avifauna in an urban park. In: Marzluff JM, Shulenberg E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, et al., editors. *Urban ecology: an international perspective on the interaction between humans and nature*. New York: Springer; 2008. p. 373–376. DOI: 10.1007/978-0-387-73412-5\_24.
7. Sakhvon VV, Dombrovski VCh. Interannual dynamics of breeding bird assemblage within the republican natural monument «Dubrava» (Minsk). *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2018;3:48–54. Russian.
8. Biaduń W. The breeding avifauna of the parks and cemeteries of Lublin (SE Poland). *Acta Ornithologica*. 1994;29(1):1–13.
9. Tomiałojć L. Breeding bird densities in some urban versus non-urban habitats: the Dijon case. *Acta Ornithologica*. 1998;33(3–4):159–171.
10. Bokotey AA. Changes in breeding avifauna of Lviv City and their causes (basing on the results of compiling the ornithological atlases in 1994–1995 and 2005–2007). *Scientific Bulletin of the Uzhgorod University. Series: Biology*. 2008;23:17–25. Ukrainian.
11. Morozov NS. Birds of urban woodlands as an object for synecological studies: do species impoverishment and density compensation occur? In: Babenko AB, Matveeva NV, Makarova OL, Golovach SI, editors. *Species and communities in extreme environments. Festschrift towards the 75<sup>th</sup> anniversary and a laudation in honour of academician Yuri Ivanovich Chernov*. Moscow: KMK Scientific Press; 2009. p. 429–486. Co-published by the PENSOFT. Russian.
12. Biaduń W, Żmihorski M. Factors shaping a breeding bird community along an urbanization gradient: 26-year study in medium size city (Lublin, SE Poland). *Polish Journal of Ecology*. 2011;59(2):381–389.
13. Albrycht M, Ciach M. Changes in the breeding avifauna of the Rakowice Cemetery in Krakow over last 40 years. *Ornis Polonica*. 2013;54(4):247–256.
14. Ferenc M, Sedláček O, Fuchs R, Dinetti M, Fraissinet M, Storch D. Are cities different? Patterns of species richness and beta diversity of urban bird communities and regional species assemblages in Europe. *Global Ecology and Biogeography*. 2014;23(4):479–489. DOI: 10.1111/geb.12130.
15. Hagen EO, Hagen O, Ibáñez-Álamo JD, Petchey OL, Evans KL. Impacts of urban areas and their characteristics on avian functional diversity. *Frontiers in Ecology and Evolution* [Internet]. 2017 [cited 2020 April 15];5:84. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2017.00084/pdf>. DOI: 10.3389/fevo.2017.00084.
16. Clergeau P, Croci S, Jokimäki J, Kaisanlahti-Jokimäki M-L, Dinetti M. Avifauna homogenisation by urbanisation: analysis at different European latitudes. *Biological Conservation*. 2006;127(3):336–344. DOI: 10.1016/j.biocon.2005.06.035.
17. Caula SA, Sirami C, Marty P, Martin J-L. Value of an urban habitat for the native Mediterranean avifauna. *Urban Ecosystems*. 2010;13(1):73–89. DOI: 10.1007/s11252-009-0104-0.
18. Bibby C, Jones M, Marsden S. *Expedition field techniques. Bird surveys*. London: Expedition Advisory Centre, Royal Geographical Society; 1998. 137 p.  
Russian edition: Bibby C, Jones M, Marsden S. *Методы полевых экспедиционных исследований. Исследования и учеты птиц*. Moscow: Soyuz okhrany ptits Rossii; 2000. 186 p.
19. Tomiałojć L. The combined version of mapping method. In: Oelke H, editor. *Bird census work and nature conservation. Proceedings of the VI International conference on bird census work, University Göttingen; 1979 September 24–28; Göttingen, Germany*. Göttingen: Dachverband Deutscher Avifaunisten; 1980. p. 92–106.

20. Titok VV, Reshetnikov VN, editors. *Tsentral'nyi botanicheskiy sad NAN Belarusi: sokhranenie, izuchenie i ispol'zovanie bio-raznoobraziya mirovoi flory* [The Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus: conservation, study and use of the world flora biodiversity]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2012. 345 p. Russian.

21. Sakhvon VV. Breeding density and distribution of Magpie (*Pica pica*) in Minsk. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funkcionirovaniya biosistem*. 2016;11(2):286–290. Russian.

22. Sakhvon VV. Development and distribution of synurbic population of Hooded Crow (*Corvus cornix*) in the city of Minsk (Belarus). *Vesnik Vicebskaga dzjarzhavnaga vniversitjeta*. 2018;1:26–30. Russian.

23. Tomiałojć L. The urban population of the woodpigeon *Columba palumbus* Linnaeus, 1758 in Europe – its origin, increase and distribution. *Acta Zoologica Cracoviensia*. 1976;21(18):585–632.

24. Luniak M. Synurbization – adaptation of animal wildlife to urban development. In: Shaw WW, Harris LK, Vandruff L, editors. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International symposium on urban wildlife conservation; 1999 May 1–5; Tucson, USA*. Tucson: University of Arizona; 2004. p. 50–55.

Статья поступила в редакцию 18.04.2020.  
Received by editorial board 18.04.2020.

УДК 595.763(476.5)

## ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ЖУЖЕЛИЦ (COLEOPTERA, CARABIDAE) УЧАСТКОВ ЛУГОВЫХ БИОЦЕНОЗОВ С ЗАСОРЕНИЕМ И БЕЗ ЗАСОРЕНИЯ БОРЩЕВИКОМ СОСНОВСКОГО (*HERACLEUM SOSNOWSKYI*)

Е. С. ПЛИСКЕВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Витебский государственный университет им. П. М. Машерова,  
пр. Московский, 33, 210038, г. Витебск, Беларусь

В результате проведенного в 2018 г. в Ушачском районе Витебской области (Белорусское Поозерье) исследования в составе карабидокомплексов участков луговых биоценозов с засорением инвазивным борщевиком Сосновского выявлен 41 вид жужелиц из 23 родов, тогда как на участках без засорения борщевиком зарегистрированы 38 видов из 21 рода. Виды *Notiophilus biguttatus* (Fabricius, 1779), *Dyschiriodes globosus* (Herbst, 1784), *Bembidion quadrimaculatum* (Linnaeus, 1761), *Pterostichus oblongopunctatus* (Fabricius, 1787), *P. minor* (Gyllenhal, 1827), *P. nigrita* (Paykull, 1790), *Platynus assimilis* (Paykull, 1790), *P. krynickii* (Sperk, 1835), *Bradycellus caucasicus* (Chaudoir, 1846), *Ophonus laticollis* (Mannerheim, 1825), *Harpalus latus* (Linnaeus, 1758), *H. progrediens* (Schauberger, 1922), *Badister bullatus* (Schränk, 1798) были отмечены только на участках с засорением борщевиком. Видовое богатство и значение индекса биоразнообразия карабидокомплексов участков лугового биоценоза, засоренных борщевиком, были выше, чем аналогичные параметры карабидокомплексов участков без борщевика. В условиях зарослей инвазивного борщевика в составе карабидокомплексов доминировали стратобионты-скважники (относительное обилие – 28,57 %), высока была доля участия эвритопных (6 видов, 20,37 %) и лесных (7 видов, 12,01 %) при сравнительно низкой доле участия луговых (3 вида, 1,37 %) видов. Для карабидокомплексов участков биоценоза с засорением борщевиком отмечена высокая доля участия мезофилов (19 видов, 52,44 %) на фоне низкой доли участия мезогигрофилов (9 видов, 37,69 %).

**Ключевые слова:** видовое богатство; Белорусское Поозерье; стратобионты-скважники; эвритопные виды; лесные виды.

## FEATURES OF GROUND BEETLE (COLEOPTERA, CARABIDAE) ASSEMBLAGES IN AREAS OF MEADOW BIOCECENOSIS WITH AND WITHOUT SOSNOVSKY'S HOGWEED (*HERACLEUM SOSNOWSKYI*)

E. S. PLISKEVICH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Vitebsk State University named after P. M. Masherov, 33 Maskoŭski Avenue, Viciebsk 210038, Belarus

As a result of a study conducted in 2018, 41 species of ground beetles from 23 genera were identified in the Ushachsky District of the Vitebsk Region (Belarusian Lakeland) as a part of ground beetle assemblages of meadow biocenosis with clogging by the invasive Sosnovsky's hogweed, whereas without clogging with hogweed 38 species from 21 genera were

### Образец цитирования:

Плискевич Е.С. Особенности комплексов жужелиц (Coleoptera, Carabidae) участков луговых биоценозов с засорением и без засорения борщевиком Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*). Журнал Белорусского государственного университета. Биология. 2020;2:75–83.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-75-83>

### For citation:

Pliskevich ES. Features of ground beetle (Coleoptera, Carabidae) assemblages in areas of meadow biocenosis with and without Sosnovsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*). Journal of the Belarusian State University. Biology. 2020;2:75–83. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-75-83>

### Автор:

**Елена Сергеевна Плискевич** – кандидат биологических наук; доцент кафедры зоологии биологического факультета.

### Author:

**Elena S. Pliskevich**, PhD (biology); associate professor at the department of zoology, faculty of biology.  
[pliskevich.lena@yandex.by](mailto:pliskevich.lena@yandex.by)

identified. Species *Notiophilus biguttatus* (Fabricius, 1779), *Dyschiriodes globosus* (Herbst, 1784), *Bembidion quadrimaculatum* (Linnaeus, 1761), *Pterostichus oblongopunctatus* (Fabricius, 1787), *P. minor* (Gyllenhal, 1827), *P. nigrita* (Paykull, 1790), *Platynus assimilis* (Paykull, 1790), *P. krynickii* (Sperk, 1835), *Bradycellus caucasicus* (Chaudoir, 1846), *Ophonus laticollis* (Mannerheim, 1825), *Harpalus latus* (Linnaeus, 1758), *H. progrediens* (Schauberger, 1922), *Badister bullatus* (Schränk, 1798) were recorded only in the biocenosis with clogging with hogweed. The species richness and the value of the biodiversity index of the ground beetle assemblages of the meadow biocenosis with clogging with hogweed were higher than these parameters of the ground beetle assemblages of the meadow biocenosis without hogweed. In the conditions of invasive hogweed thickets stratobionts boreholes dominated in the ground beetle assemblages (relative abundance 28.57 %), the participation of eurytopic (6 species, 20.37 %) and forest species (7 species, 12.01 %) was high, with a decrease in the share of participation meadow species (3 species, 1.37 %). For the biocenosis littered with hogweed, a high proportion of mesophiles (19 species, 52.44 %) was observed, against the background of a low proportion of mesogrophils (9 species, 37.69 %).

**Keywords:** species richness; Belarusian Lakeland; stratobionts boreholes; eurytopic species; forest species.

## Введение

В настоящее время распространение борщевиков рода *Heracleum* L. на территории Беларуси оказывает негативное воздействие на экологию, экономику и здоровье людей. Представители данного рода характеризуются отсутствием резкой морфологической дифференциации, наличием промежуточных форм, а также легкостью скрещивания между собой и образованием спонтанных гибридов [1]. На территории Беларуси произрастают аборигенные виды этих растений, в частности борщевик обыкновенный (*H. sphondylium* L.), к таковым, вероятно, может быть отнесен и борщевик сибирский (*H. sibiricum* L.) [2]. Кроме них, отмечены чужеродные виды, проходившие испытания в целях интродукции: борщевик Сосновского (*H. sosnowskyi* Manden.), борщевик Мантегацци (*H. mantegazzianum* Somm. et Levier), борщевик Лемана (*H. lehmannianum* Bunge), борщевик шероховато-окаймленный (*H. trachyloma* Fisch. et Mey.), борщевик персидский (*H. persicum* Desf.), однако достоверные данные о соотношении и составе этих инвазивных видов в природных группировках Беларуси отсутствуют [2].

Борщевик Сосновского (*H. sosnowskyi*) является наиболее конкурентоспособным и агрессивным видом гигантских борщевиков, в результате его расселения вытесняются аборигенные растения, что негативно влияет на биоразнообразие экосистем [3]. Выделяемые борщевиком ядовитые вещества угнетают другие растения, это ведет к уменьшению видового разнообразия, изменению флористического состава фитоценоза и нарушению устойчивости экосистемы. Невозможность осуществления полного контроля за размножением и распространением борщевика Сосновского приводит к быстрому захвату им новых территорий, частичной или полной трансформации естественных фитоценозов [1]. Моносообщества борщевика Сосновского вызывают изменение соотношения эколого-трофических групп микроорганизмов в почвах под ними, а также усиливают минерализационные процессы и увеличивают степень олиготрофности почв. Средообразующей активностью корневых экссудатов борщевика Сосновского объясняется рост количества грибных пропагул [4].

В Беларуси наибольшее количество земель, засоренных борщевиком, сосредоточено в Витебской области, где в настоящий момент проводится установление площади распространения инвазивных видов борщевиков с применением GPS-навигации и ГИС-технологий [5; 6]. Расселение борщевика на территории области приводит к частичной или полной трансформации фитоценозов, которые являются местообитанием для многочисленных видов беспозвоночных. Вероятно, это способствует формированию новых сообществ растений и герпетобионтов. Для выявления изменений условий окружающей среды как индикаторная группа среди беспозвоночных животных используются представители семейства жужелиц (Coleoptera, Carabidae), характеризующиеся способностью быстро реагировать на различные антропогенные и природные воздействия [7–9].

Согласно вышеизложенному, на наш взгляд, актуальным является рассмотрение на примере жужелиц особенностей состава комплексов герпетобионтов в специфических условиях моносообществ борщевика. Цель данной работы – установление особенностей видового состава карабидокомплексов участков зарослей инвазивного борщевика Сосновского на территории Ушачского района.

## Материалы и методы исследования

Исследование выполнялось в вегетационный период 2018 г. на территории Ушачского района Витебской области в окрестностях д. Тетчи (55°13'47,11" с. ш., 28°56'6,72" в. д.,  $h = 138$  м). Местом для его проведения стали некогда земли сельскохозяйственного пользования, в настоящий момент заросшие борщевиком (3 участка). В качестве контроля за пределами биоценоза, засоренного борщевиком, были выбраны многовидовые луговые сообщества (3 участка). В составе растительности всех засоренных

борщевиком участков (УБ) преобладали борщевик Сосновского (2–3 экз. на 1 м<sup>2</sup>), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.). На контрольных участках (УК) отмечены полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris* L.), болиголов пятнистый (*Conium maculatum* L.), лютик едкий (*Ranunculus acris* L.), тысячелистник (*Achillea* sp.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) (участок № 1); болиголов пятнистый (*Conium maculatum* L.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.) (участок № 2); ежевика (*Rubus* sp.), сныть обыкновенная (*Artemisia podagraria* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), болиголов пятнистый (*Conium maculatum* L.), клевер (*Trifolium* L.) (участок № 3).

Для сбора материала применялись почвенные ловушки Барбера (фиксирующая жидкость – 9 % раствор уксусной кислоты), которые размещались в количестве 10 шт. на изучаемый участок.

Оценка альфа-разнообразия карабидокомплексов луговых биоценозов и моносообществ борщевика выполнялась с использованием индексов Симпсона (*D*) и Шеннона – Винера (*H'*). Для сравнения карабидокомплексов рассматриваемых биоценозов применен непараметрический тест ANOSIM (анализ сходств), предназначенный для сопоставления данных о таксонах в выборках [10], и анализ соответствия (CA) [11].

При описании структуры доминирования использовалась шкала Ренконена [12], предусматривающая выделение следующих групп: виды-доминанты (обилие свыше 5,00 %), субдоминанты (2,01–5,00 %), рецеденты (1,01–2,00 %) и субрецеденты (менее 1 %). Установление типов ареалов жуужелиц выполнялось на основе схемы Городкова [13] и классификации Солодовникова [14]. Для проведения ареалогического анализа использованы данные издания «Каталог палеарктических жуков» [15]. Типы жизненных форм и экологической приуроченности жуужелиц приведены согласно работам И. Х. Шаровой [16] и И. А. Солодовникова [14]. Определение и подтверждение определений видов жуужелиц осуществлял И. А. Солодовников (Витебский государственный университет имени П. М. Машерова), за что автор ему очень признательна.

## Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного исследования в изучаемых биоценозах был выявлен 51 вид жуужелиц из 25 родов, общий объем сборов – 1462 экз. (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Видовой состав, обилие и зооценотическая характеристика карабидокомплексов участков луговых биоценозов (УК – без борщевика, УБ – засоренный борщевиком)

Table 1

Species composition, abundance and zoocenotic characteristics of ground beetle assemblages in meadow biocenosis (УК – plot without hogweed, УБ – plot with hogweed)

| Вид   | Обилие, % |       | Зооценотическая характеристика |                 |                 |                 |
|---|-----------|-------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|   | УК        | УБ    | Ареал <sup>1</sup>             | ЖФ <sup>2</sup> | БП <sup>3</sup> | ГП <sup>4</sup> |
| <i>Leistus terminatus</i> (Hellwig, 1793)       | 0,75      | 1,98  | зцП                            | Ссп             | Э               | м               |
| <i>Notiophilus palustris</i> (Duftschmid, 1812) | 1,62      | 3,19  | зцП                            | Сспп            | Лс              | м               |
| <i>N. biguttatus</i> (Fabricius, 1779)          | 0         | 0,15  | зП                             | Сспп            | Лс              | м               |
| <i>Carabus granulatus</i> (Linnaeus, 1758)      | 11,44     | 9,27  | ТП                             | Эпх             | ЛсБн            | мг              |
| <i>C. cancellatus</i> (Illiger, 1798)           | 16,92     | 17,63 | ЕС                             | Эпх             | Э               | м               |
| <i>Cychrus caraboides</i> (Linnaeus, 1758)      | 0,12      | 0     | ЕзС                            | Эпх             | Лс              | м               |
| <i>Loricera pilicornis</i> (Fabricius, 1775)    | 0,50      | 0,46  | Ц                              | Сспп            | ЛсБн            | г               |
| <i>Clivina fossor</i> (Linnaeus, 1758)          | 0,25      | 0,15  | Ц                              | Гр              | Э               | м               |
| <i>Dyschiriodes globosus</i> (Herbst, 1784)     | 0         | 0,15  | ТП                             | Гр              | Э               | мг              |
| <i>Epaphius secalis</i> (Paykull, 1790)         | 2,61      | 3,34  | зП                             | Ссп             | Лс              | м               |
| <i>Asaphidion flavipes</i> (Linnaeus, 1761)     | 0,62      | 0,61  | ЕКаз                           | Эпб             | ЛсЛ             | мг              |
| <i>Bembidion lampros</i> (Herbst, 1784)         | 0,37      | 0     | Ц                              | Сспп            | ЛсЛ             | мк              |
| <i>B. biguttatum</i> (Fabricius, 1779)          | 0,12      | 0     | зП                             | Сспп            | ПрБ             | г               |
| <i>B. guttula</i> (Fabricius, 1792)             | 0,25      | 0     | зцП                            | Сспп            | ЛБ              | г               |
| <i>B. quadrimaculatum</i> (Linnaeus, 1761)      | 0         | 0,30  | Ц                              | Сспп            | Э               | м               |

Окончание табл. 1  
Ending table 1

| Вид  | Обилие, % |       | Зооценотическая характеристика |                 |                 |                 |
|--|-----------|-------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | УК        | УБ    | Ареал <sup>1</sup>             | ЖФ <sup>2</sup> | БП <sup>3</sup> | ГП <sup>4</sup> |
| <i>B. tenellum</i> (Erichson, 1837)            | 0,25      | 0     | зцП                            | Сспп            | Пр              | г               |
| <i>Patrobus atrorufus</i> (Ström, 1768)        | 0,12      | 0,15  | зП                             | Ссп             | ЛсБн            | г               |
| <i>Stomis pumicatus</i> (Panzer, 1796)         | 0,50      | 1,06  | ЕК                             | Ссп             | ЛсЛ             | м               |
| <i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus, 1758)       | 0,12      | 0     | зцП                            | Сзпп            | ЛП              | м               |
| <i>P. versicolor</i> (Sturm, 1824)             | 4,35      | 3,04  | ТП                             | Сзпп            | ЛП              | м               |
| <i>Pterostichus vernalis</i> (Panzer, 1796)    | 3,48      | 2,28  | зцП                            | Сспп            | ЛБ              | мг              |
| <i>P. oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)   | 0         | 0,61  | зП                             | Сзпп            | Лс              | м               |
| <i>P. niger</i> (Schaller, 1783)               | 31,22     | 18,69 | ТП                             | Сзпп            | ЛсЛ             | мг              |
| <i>P. melanarius</i> (Illiger, 1798)           | 14,43     | 16,87 | зП                             | Сзпп            | ЛсЛ             | м               |
| <i>P. anthracinus</i> (Illiger, 1798)          | 0,12      | 0,61  | ЕС                             | Сзпп            | Пр              | г               |
| <i>P. minor</i> (Gyllenhal, 1827)              | 0         | 0,15  | зП                             | Ссп             | ПрБ             | г               |
| <i>P. nigrata</i> (Paykull, 1790)              | 0         | 0,15  | ТП                             | Сзпп            | Э               | мг              |
| <i>P. strenuus</i> (Panzer, 1797)              | 1,37      | 3,04  | ТП                             | Ссп             | Лс              | мг              |
| <i>Agonum gracilipes</i> (Duftschmid, 1812)    | 0,12      | 0     | ТП                             | Сспп            | ЛБ              | г               |
| <i>A. marginatum</i> (Linnaeus, 1758)          | 0,12      | 0,15  | ЕК                             | Сспп            | Пр              | г               |
| <i>A. fuliginosum</i> (Panzer, 1809)           | 0,12      | 0,46  | ТП                             | Ссп             | ЛБ              | г               |
| <i>A. thoreyi</i> (Dejean, 1828)               | 0,12      | 0,61  | Ц                              | Ссп             | ЛБ              | г               |
| <i>Platynus assimilis</i> (Paykull, 1790)      | 0         | 1,52  | ТП                             | Ссп             | ЛсБн            | мк              |
| <i>P. krynickii</i> (Sperk, 1835)              | 0         | 0,46  | ЕС                             | Ссп             | ЛсБн            | г               |
| <i>Anchomenus dorsalis</i> (Pontoppidan, 1763) | 0,62      | 1,98  | ТП                             | Сспп            | ЛП              | мг              |
| <i>Oxypselaphus obscurus</i> (Herbst, 1784)    | 0,50      | 3,50  | Ц                              | Ссп             | ЛсЛ             | г               |
| <i>Amara communis</i> (Panzer, 1797)           | 1,37      | 0,61  | ТП                             | Гг              | ЛсЛ             | м               |
| <i>A. convexior</i> (Stephens, 1828)           | 0,12      | 0,15  | ЕС                             | Гг              | ЛП              | м               |
| <i>A. nitida</i> (Sturm, 1825)                 | 0,12      | 0     | ТП                             | Гг              | ЛсЛ             | мк              |
| <i>A. aulica</i> (Panzer, 1797)                | 0,37      | 0     | зцП                            | Гг              | Л               | мк              |
| <i>A. gebleri</i> (Dejean, 1831)               | 0,12      | 0,30  | ЕС                             | Гг              | ЛсЛ             | мк              |
| <i>Bradycellus caucasicus</i> (Chaudoir, 1846) | 0         | 0,15  | зцП                            | Сбс             | ЛсЛ             | м               |
| <i>Ophonus rufibarbis</i> (Fabricius, 1792)    | 2,99      | 0,91  | зП                             | Схб             | Л               | м               |
| <i>O. laticollis</i> (Mannerheim, 1825)        | 0         | 1,22  | зП                             | Схб             | ЛП              | мк              |
| <i>Harpalus latus</i> (Linnaeus, 1758)         | 0         | 0,15  | ТП                             | Гг              | Лс              | м               |
| <i>H. progrediens</i> (Schauberger, 1922)      | 0         | 0,15  | ЕС                             | Гг              | ЛП              | м               |
| <i>Panagaeus cruxmajor</i> (Linnaeus, 1758)    | 0,12      | 0     | ЕС                             | Эпб             | ПрЛ             | г               |
| <i>Oodes helopioides</i> (Fabricius, 1792)     | 0,37      | 0,30  | зП                             | Сспп            | ЛБ              | г               |
| <i>Badister bullatus</i> (Schrank, 1798)       | 0         | 0,46  | ТП                             | Ссп             | Л               | м               |
| <i>B. lacertosus</i> (Sturm, 1815)             | 0,25      | 1,52  | ТП                             | Ссп             | Лс              | м               |
| <i>B. sodalis</i> (Duftschmid, 1812)           | 1,00      | 1,52  | зП                             | Ссп             | ЛсБн            | мг              |

Примечание. <sup>1</sup> – зоогеографическая характеристика (тип ареала): Ц – циркумареал, ТП – транспалеарктический, Е – европейский, К – кавказский, ЕКаз – евро-казахстанский, П – палеарктический, С – сибирский, з – западный, ц – центральный; <sup>2</sup> – жизненная форма имаго: 1-й класс (зоофаги): Эпб – эпигеобионты бегающие, Эпх – эпигеобионты ходящие, Гр – геобионты роющие, Ссп – стратобионты-скважники подстилочные, Сспп – стратобионты-скважники поверхностно-подстилочные, Сзпп – стратобионты зарывающиеся подстилично-почвенные; 2-й класс (миксофитофаги): Гг – геохортобионты гарпалоидные, Схб – стратохортобионты, Сбс – стратобионты-скважники; <sup>3</sup> – биотопическая приуроченность: Б – болотный, Л – луговой, Лс – лесной, П – полевой, Пр – прибрежный, Э – эвритопный, н – низинный; <sup>4</sup> – отношение к влажности: г – гигрофил, мг – мезогигрофил, м – мезофил, мк – мезоксерофил, к – ксерофил.

Таблица 2

Основные параметры биоразнообразия карабидокомплексов  
 участков луговых биоценозов (УК – без борщевика, УБ – засоренный борщевиком)

Table 2

The main biodiversity parameters of ground beetle assemblages  
 in meadow biocenosis (УК – plot without hogweed, УБ – plot with hogweed)

| Параметры   | УК    | УБ    |
|---|-------|-------|
| Число экземпляров   | 804   | 658   |
| Число видов   | 38    | 41    |
| Число видов, представленных 1–2 экз.  | 17    | 14    |
| Относительное число видов (%),<br>представленных 1–2 экз.                       | 44,74 | 34,15 |
| Число видов-доминантов (обилие свыше 5 %)                                       | 4     | 4     |
| Относительное количество экземпляров (%)<br>видов-доминантов (обилие свыше 5 %) | 74,00 | 62,46 |
| Индекс Шеннона – Винера ( $H'$ )  | 1,828 | 2,153 |
| Индекс Симпсона ( $D$ )   | 0,232 | 0,161 |

Наибольшее число видов (41) зарегистрировано для участков биоценоза, засоренных борщевиком, в отсутствие засорения выявлено чуть меньшее количество видов (38). В обоих биоценозах отмечено преобладание по числу видов рода *Pterostichus* (УК – 5 видов, УБ – 8 видов). На участках без борщевика наибольшим видовым богатством характеризовались роды *Amara* (5 видов), *Bembidion* (4 вида), *Agonum* (4 вида). Только здесь обнаружены такие виды, как *Cychrus caraboides*, *Bembidion lampros*, *B. biguttatum*, *B. guttula*, *B. tenellum*, *Poecilus cupreus*, *Agonum gracilipes*, *Amara nitida*, *A. aulica*, *Pannagaeus cruxmajor*. Для участков биоценоза, засоренных борщевиком, отмечены следующие виды, не выявленные на незасоренных: *Notiophilus biguttatus*, *Dyschiriodes globosus*, *Bembidion quadrimaculatum*, *Pterostichus oblongopunctatus*, *P. minor*, *P. nigrita*, *Platynus assimilis*, *P. krynickii*, *Bradycellus caucasicus*, *Ophonus laticollis*, *Harpalus latus*, *H. progrediens*, *Badister bullatus*.

Количество экземпляров жуужелиц, коллектированных в биоценозе без борщевика (804 экз.), превышало количество экземпляров, собранных в биоценозе, засоренном борщевиком (658 экз.), причем почти половина выявленных видов была представлена 1–2 экз. (17 видов, 44,74 %), тогда как в биоценозе с засорением борщевиком доля видов, представленных 1–2 экз., составила лишь треть всех выявленных видов (14 видов, 34,15 %).

Видовое богатство карабидокомплексов сравниваемых биоценозов достоверно различалось (критерий Крускала – Уоллиса,  $H = 5,06$ ;  $p = 0,024$ ). Так, среднее видовое богатство выборок из биоценоза с засорением борщевиком ( $13,53 \pm 0,72$ ) превосходило таковое у лугового биоценоза без борщевика ( $10,60 \pm 0,97$ ) (рис. 1, а). Среднее значение числа экземпляров, наоборот, было выше в биоценозе без борщевика – ( $53,60 \pm 7,14$ ) экз., чем в биоценозе, засоренном борщевиком, – ( $43,87 \pm 3,28$ ) экз. (рис. 1, б).

Доминантами (обилие свыше 5 %) в луговом биоценозе без борщевика оказались такие виды, как *Pterostichus niger* (31,22 %), *P. melanarius* (14,43 %), *Carabus cancellatus* (16,92 %), *C. granulatus* (11,44 %). В данном биоценозе выявлены жуужелицы 8 групп жизненных форм. По числу видов преобладали стратобионты-скважники поверхностно-подстилочные (11 видов) и стратобионты-скважники подстилочные (10 видов). Остальные группы были представлены меньшим числом видов (рис. 2, а). Наибольшим относительным обилием отличалась группа стратобионтов зарывающихся подстильно-почвенных (50,19 %), несколько меньшую долю участия имели эпигеобионты ходящие (28,42 %). Остальные группы жизненных форм жуужелиц характеризовались малым обилием (0,25–7,82 %) (рис. 2, б).

В луговом биоценозе с засорением борщевиком доминировали те же виды жуужелиц, что и в биоценозе без борщевика: *Pterostichus niger* (18,69 %), *Carabus cancellatus* (17,63 %), *P. melanarius* (16,87 %), *C. granulatus* (9,27 %). Здесь отмечены жуужелицы 9 групп жизненных форм. По числу видов, так же как в биоценозе без борщевика, преобладали стратобионты-скважники подстилочные (14 видов) и стратобионты-скважники поверхностно-подстилочные (8 видов), остальные группы были представлены меньшим числом видов (см. рис. 2, а). Равно как и в биоценозе без борщевика, в биоценозе, засоренном борщевиком, наибольшее обилие (но с меньшей долей участия) отмечено для групп стратобионтов зарывающихся подстильно-почвенных (39,97 %) и эпигеобионтов ходящих (26,90 %), также высокой была доля стратобионтов-скважников подстилочных (19,76 %). Остальные группы характеризовались меньшим обилием (0,15–8,82 %) (см. рис. 2, б).

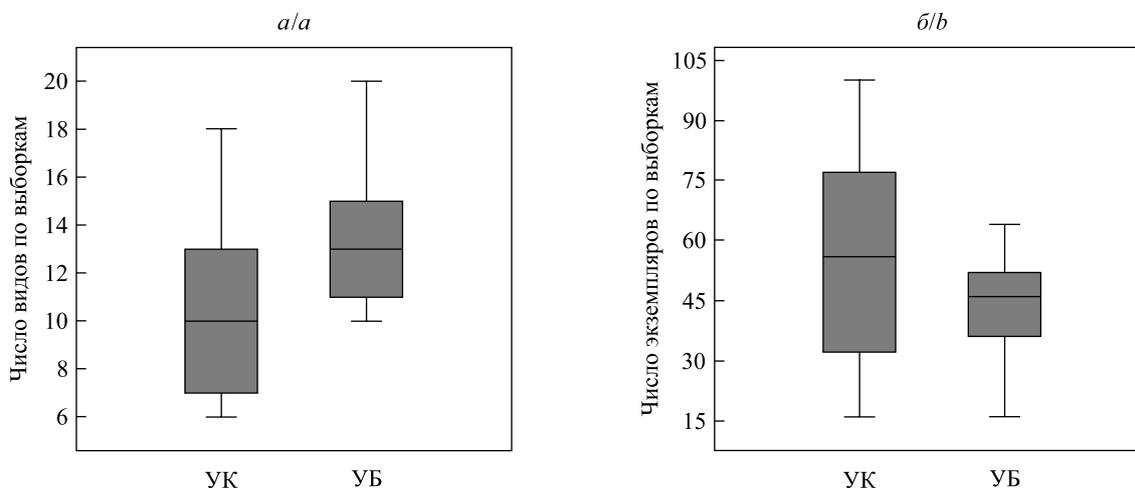


Рис. 1. Средние значения ( $\pm$ SE) видового богатства (а) и числа экземпляров (б) карабидокомплексов в биоценозах (УК – без борщевика, УБ – с засорением борщевиком)

Fig. 1. Means ( $\pm$ SE) of species richness (a) and numbers of individuals (b) of ground beetle assemblages in biocenosis (УК – without hogweed, УБ – with hogweed)

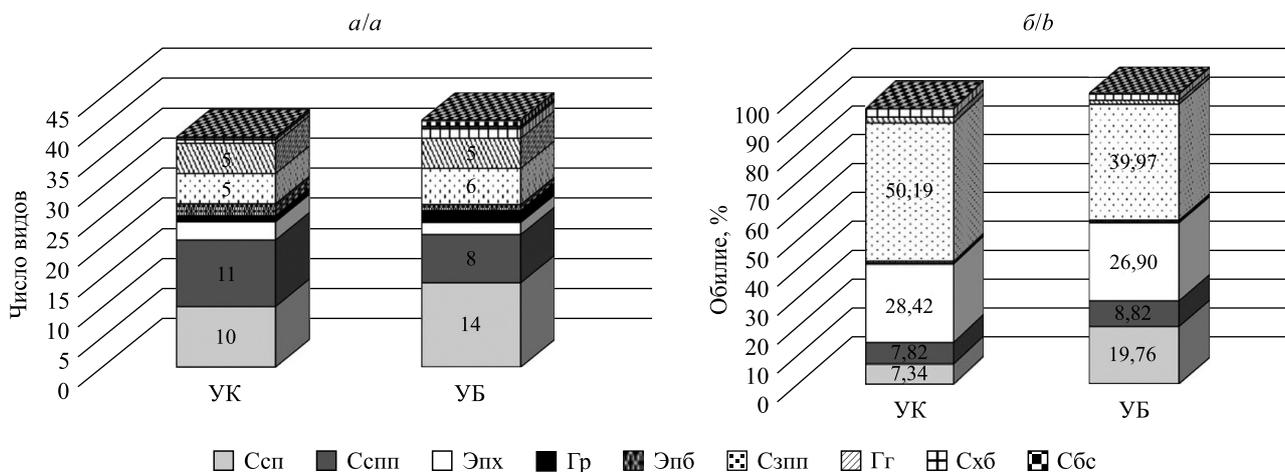


Рис. 2. Соотношение групп жизненных форм жуелиц по числу видов (а)

и относительному обилию (б) в биоценозах (УК – без борщевика, УБ – с засорением борщевиком)

Fig. 2. The ratio of groups of life forms of ground beetles by the number of species (a) and relative abundance (b) in biocenosis (УК – without hogweed, УБ – with hogweed)

Согласно гигропреферентуму в биоценозе без борщевика по числу видов преобладали мезофилы (14 видов) и гигрофилы (13 видов), меньшим числом видов были представлены мезогигрофилы (7 видов) и мезоксерофилы (4 вида). Наибольшим обилием характеризовались мезофилы (46,35 %) и мезогигрофилы (49,69 %). В биоценозе с засорением борщевиком по числу видов преобладали мезофилы (19 видов), в меньшем количестве были представлены гигрофилы (10 видов), мезогигрофилы (9 видов) и мезоксерофилы (3 вида). Наибольшим обилием отличались мезофилы (52,44 %) и мезогигрофилы (37,69 %).

В биоценозе без борщевика больше всего выявлено лесолуговых видов (9), другие группы были представлены меньшим числом видов (рис. 3, а). По относительному обилию также преобладали лесолуговые виды (49,20 %), высокую долю участия имели эвритопные (17,90 %) и лесо-болотно-низинные (13,02 %) виды, тогда как остальные группы характеризовались малой долей участия (0,12–5,97 %) (рис. 3, б). В биоценозе, засоренном борщевиком, наибольшим являлось число лесолуговых видов (8), в чуть меньшем количестве были представлены лесные (7), эвритопные (6) и лесо-болотно-низинные (6) виды (см. рис. 3, а). По обилию также преобладали лесолуговые виды (41,79 %), высокой долей участия отличались эвритопные (20,40 %), лесо-болотно-низинные (13,38 %) и лесные (12,01 %) виды. Остальные группы имели меньшее обилие (0,76–6,38 %) (см. рис. 3, б).

В зоогеографической структуре биоценоза без борщевика как по числу, так и по обилию преобладали транспалеарктические виды (10 видов, 50,92 %), высокой была доля участия западнопалеарктических (5 видов, 21,37 %) и евро-сибирских (5 видов, 17,38 %) видов. В биоценозе, засоренном борщевиком, и по числу, и по обилию также преобладали транспалеарктические (13 видов, 41,03 %), западнопалеарктические (10 видов, 25,23 %) и евро-сибирские (6 видов, 19,03 %) виды.

Биоразнообразие карабидокомплексов (индекс Шеннона – Винера) достоверно различалось в сравниваемых биоценозах (критерий Крускала – Уоллиса,  $H = 5,492$ ;  $p = 0,019$ ). Для биоценоза с засорением борщевиком отмечено большее среднее значение индекса ( $H' = 2,153 \pm 0,068$ ) по сравнению с луговым биоценозом без борщевика ( $H' = 1,828 \pm 0,101$ ) (рис. 4, а).

Значение индекса доминирования Симпсона для биоценоза без борщевика ( $D = 0,189 \pm 0,029$ ) превышало его величину для биоценоза с засорением борщевиком ( $D = 0,145 \pm 0,013$ ) (рис. 4, б). Значения индекса Симпсона достоверно различались в биоценозах (критерий Крускала – Уоллиса,  $H = 4,924$ ;  $p = 0,026$ ).

Видовой состав карабидокомплексов в обоих биоценозах оказался довольно схожим (тест ANOSIM,  $R = 0,056$ ;  $p = 0,069$ ) (рис. 5), но тем не менее имеются некоторые отличия в составе экологических групп.

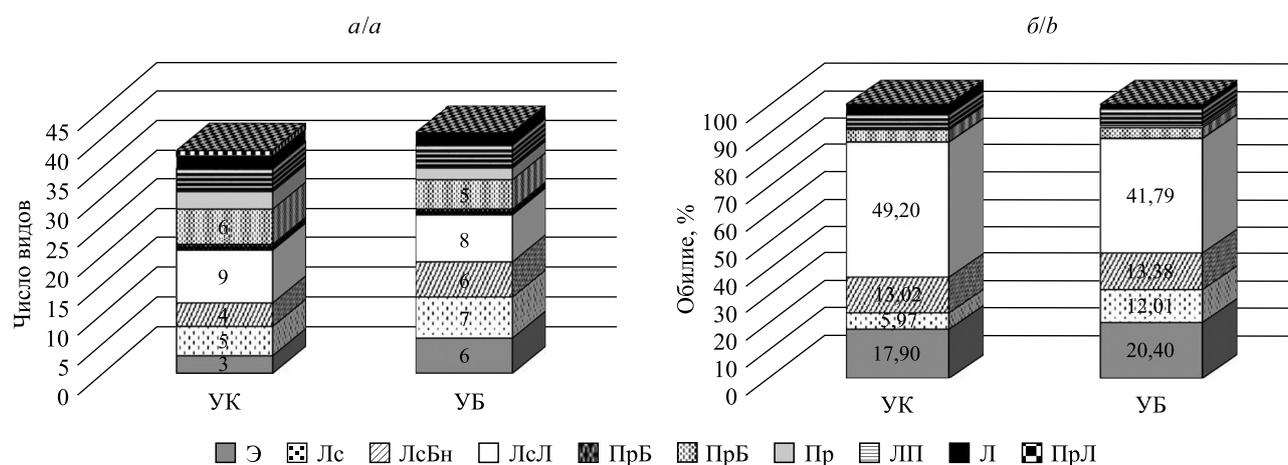


Рис. 3. Соотношение групп биотопической приуроченности жуужелиц по числу видов (а) и относительному обилию (б) в биоценозах (УК – без борщевика, УБ – с засорением борщевиком)

Fig. 3. The ratio of groups of biotopic confinement of ground beetles by the number of species (a) and relative abundance (b) in biocenosis (UK – without hogweed, УБ – with hogweed)

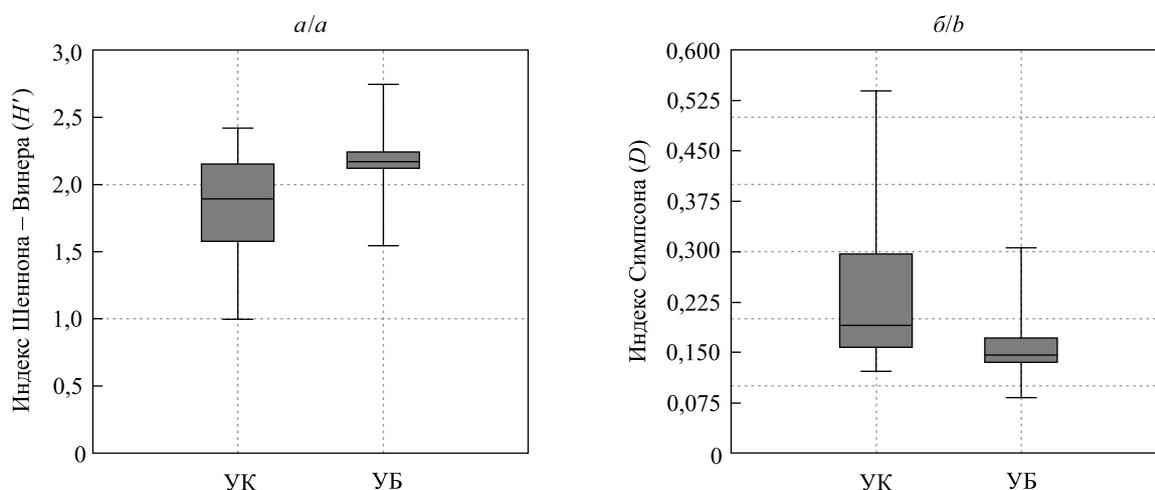


Рис. 4. Средние значения ( $\pm SE$ ) индекса Шеннона – Винера (а), индекса доминирования Симпсона (б) карабидокомплексов в биоценозах (УК – без борщевика, УБ – с засорением борщевиком)

Fig. 4. Means ( $\pm SE$ ) of the Shannon – Wiener index (a), Simpson dominance index (b) of ground beetle assemblages in biocenosis (UK – without hogweed, УБ – with hogweed)

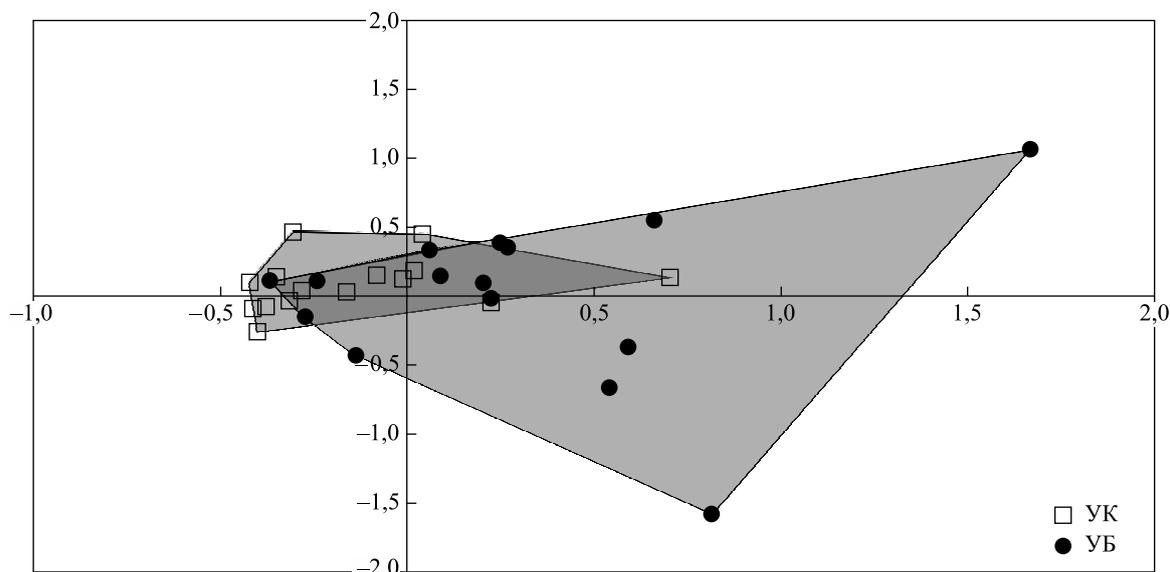


Рис. 5. Сходство видового состава карабидокомплексов в биоценозах (УК – без борщевика, УБ – с засорением борщевиком)

Fig. 5. The similarity of species composition of ground beetle assemblages in biocenosis (УК – without hogweed, УБ – with hogweed)

В частности, в составе карабидокомплекса биоценоза с засорением борщевиком по обилию преобладают стратобионты-скважники (28,57 %) за счет присутствия видов-субдоминантов: *Eraphius secalis*, *Oxypselaphus obscurus*, *Notiophilus palustris*, *Pterostichus strenuus*, *P. vernalis*. Представители этой группы обитают в верхнем рыхлом слое почвы, скважинах и трещинах в почве, подстилке из растительного опада [16], доля их участия в луговом биоценозе без борщевика была меньшей (15,16 %). Отмечены более высокие значения видового богатства (19 видов) и обилия (52,44 %) в составе карабидокомплексов группы мезофилов (предпочитают среду обитания с умеренной влажностью почвы) в биоценозе с засорением борщевиком по сравнению с луговым биоценозом без борщевика. Преобладание мезофилов в биоценозе, засоренном борщевиком, обусловлено присутствием видов доминантов и субдоминантов: *Carabus cancellatus*, *Pterostichus melanarius*, *Notiophilus palustris*, *Eraphius secalis*, *Poecilus versicolor*. Для данного биоценоза отмечена более низкая доля участия мезогигрофилов (37,69 %), предпочитающих влажноватые местообитания [17], чем для лугового биоценоза без борщевика. В биоценозе с засорением борщевиком выявлено больше эвритопных (6 видов, 20,37 %) и лесных (7 видов, 12,01 %) видов по сравнению с комплексом незасоренных участков лугового биоценоза. Для карабидокомплексов моносообществ борщевика отмечена более низкая доля участия лесолуговых (8 видов, 41,79 %) и луговых (3 вида, 1,37 %) видов, чем для незасоренных участков лугового биоценоза.

### Заключение

В результате проведенного в 2018 г. исследования установлен видовой состав карабидокомплексов участков луговых биоценозов с засорением (41 вид) и без засорения (контроль) (38 видов) борщевиком Сосновского в условиях Ушачского района Витебской области (Белорусское Поозерье). Только в составе карабидокомплексов зарослей инвазивного борщевика отмечены *Notiophilus biguttatus*, *Dyschiriodes globosus*, *Bembidion quadrimaculatum*, *Pterostichus oblongopunctatus*, *P. minor*, *P. nigrita*, *Platynus assimilis*, *P. krynickii*, *Bradycellus caucasicus*, *Ophonus laticollis*, *Harpalus latus*, *H. progrediens*, *Badister bullatus*.

Видовое богатство карабидокомплексов участков биоценоза с засорением борщевиком ( $13,53 \pm 0,72$ ) превышало видовое богатство участков лугового биоценоза без зарослей инвайдера ( $10,60 \pm 0,97$ ). Биоразнообразие (индекс Шеннона – Винера) карабидокомплексов биоценоза с засорением борщевиком ( $H' = 2,153 \pm 0,068$ ) также превосходило биоразнообразие карабидокомплексов лугового биоценоза без борщевика ( $H' = 1,828 \pm 0,101$ ).

В составе карабидокомплексов участков с зарослями инвазивного борщевика отмечено доминирование стратобионтов-скважников (относительное обилие – 28,57 %), мезофилов (19 видов, 52,44 %), эвритопных (6 видов, 20,37 %) и лесных (7 видов, 12,01 %) видов, при этом в луговом биоценозе без засорения борщевиком доля участия этих групп была ниже. В биоценозе, засоренном борщевиком, выявлена более низкая доля участия в составе карабидокомплексов мезогигрофилов (37,69 %), лесолуговых (8 видов, 41,79 %) и луговых (3 вида, 1,37 %) видов, чем в луговом биоценозе без борщевика.

## Библиографические ссылки

- Jahodová Š, Trybush S, Pyšek P, Wade M, Karp A. Invasive species of *Heracleum* in Europe: an insight into genetic relationships and invasion history. *Diversity and Distributions*. 2007;13(1):99–114. DOI: 10.1111/j.1366-9516.2006.00305.x.
- Ламан НА, Прохоров ВН, Масловский ОМ. *Гигантские борщевики – опасные инвазивные виды для природных комплексов и населения Беларуси*. Парфенов ВИ, редактор. Минск: Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси; 2009. 40 с.
- Есипенко ЛП. Биологические инвазии как глобальная экологическая проблема Юга России. *Юг России: экология, развитие*. 2012;7(4):21–25. DOI: 10.18470/1992-1098-2012-4-21-25.
- Товстик ЕВ, Широких АА, Широких ИГ. Микробиологическое состояние почв под инвазивными зарослями борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*). *Вестник современных исследований*. 2018;2:2:5–8.
- Высоцкий ЮИ. Анализ инвазии борщевика на территории Лиозненского района Витебской области. *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. 2017;4:48–53.
- Высоцкий ЮИ. Анализ распространения инвазии борщевика на территории Оршанского района Витебской области. *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. 2019;2:28–35.
- Lövei GL, Sunderland KD. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*. 1996;41:231–256. DOI: 10.1146/annurev.en.41.010196.001311.
- Hartley DJ, Koivula MJ, Spence JR, Pelletier R, Ball GE. Effects of urbanization on ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) of grassland habitats in western Canada. *Ecography*. 2007;30(5):673–684. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05199.x.
- Sushko G. Spatial distribution of epigeic beetles (Insecta, Coleoptera) in the «Yelnia» peat bog. *Baltic Journal of Coleopterology*. 2014;14(2):151–161.
- Clarke KR. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*. 1993;18(1):117–143. DOI: 10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x.
- Legendre P, Legendre L. *Numerical ecology*. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier; 1998. 853 p.
- Renkonen O. Statisch-ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore. *Annales Zoologici Societatis Zoologicae-Botanicae Fennicae Vanamo*. 1938;6:1–231.
- Городков КБ. Типы ареалов насекомых тундры и лесных зон европейской части СССР. В: *Ареалы насекомых европейской части СССР. Карты 179–221*. Ленинград: Наука; 1984. с. 3–20.
- Солодовников ИА. *Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) Белорусского Поозерья. С каталогом видов жужелиц Беларуси и сопредельных государств*. Витебск: ВГУ им. П. М. Машерова; 2008. 325 с.
- Löbl I, Löbl D, editors. *Catalogue of Palaearctic Coleoptera. Volume 1. Archostemata – Myxophaga – Adephaga*. Revised and updated edition. Leiden: Brill; 2017. XXXIV, 1443 p.
- Шарова ИХ. *Жизненные формы жужелиц (Coleoptera, Carabidae)*. Москва: Наука; 1981. 360 с.
- Бельгард АЛ. *Степное лесоведение*. Москва: Лесная промышленность; 1971. 336 с.

## References

- Jahodová Š, Trybush S, Pyšek P, Wade M, Karp A. Invasive species of *Heracleum* in Europe: an insight into genetic relationships and invasion history. *Diversity and Distributions*. 2007;13(1):99–114. DOI: 10.1111/j.1366-9516.2006.00305.x.
- Laman NA, Prokhorov VN, Maslovskii OM. *Gigantskie borshcheviki – opasnye invazivnye vidy dlya prirodnykh kompleksov i nasele-niya Belarusi* [Giant hogweed – dangerous invasive species for natural complexes and the population of Belarus]. Parfenov VI, editor. Minsk: Institute of Experimental Botany named after V. F. Kuprevich of the National Academy of Sciences of Belarus; 2009. 40 p. Russian.
- Esipenko LP. [Biological invasions as a global environmental problem in the South of Russia]. *The South of Russia: ecology, development*. 2012;7(4):21–25. Russian. DOI: 10.18470/1992-1098-2012-4-21-25.
- Tovstik EV, Shirokikh AA, Shirokikh IG. [Microbiological condition of soils under invasive thickets of Sosnowski hogweed (*Heracleum sosnowskyi*)]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018;2:2:5–8. Russian.
- Vysotski Yul. Analysis of cow-bream invasion on the territory of Liozno District of Vitebsk Region. *Vesnik Vicebskaga dzjarzhavnaga wniwersitjeta*. 2017;4:48–53. Russian.
- Vysotski Yul. Analysis of the spread of hogweed invasion on the territory of Orsha District of Vitebsk Region. *Vesnik Vicebskaga dzjarzhavnaga wniwersitjeta*. 2019;2:28–35. Russian.
- Lövei GL, Sunderland KD. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*. 1996;41:231–256. DOI: 10.1146/annurev.en.41.010196.001311.
- Hartley DJ, Koivula MJ, Spence JR, Pelletier R, Ball GE. Effects of urbanization on ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) of grassland habitats in western Canada. *Ecography*. 2007;30(5):673–684. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05199.x.
- Sushko G. Spatial distribution of epigeic beetles (Insecta, Coleoptera) in the «Yelnia» peat bog. *Baltic Journal of Coleopterology*. 2014;14(2):151–161.
- Clarke KR. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*. 1993;18(1):117–143. DOI: 10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x.
- Legendre P, Legendre L. *Numerical ecology*. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier; 1998. 853 p.
- Renkonen O. Statisch-ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore. *Annales Zoologici Societatis Zoologicae-Botanicae Fennicae Vanamo*. 1938;6:1–231.
- Gorodkov KB. Ranges types of insects of tundra and forests zones of European part of USSR. In: *Arealy nasekomykh evropeiskoi chasti SSSR. Karty 179–221* [Insect habitats of the European part of the USSR. Maps 179–221]. Leningrad: Nauka; 1984. p. 3–20. Russian.
- Solodovnikov IA. *Zhuzhelitsy (Coleoptera, Sarabidae) Belorusskogo Poozer'ya. S katalogom vidov zhuzhelitsy Belarusi i sopredel'nykh gosudarstv* [Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the Belarusian Lake District. With a catalog of species of ground beetles of Belarus and neighboring states]. Vitebsk: Vitebsk State University named after P. M. Masherov; 2008. 325 p. Russian.
- Löbl I, Löbl D, editors. *Catalogue of Palaearctic Coleoptera. Volume 1. Archostemata – Myxophaga – Adephaga*. Revised and updated edition. Leiden: Brill; 2017. XXXIV, 1443 p.
- Sharova ICh. *Life forms of carabids (Coleoptera, Carabidae)*. Moscow: Nauka; 1981. 360 p. Russian.
- Bel'gard AL. *Stepnoe lesovedenie* [Steppe forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1971. 336 p. Russian.

УДК 577.33/34;577.355;577.3.32/36

### СПОСОБНОСТЬ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИФЕНОЛОВ СНИЖАТЬ КОЛИЧЕСТВО УФС-ИНДУЦИРОВАННЫХ ОДНОЦЕПОЧЕЧНЫХ РАЗРЫВОВ ЯДЕРНОЙ ДНК В КЕРАТИНОЦИТАХ

*А. И. ПОТАПОВИЧ<sup>1)</sup>, А. АЛБУХАЙДАР<sup>1)</sup>, С. В. ГЛУШЕН<sup>1)</sup>, В. А. КОСТЮК<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*

Исследовано влияние растительных полифенольных соединений (РПС) на жизнеспособность кератиноцитов человека и количество одноцепочечных разрывов ДНК в ядрах этих клеток, подвергнутых воздействию ультрафиолетового излучения диапазона С (УФС). Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что при добавлении силибина и акацетина сразу после УФС-воздействия наряду с цитопротекторным эффектом наблюдается существенное снижение количества одноцепочечных разрывов ДНК в ядрах кератиноцитов линии HaCaT через 2 и 5 ч после облучения. Сделан вывод, что РПС способны уменьшать деструктивное воздействие ультрафиолетового излучения на клетки кожи, сокращая количество генетических повреждений.

**Ключевые слова:** УФС; РПС; одноцепочечные разрывы ДНК; ДНК-кометы; кератиноциты HaCaT.

---

#### Образец цитирования:

Потапович АИ, Албухайдар А, Глушен СВ, Костюк ВА. Способность растительных полифенолов снижать количество УФС-индуцированных одноцепочечных разрывов ядерной ДНК в кератиноцитах. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2020;2:84–89. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-84-89>

#### For citation:

Potapovich AI, Albuhaydar A, Gloushen SV, Kostyuk VA. The ability of plant polyphenols to reduce the number of UVC-induced single-stranded nuclear DNA breaks in keratinocytes. *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2020;2: 84–89. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-84-89>

---

#### Авторы:

*Алла Ивановна Потапович* – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии кафедры физиологии человека и животных биологического факультета.

*Ахмед Албухайдар* – аспирант кафедры физиологии человека и животных биологического факультета. Научный руководитель – В. А. Костюк.

*Сергей Витальевич Глушен* – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры генетики биологического факультета.

*Владимир Андреевич Костюк* – доктор химических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией физиологии кафедры физиологии человека и животных биологического факультета.

#### Authors:

*Alla I. Potapovich*, PhD (biology); leading researcher at the research laboratory of physiology at the department of human and animal physiology, faculty of biology.

*pot-alla@rambler.ru*

*Ahmed Albuhaydar*, postgraduate student at the department of human and animal physiology, faculty of biology.

*Sergey V. Gloushen*, PhD (biology), docent; associate professor at the department of genetics, faculty of biology.

*tanyasuhan@mail.ru*

*Vladimir A. Kostyuk*, doctor of science (chemistry), docent; head of the research laboratory of physiology at the department of human and animal physiology, faculty of biology.

*kostyuk@bsu.by*

## THE ABILITY OF PLANT POLYPHENOLS TO REDUCE THE NUMBER OF UVC-INDUCED SINGLE-STRANDED NUCLEAR DNA BREAKS IN KERATINOCYTES

A. I. POTAPOVICH<sup>a</sup>, A. ALBUHAYDAR<sup>a</sup>, S. V. GLOUSHEN<sup>a</sup>, V. A. KOSTYUK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: V. A. Kostyuk (kostyuk@bsu.by)

The effect of plant polyphenolic compounds (PPs) on the viability of human keratinocytes exposed to ultraviolet (UV) radiation of range C (UVC) and the number of single-stranded DNA breaks in the nuclei of these cells was studied. The experimental data obtained indicate that, along with the cytoprotective effect, the addition of silybin and acacetin immediately after the UVC exposure leads to a significant decrease in the number of single-stranded DNA breaks in the nuclei of HaCaT keratinocytes 2 and 5 h after exposure. It was concluded that PPs are able to reduce the destructive effect of UV radiation on skin cells, reducing the number of genetic damage.

**Keywords:** UVC; PPs; single-stranded DNA breaks; DNA comets; HaCaT keratinocytes.

### Введение

В тех случаях, когда основной мишенью ультрафиолетового излучения (УФИ) является ядерная ДНК, клеточные ответы могут инициироваться в результате появления одноцепочечных разрывов [1]. Одноцепочечные разрывы и образование ковалентной связи между двумя соседними пиримидиновыми основаниями (тиминном или цитозинном) приводят к возникновению димеров пиримидина: циклобутановых димеров (CPDs) и пиримидин-(6,4)-пиримидиновых фотопродуктов (6-4PPs). В основе циклобутанового димера лежит четырехуглеродное кольцо, образующееся на месте разрыва двух двойных связей соседних пиримидиновых оснований [2]. CPDs и 6-4PPs возникают при прямом воздействии на ДНК клеток кожи УФИ коротковолнового диапазона, или УФС (200–280 нм), но могут быть следствием воздействия УФИ средневолнового, или УФВ (280–320 нм), и длинноволнового, или УФА (320–400 нм), диапазонов, которое опосредовано через инициирование процессов образования активных форм кислорода [1]. Таким образом, УФС-индуцированное повреждение клеток кожи является адекватной моделью, воспроизводящей молекулярно-биологические последствия инициируемых УФИ фотохимических процессов в коже, и позволяет проводить поиск новых эффективных природных фотопротекторов, способных активировать в клетках репарационные процессы, уменьшая деструктивное воздействие УФИ. Существует большое разнообразие методов исследования повреждений структуры ДНК, однако ввиду своей чувствительности и специфичности многие из них недостаточны для мониторинга повреждений ДНК, вызванных действием внешних факторов, и определения генопротекторного эффекта потенциальных фармакологических препаратов. По этой причине большой интерес представляет предложенный в 1984 г. метод ДНК-комет (метод гель-электрофореза ДНК отдельных клеток) [3; 4], позволяющий выявлять и анализировать повреждения ДНК как *in vitro*, так и *in vivo*. С помощью метода ДНК-комет в данной работе было исследовано влияние растительных полифенолов на УФС-индуцированное образование одноцепочечных разрывов ДНК в ядрах кератиноцитов.

### Материалы и методы исследования

**Реактивы и среды.** В работе использовались коммерческие растительные полифенольные соединения (РПС) – силибин и акацетин (*Extrasynthese*, Франция). Во всех экспериментах РПС растворяли в диметилсульфоксиде (ДМСО). Также применялись трипсин, среда ДМЕМ и этидиум бромид (ЭБ) (*Sigma-Aldrich*, Германия), изотонический фосфатный буфер (ИФБ, pH 7,4) (*Lonza*, Бельгия), антибиотики (*Thermo Fisher Scientific*, США), эмбриональная бычья сыворотка (ЭБС) (*Capricorn Scientific*, Германия).

**Клеточные культуры.** В качестве объекта исследования использовали культивируемые кератиноциты человека линии HaCaT, подарок доктора Н. Е. Фузенига (*Deutsches Krebsforschungszentrum*, Гейдельберг, Германия), являющиеся основным клеточным элементом эпидермиса – естественного барьера, защищающего расположенные ниже слои кожи от внешнего воздействия, в том числе и УФИ.

**Моделирование УФС-облучения.** В данной работе использовали бактерицидную лампу G30W Sylvania (*Feilo Sylvania*, Германия), 95 % излучения которой является УФС с длиной волны 253,7 нм. Лампа располагалась на расстоянии 10 см от планшета с клетками, обеспечивая интенсивность облучения 1,0 мВт/см<sup>2</sup>, как определено калиброванным оптическим УФС-радиометром MS-100 (*UVP Inc.*, Канада).

Исследование влияния УФС на жизнеспособность культивируемых клеток без РПС и в их присутствии проводили в 96-луночных планшетах через 24 ч после облучения. Эксперименты по выявлению одноцепочечных разрывов ДНК в клетках HaCaT, подвергнутых воздействию УФС, без РПС и с их применением проводили в 24-луночных планшетах после достижения 90–100 % конфлюэнтного монослоя. Непосредственно перед облучением среду заменяли на ИФБ. Сразу после облучения ИФБ заменяли на среду ДМЕМ без сыворотки, содержащую ДМСО (контроль и серия УФС) или растворы РПС в ДМСО в дозе 50 мкмоль/л (серия УФС + РПС). Клетки культивировались при стандартных условиях (37 °С, 5 % CO<sub>2</sub>).

**Определение цитотоксического действия УФС без РПС и в их присутствии.** Количество жизнеспособных клеток определяли с помощью реактива PrestoBlue™ Reagent (Introvigen, США) в соответствии с инструкцией. Флуоресценцию образующегося продукта (возбуждение 560 нм, эмиссия 590 нм) измеряли посредством планшетного флуориметра. Усредненную интенсивность флуоресценции лунок, содержащих контрольные клетки, принимали за 100 %.

**Выявление одноцепочечных разрывов ДНК в клетках HaCaT методом ДНК-комет.** В ходе эксперимента 50 мкл суспензии контрольных и опытных клеток добавляли к 300 мкл заранее приготовленного 0,7 % раствора легкоплавкой агарозы и наносили смесь на предметные стекла, предварительно покрытые нормальной агарозой. Препараты помещали в лизирующий буфер и выдерживали в темноте 20 ч (4 °С). Последующие денатурацию и электрофорез проводили в щелочной среде (рН 13,0). Продолжительность электрофореза – 20 мин при напряжении 25 В и силе тока 300 мА. Образцы дважды промывали в нейтрализующем растворе (рН 7,4, 4 °С) и окрашивали ЭД. Микропрепараты фотографировали цифровой камерой Canon SX130 (Япония), совмещенной с флуоресцентным микроскопом Axiovert 25 (Zeiss, Германия), используя Filter set 15 (EX BP 546/12, BS FT 580, EM LP 590).

**Статистическая обработка результатов.** Полученные результаты обрабатывали с помощью стандартной компьютерной программы Microsoft Excel. Статистические данные представлялись в виде ( $M \pm SD$ ), где  $M$  – среднее арифметическое;  $SD$  – стандартное отклонение. Для оценки разницы между экспериментальными группами применяли  $t$ -критерий Стьюдента, достоверными считались значения  $p < 0,05$ .

## Результаты и их обсуждение

**Исследование цитотоксического действия УФС на кератиноциты человека линии HaCaT без РПС и в их присутствии.** Была изучена цитопротекторная активность флаволигнана силибина (рис. 1, а) и флавоноида акацетина (рис. 1, б).

С этой целью силибин и акацетин добавляли к клеткам сразу после облучения, и они находились в среде при последующей инкубации клеток. Данные, приведенные на рис. 2, свидетельствуют, что оба соединения достоверно увеличивают количество жизнеспособных кератиноцитов через 24 ч после воздействия УФС в сравнении с облученными клетками, инкубируемыми без РПС.

**Исследование влияния силибина и акацетина на количество одноцепочечных разрывов ядерной ДНК в кератиноцитах, подвергнутых воздействию УФС в дозе 0,06 Дж/см<sup>2</sup>.** Известно, что при прямом воздействии УФС на ДНК в результате быстрых фотохимических процессов происходит повреждение ДНК и образуются CPDs и 6-4PPs. Клеточным ответом на повреждение ДНК является активация механизмов репарации, которые позволяют исправить одностранные разрывы ДНК, используя в качестве матрицы неповрежденную комплементарную цепь [1]. Однако при достаточно сильном повреждении полной репарации не происходит, следствием чего становится апоптотическая гибель клеток [5]. В предыдущем разделе показано, что РПС достоверно повышают жизнеспособность облученных клеток и снижают их апоптотическую гибель. Поскольку РПС добавляли уже после облучения

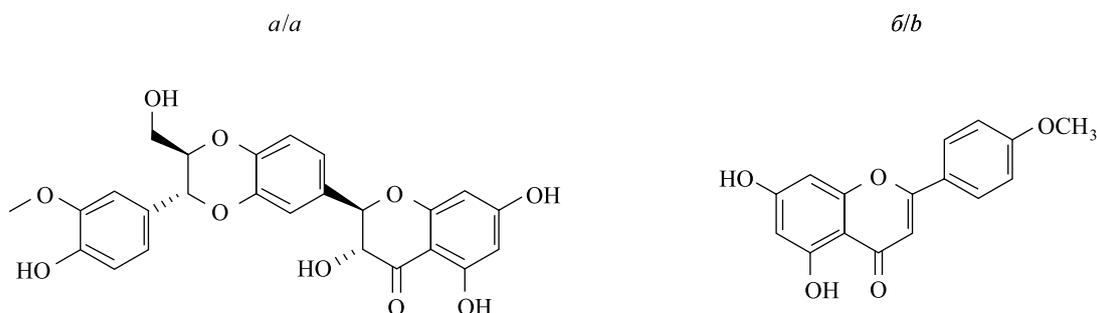


Рис. 1. Структурные формулы исследованных соединений: а – силибин; б – акацетин  
Fig. 1. The structure of the investigated compounds: a – silybin; b – acacetin

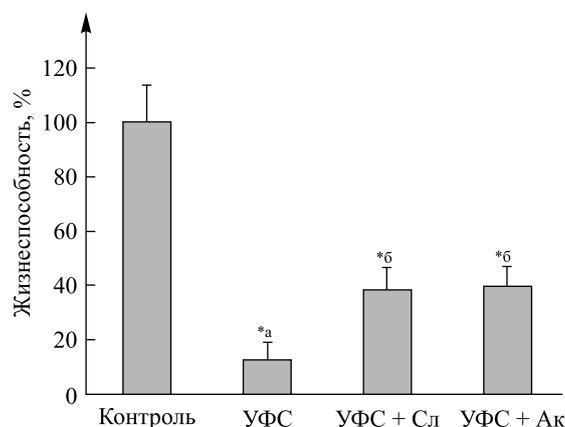


Рис. 2. Жизнеспособность клеток NaCaT, инкубируемых 24 ч после воздействия УФС (0,06 Дж/см<sup>2</sup>) в среде без РПС и в присутствии 50 мкмоль/л силибина (Сл) и акацетина (Ак).  
<sup>\*а</sup> –  $p < 0,0001$  относительно контроля; <sup>\*б</sup> –  $p < 0,001$  относительно УФС  
 Fig. 2. Viability of NaCaT cells incubated 24 h in medium without PPs and medium with silybin (Сл) or acacetin (Ак) at a concentration of 50  $\mu\text{mol/L}$  after exposure to UVC at a dose of 0.06  $\text{J/cm}^2$ .  
<sup>\*а</sup> –  $p < 0.0001$  relative to the control; <sup>\*б</sup> –  $p < 0.001$  relative to the UVC

и они не могли повлиять на фотохимические процессы повреждения ДНК, можно сделать вывод, что цитопротекторное действие РПС реализуется на уровне процессов репарации ДНК и внутриклеточного инициирования апоптоза. Следует отметить, что подавление апоптоза в клетках с поврежденной ДНК без устранения этих повреждений связано с высоким риском развития онкологической трансформации, поэтому при поиске и отборе фармакологических средств, направленных на снижение негативного воздействия экспозома, в том числе УФИ, на организм человека, важно оценить способность тестируемых соединений активировать процессы репарации повреждений ДНК. В данной работе с этой целью был использован метод ДНК-комет. Он позволяет визуально оценивать количество односторонних разрывов после воздействия УФС. На рис. 3 приведены флуоресцентные микрофотографии ДНК-комет, полученных из контрольных клеток NaCaT (см. рис. 3, а) и клеток через 2 ч (см. рис. 3, б) и 5 ч (см. рис. 3, в) после воздействия УФС в дозе 0,06 Дж/см<sup>2</sup>.

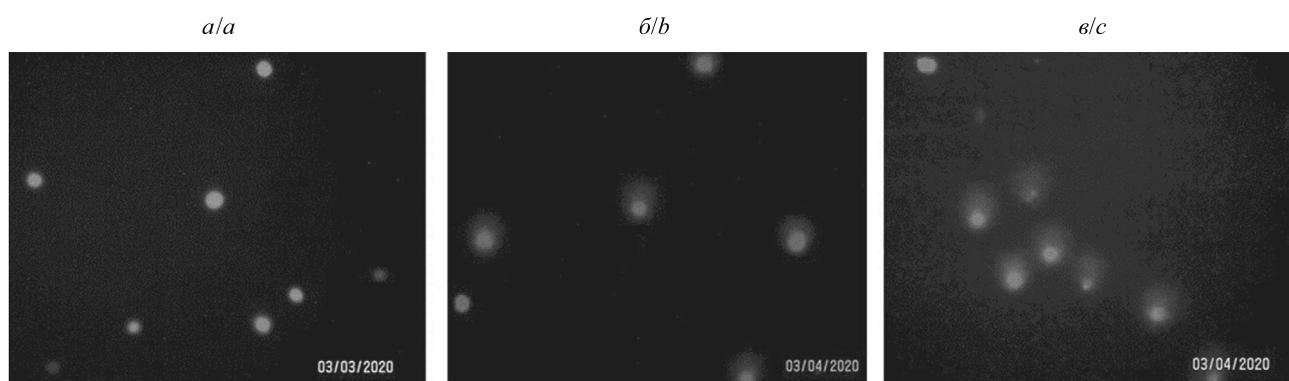


Рис. 3. Репрезентативные флуоресцентные микрофотографии ДНК-комет, полученных из контрольных клеток NaCaT (а) и клеток через 2 ч (б) и 5 ч (в) после воздействия УФС в дозе 0,06 Дж/см<sup>2</sup>. Окрашивание ЭБ  
 Fig. 3. Representative fluorescent micrographs of DNA comets from control NaCaT cells (a) and cells 2 h (b) and 5 h (c) after exposure to UVC at a dose of 0.06  $\text{J/cm}^2$ . Staining EB

Полученные микрофотографии ДНК-комет в количестве 100–120 шт. для каждого экспериментального условия анализировали визуально и ранжировали на пять категорий в зависимости от доли ДНК в хвосте (рис. 4): категория 0 – без повреждения (менее 5 %); категория 1 – незначительное повреждение (5–20 %); категория 2 – среднее повреждение (20–40 %); категория 3 – сильное повреждение (40–80 %); категория 4 – максимальное повреждение (более 80 %). Кометы без головы, также называемые облаками, не использовали при анализе.

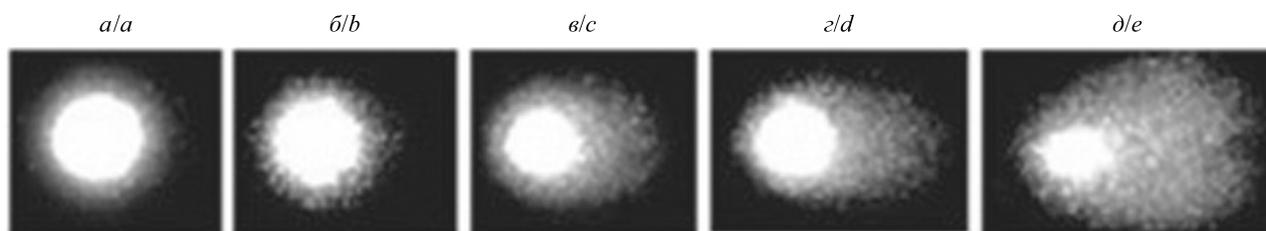


Рис. 4. ДНК-кометы клеток с различной степенью поврежденности ДНК:  
а – категория 0; б – категория 1; в – категория 2; г – категория 3; д – категория 4  
Fig. 4. DNA comets of cells with various degree of DNA damage:  
а – category 0; б – category 1; в – category 2; г – category 3; д – category 4

Степень поврежденности ДНК выражается как индекс ДНК-комет (ИДК), определяемый по формуле [4]

$$\text{ИДК} = \frac{0 \cdot n_0 + 1 \cdot n_1 + 2 \cdot n_2 + 3 \cdot n_3 + 4 \cdot n_4}{\Sigma}$$

где  $n_0$ – $n_4$  – число ДНК-комет каждой категории;  $\Sigma$  – сумма проанализированных ДНК-комет.

Полученные результаты, характеризующие степень поврежденности ДНК, выраженную как ИДК, представлены в таблице. Как видно из приведенных данных, величина ИДК существенно возрастает при воздействии УФС на кератиноциты. Оба исследованных соединения достоверно снижали ИДК, что указывает на активацию ими процесса репарации повреждения ДНК. Эти результаты согласуются с полученными нами ранее данными, свидетельствующими, что РПС, в частности акацетин, способны существенно ускорять процесс репарации ДНК на стадии фосфорилирования белка, называемого гистоном H2AX [5].

**ИДК кератиноцитов линии HaCaT при воздействии УФС в дозе 0,06 Дж/см<sup>2</sup> без РПС и с последующим добавлением 50 мкмоль/л РПС**

**IDC of keratinocytes HaCaT after exposure to UVC at a dose of 0.06 J/cm<sup>2</sup> without PPs and with following incubation 50 μmol/L PPs**

| Условия эксперимента | ИДК                        |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|
|                      | Через 2 ч после облучения  | Через 5 ч после облучения  |
| Контроль             | 0,13 ± 0,01                | 0,16 ± 0,01                |
| УФС                  | 1,57 ± 0,24 <sup>**а</sup> | 1,88 ± 0,20 <sup>**а</sup> |
| УФС + силибин        | 1,11 ± 0,10 <sup>**б</sup> | 1,59 ± 0,24 <sup>*б</sup>  |
| УФС + акацетин       | 1,30 ± 0,17 <sup>*б</sup>  | н/о                        |

Примечание. <sup>\*\*а</sup> –  $p < 0,001$  относительно контроля; <sup>\*б</sup> –  $p < 0,01$ ; <sup>\*\*б</sup> –  $p < 0,001$  относительно УФС; н/о – значение не определено.

### Заключение

Таким образом, на основании исследования молекулярно-биологических процессов, инициируемых УФС в кератиноцитах без потенциальных УФ-протекторов и в их присутствии, можно заключить, что среди РПС есть соединения, в частности силибин и акацетин, способные уменьшать негативные последствия воздействия экспозомы на генетический материал и тормозить развитие апоптоза клеток кожи, снижая количество одноцепочечных разрывов ДНК в результате активации процесса репарации генетических повреждений.

### Библиографические ссылки

1. Farrell AW, Halliday GM, Lyons JG. Chromatin structure following UV-induced DNA damage – repair or death? *International Journal of Molecular Sciences*. 2011;12(11):8063–8085. DOI: 10.3390/ijms12118063.
2. Setlow RB. Cyclobutane-type pyrimidine dimers in polynucleotides. *Science*. 1966;153(3734):379–386. DOI: 10.1126/science.153.3734.379.
3. Ostling O, Johanson KJ. Microelectrophoretic study of radiation-induced DNA damages in individual mammalian cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 1984;123(1):291–298. DOI: 10.1016/0006-291X(84)90411-X.

4. Филиппов ЭВ. Использование метода «ДНК-комет» для детекции и оценки степени повреждений ДНК клеток организмов растений, животных и человека, вызванных факторами окружающей среды (обзор). *Наука и образование*. 2014;2:72–78.
5. Потапович АИ, Сухан ТО, Албухайдар А, Шман ТВ, Ермилова ТИ, де Люка К, Костюк ВА. Активация репарации ДНК и подавление апоптоза в кератиноцитах как возможный механизм цитопротекторного действия растительных полифенолов при воздействии УФ-излучения. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2019;2:29–35. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-2-29-35.

## References

1. Farrell AW, Halliday GM, Lyons JG. Chromatin structure following UV-induced DNA damage – repair or death? *International Journal of Molecular Sciences*. 2011;12(11):8063–8085. DOI: 10.3390/ijms12118063.
2. Setlow RB. Cyclobutane-type pyrimidine dimers in polynucleotides. *Science*. 1966;153(3734):379–386. DOI: 10.1126/science.153.3734.379.
3. Ostling O, Johanson KJ. Microelectrophoretic study of radiation-induced DNA damages in individual mammalian cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 1984;123(1):291–298. DOI: 10.1016/0006-291X(84)90411-X.
4. Filippov EV. [Using the «DNA-comets» method for detection and assessment of the degree of DNA damage to cells of plant, animal, and human organisms caused by environmental factors (review)]. *Nauka i obrazovanie*. 2014;2:72–78. Russian.
5. Potapovic AI, Suhan TO, Albuhaydar A, Shman TV, Ermilova TI, de Luca C, Kostyuk VA. DNA repair activation and apoptosis suppression in keratinocytes as a possible mechanism of cytoprotective action of plant polyphenols under conditions of UV-irradiation. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;2:29–35. Russian. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-2-29-35.

Статья поступила в редколлегию 20.04.2020.  
Received by editorial board 20.04.2020.

УДК 577.214.5

**КОММЕНТАРИЙ АВТОРОВ К ПУБЛИКАЦИИ  
«ВКЛАД РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ  
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТРАНСКРИПТОВ В РАЗНООБРАЗИЕ мРНК  
ГИБРИДНОГО ОНКОГЕНА *RUNX1-RUNX1T1* ЧЕЛОВЕКА»**

**И. Н. ИЛЮШЁНОК<sup>1)</sup>, Л. И. ПОЛХОВСКИЙ<sup>1)</sup>, В. В. ГРИНЕВ<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Критически рассматриваются недостатки, обнаруженные в оригинальной статье «Вклад различных механизмов генерации альтернативных транскриптов в разнообразии мРНК гибридного онкогена *RUNX1-RUNX1T1* человека», которая была опубликована в издании «Журнал Белорусского государственного университета. Биология» (2019, № 2). Также авторы представляют новые данные по теме исследования, полученные с момента публикации.

**Ключевые слова:** гибридный онкоген *RUNX1-RUNX1T1*; альтернативный сплайсинг РНК; высокопроизводительное секвенирование; биологический шум.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках подпрограммы «Объединение» государственной программы научных исследований «Конвергенция-2020» (задание 3.08.03 (№ 469/54)).

**COMMENT OF THE AUTHORS ON THE ARTICLE  
«THE CONTRIBUTION OF VARIOUS MECHANISMS  
TO mRNA DIVERSITY OF HUMAN FUSION  
ONCOGENE *RUNX1-RUNX1T1*»**

**I. M. ILYUSHONAK<sup>a</sup>, L. I. POLKHOVSKY<sup>a</sup>, V. V. GRINEV<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: I. M. Ilyushonak (nov.ilyushonok@gmail.com)

The main topic of this brief communication is the critical review of flaws, found in the original article «The contribution of various mechanisms to mRNA diversity of human fusion oncogene *RUNX1-RUNX1T1*», which was published in «Journal of the Belarusian State University. Biology» (2019, No. 2). Also authors provide new results obtained since publication.

**Keywords:** fusion oncogene *RUNX1-RUNX1T1*; alternative RNA splicing; high throughput sequencing; biological noise.

**Acknowledgements.** This work is a part of sub-programme «Union» of the State Program on Scientific Research «Convergence-2020» (grant 3.08.03 (No. 469/54)).

**Образец цитирования:**

Илюшёнко ИН, Полховский ЛИ, Гринев ВВ. Комментарий авторов к публикации «Вклад различных механизмов генерации альтернативных транскриптов в разнообразии мРНК гибридного онкогена *RUNX1-RUNX1T1* человека». *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2020;2:90–94.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-90-94>

**For citation:**

Ilyushonak IM, Polkhovsky LI, Grinev VV. Comment of the authors on the article «The contribution of various mechanisms to mRNA diversity of human fusion oncogene *RUNX1-RUNX1T1*». *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2020;2:90–94. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-90-94>

**Авторы:**

**Илья Николаевич Илюшёнко** – ассистент кафедры генетики биологического факультета.  
**Лев Иванович Полховский** – студент биологического факультета. Научный руководитель – И. Н. Илюшёнко.  
**Василий Викторович Гринев** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры генетики биологического факультета.

**Authors:**

**Ilya M. Ilyushonak**, assistant at the department of genetics, faculty of biology.  
[nov.ilyushonok@gmail.com](mailto:nov.ilyushonok@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5377-366X>  
**Lev I. Polkhovsky**, student at the faculty of biology.  
[lev\\_polkhovsky@mail.ru](mailto:lev_polkhovsky@mail.ru)  
**Vasily V. Grinev**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of genetics, faculty of biology.  
[grinev\\_vv@bsu.by](mailto:grinev_vv@bsu.by)

Ранее в издании «Журнал Белорусского государственного университета. Биология» (2019, № 2) была опубликована статья «Вклад различных механизмов генерации альтернативных транскриптов в разнообразии мРНК гибридного онкогена *RUNX1-RUNX1T1* человека» [1]. За время, прошедшее с момента публикации, авторами накоплен новый материал, который может представлять интерес для научной общественности. Вместе с тем в оригинальном исследовании были обнаружены недостатки, которые потребовали проведения дополнительных проверок. В настоящем сообщении мы хотели бы обозначить эти недостатки и проанализировать их возможное влияние на выводы, сформулированные в оригинальной публикации, опираясь на дополнительные данные.

В первую очередь ошибочным оказалось утверждение о неспособности обратной транскриптазы RevertAid (*Thermo Fisher Scientific*, США) генерировать артефакты, которые можно принять за результат альтернативного сплайсинга (см. [1], разделы «Оценка технического шума в экспериментальных данных» и «Идентификация основных мод альтернативного сплайсинга пре-мРНК гибридного онкогена *RUNX1-RUNX1T1*»). К сожалению, более тщательное изучение публикаций по данной теме показало, что этот фермент все же способен порождать такого рода ложноположительные результаты [2]. Это побудило нас провести дополнительные проверки экзонных стыков 17a17 и PR07-4b.

Мы воспользовались подходом, предложенным в работе [3], который предусматривает применение обратной транскриптазы из другого биологического источника, например вируса миелобластоза птиц (*avian myeloblastosis virus*, AMV). Пул артефактов, порождаемых двумя неродственными транскриптазами на идентичной матрице, перекрывается лишь частично. Это значит, что воспроизведение экзон-экзонного стыка в образцах кДНК, полученных двумя разными ферментами, может подтвердить реальность его существования. Мы синтезировали кДНК на матрице РНК клеток линии Kasumi-1 при помощи обратной транскриптазы AMV (*New England Biolabs*, Великобритания) и успешно амплифицировали как экзонный стык 17a17, так и PR07-4b. Результаты верификации представлены на рис. 1.

Также мы секвенировали ампликоны, полученные на RevertAid-кДНК, по методу Сэнгера. Результаты секвенирования подтвердили специфичность нашей амплификации; они были приняты для депонирования в GenBank под номерами MT331609 и MT331610. В совокупности эти данные доказывают реальное присутствие экзонных стыков 17a17 и PR07-4b в транскриптом лейкозных клеток.

Второй недостаток оригинальной статьи связан с ОТ-ПЦР-валидацией экзонного стыка 12del. Напомним, что этот сплайсинговый вариант образуется за счет удаления экзитрона из центральной части экзона 12 и соединения его концевых участков. Первоначально он был идентифицирован при анализе полнотранскриптомных данных RNA-Seq. В ходе дополнительной проверки выяснилось, что обратный праймер для ОТ-ПЦР-валидации 12del способен отжигаться на полноразмерной кДНК-матрице лишь за счет нуклеотидов 3'-конца. При этом образуется ложноположительный ампликон целевой длины. Проверку мы осуществили, клонировав полноразмерный, лишенный делеции ампликон экзона 12 в плазмидный вектор и проведя ПЦР на нем.

Эти данные требуют признать нашу ОТ-ПЦР-верификацию 12del неудачной, а результаты количественной ПЦР по его экспрессии – недостоверными. Тем не менее мы считаем, что сам по себе указанный экзонный стык не является артефактом. В пользу этого свидетельствуют следующие соображения. Как правило, «прыжок» обратной транскриптазы, результатом которого является пропуск фрагмента кДНК, происходит по прямым повторам. Так, в статье [4] описывается артефакт обратной транскрипции, представляющий собой делецию в 1851 нуклеотид. Делетированный участок фланкирован двумя почти идентичными (расстояние Левенштейна равно 2) прямыми повторами длиной 13 нуклеотидов. О необходимости прямых повторов для возникновения внутри- и межмолекулярных артефактов обратной транскрипции сообщается и в других работах [3; 5]. Таких повторов в области делеции 12del не наблюдается: расстояние Левенштейна между потенциальными сайтами микрогомологии длиной 15 нуклеотидов равно 8. Можно предположить, что наличие участков с высокой степенью микрогомологии не является обязательным условием для образования артефактов. Однако даже в таком случае участок делеции должен укладываться в устойчивую вторичную структуру, которая максимально сближает сайты для «прыжка». Тем не менее профиль распределения свободной энергии вдоль мРНК гибридного онкогена (см. [1], рис. 3) не относит экзон 12 к областям со сниженным значением энергии Гиббса. Генерация же 12del за счет Taq-полимеразы, а не обратной транскриптазы представляется крайне маловероятной. Такие артефакты описаны в литературе, однако, как и в случае с обратной транскрипцией, для «перепрыгивания» участка матрицы ферментом необходимы устойчивые вторичные структуры [6]. Анализ последовательности экзона 12 при помощи приложения *Two-state folding* веб-сервера *DINAMelt* [7] свидетельствует, что все шпильчатые структуры в этой области разрушаются при температуре отжига праймеров +60 °С. Следовательно, хотя наша попытка верификации 12del с помощью ОТ-ПЦР оказалась неудачной, он не обладает признаками артефактов ПЦР или обратной транскрипции.

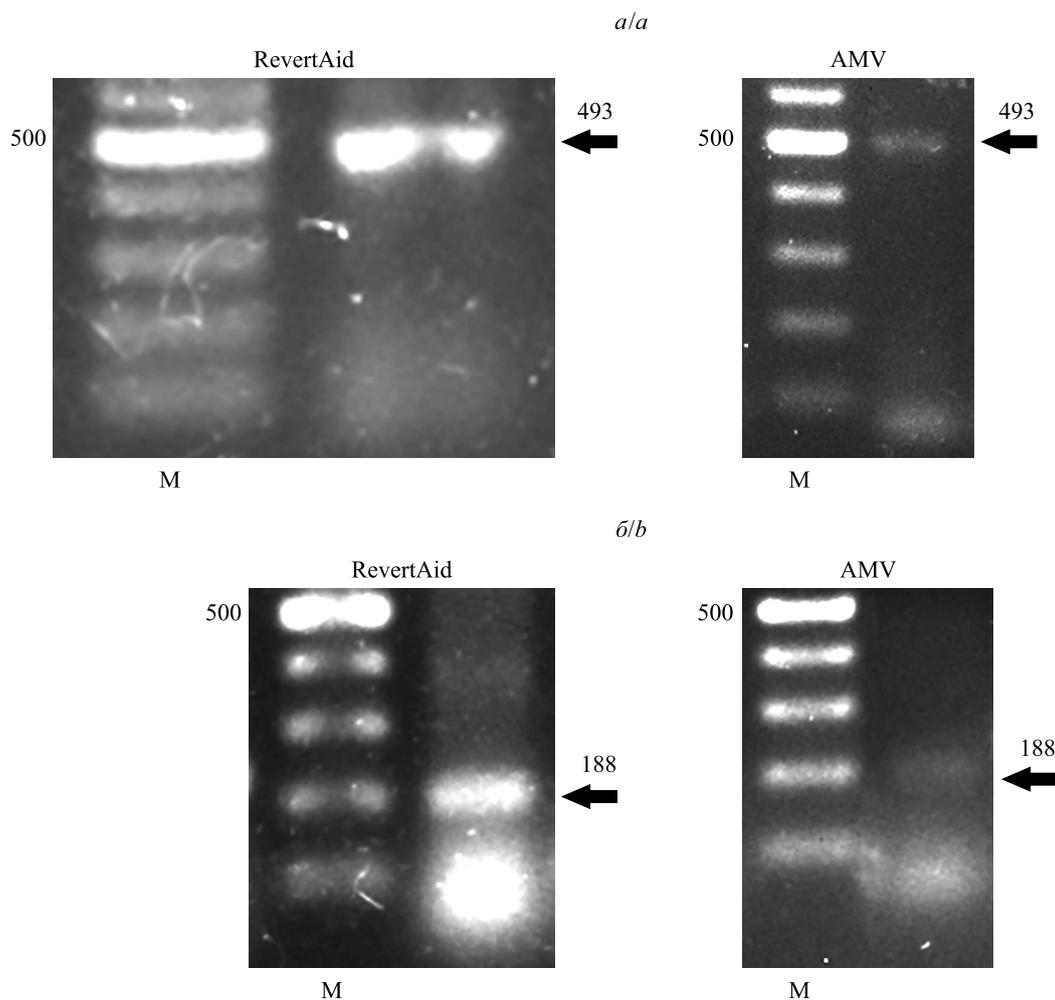


Рис. 1. Верификация экзон-экзонных стыков 17a17 (а) и PR07-4b (б) при помощи обратных транскриптаз различного происхождения. Целевые ампликоны выделены стрелками, размеры фрагментов ДНК указаны цифрами, дорожка с маркером молекулярного веса GeneRuler DNA Ladder Mix (*Thermo Fisher Scientific*, США) обозначена буквой М

Fig. 1. Verification of exon-exon junctions 17a17 (a) and PR07-4b (b) by reverse transcriptases of various origin. Target amplicons marked by arrows, sizes of DNA fragments are indicated by numbers, lane with GeneRuler DNA Ladder Mix (*Thermo Fisher Scientific*, USA) marked by M

Также мы дополнительно верифицировали выводы, касающиеся альтернативного полиаденилирования мРНК гибридного онкогена. В оригинальной работе при помощи программы *KLEAT-2.0* [8] были проанализированы данные 3'-RACE, однако на полнотранскриптомных данных этот подход реализовать не удалось из-за отсутствия вычислительных мощностей. Чтобы обойти это ограничение, мы использовали менее ресурсоемкий программный инструмент *TAPAS* [9], работающий в альтернативной парадигме: он анализирует плотность покрытия чтением 3'-концевых экзонов референсных мРНК, чтобы обнаружить его перепады на внутренних сайтах полиаденилирования. Помимо использованных в оригинальной работе трех библиотек RNA-Seq, созданных на основе транскриптома интактных клеток Kasumi-1, мы проанализировали пять независимых библиотек, сгенерированных на основе биологического материала пациентов с t(8;21)-положительной формой острого миелоидного лейкоза (GEO Accessions GSM1521606, GSM1521607, GSM1521608, GSM1521609, GSM1521610). Таким образом, всего было проанализировано восемь библиотек чтений RNA-Seq. Результаты нашего анализа представлены на рис. 2.

Сайты полиаденилирования, которые фиксирует *TAPAS*, хорошо согласуются с предсказаниями сборщика транскриптома *Cufflinks* (см. [1], раздел «Вклад альтернативных промоторов и сайтов полиаденилирования в разнообразие альтернативных транскриптов гибридного онкогена *RUNX1-RUNX1T1*»). Так, сайты с координатами der8:91955045 и der8:91963506 для экзонов 17 и 17a соответственно фиксируются во всех образцах и в точности совпадают с концами длинных 3'-нетранслируемых областей (НТО), собранных *Cufflinks*. Для экзона 17 наблюдается сгущение уникальных (встречающихся лишь в одном

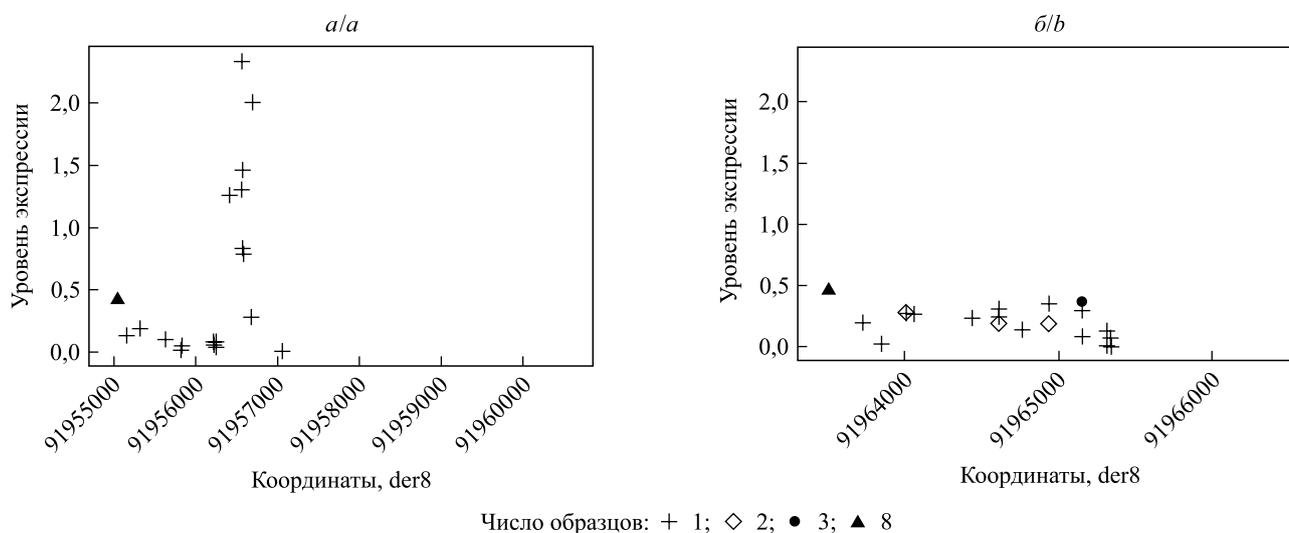


Рис. 2. Детекция сайтов альтернативного полиаденилирования экзонов 17 (а) и 17а (б) онкогена *RUNXI-RUNX1T1* в клетках t(8;21)-положительной формы острого миелоидного лейкоза при помощи *TAPAS*. Длина оси абсцисс соответствует длине экзона. Транскрипция происходит с минус-цепи, поэтому 3'-конец имеет меньшую координату. Легенда отображает количество образцов, в которых зафиксирован тот или иной сайт

Fig. 2. Detection of alternative polyadenylation sites in 17 (a) and 17a (b) exons of *RUNXI-RUNX1T1* oncogene in t(8;21)-positive leukemic cells by *TAPAS*. Horizontal axis length corresponds to exon length. Gene is transcribed from minus strand, so 3'-end has a smaller coordinate. The legend displays a number of samples that contains particular site of polyadenylation

образце) сайтов полиаденилирования в области der8:91956000–91957000, где локализованы 3'-концы предсказанных *Cufflinks* укороченных вариантов экзона 17. Для экзона 17а *TAPAS* также идентифицирует укороченную 3'-НТО с координатой сайта полиаденилирования der8:91965153. В целом эти результаты дополнительно подтверждают наличие у гибридного онкогена транскриптов как с длинными, так и с укороченными 3'-НТО различной длины и подкрепляют результаты, полученные при помощи *Cufflinks*. Тем не менее самые короткие 3'-концевые экзоны, обнаруженные *Cufflinks* и 3'-RACE, *TAPAS* не фиксирует. Это свидетельствует о том, что исчерпывающая каталогизация сайтов альтернативного полиаденилирования онкогена *RUNXI-RUNX1T1* пока остается нерешенной задачей и требует дополнительных усилий.

Подводя итог, можно заключить, что обнаруженные в оригинальном исследовании недостатки не оказывают существенного влияния на его выводы. Тем не менее правила научной этики требуют сообщить о них научной общественности. Авторы благодарят редакцию издания «Журнал Белорусского государственного университета. Биология» за такую возможность.

### Библиографические ссылки

1. Ильющёнок ИН, Мигас АА, Сухаревский АЮ, Шнайдер ОД, Гринев ВВ. Вклад различных механизмов генерации альтернативных транскриптов в разнообразие мРНК гибридного онкогена *RUNXI-RUNX1T1* человека. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2019;2:45–59. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-2-45-59.
2. Ishqi HM, Husain MA, Rehman SU, Sarwar T, Tabish M. Identification and expression of alternatively spliced novel isoforms of cancer associated MYD88 lacking death domain in mouse. *Molecular Biology Reports*. 2018;45(5):699–711. DOI: 10.1007/s11033-018-4209-5.
3. Houseley J, Tollervey D. Apparent non-canonical trans-splicing is generated by reverse transcriptase *in vitro*. *PLOS ONE* [Internet]. 2010 [cited 2020 April 20];5(8):e12271. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0012271>. DOI: 10.1371/journal.pone.0012271.
4. Mader RM, Schmidt WM, Sedivy R, Rizovski B, Braun J, Kalipcian M, et al. Reverse transcriptase template switching during reverse transcriptase – polymerase chain reaction: artificial generation of deletions in ribonucleotide reductase mRNA. *Translational Research. The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*. 2001;137(6):422–428. DOI: 10.1067/mlc.2001.115452.
5. Delviks KA, Pathak VK. Effect of distance between homologous sequences and 3' homology on the frequency of retroviral reverse transcriptase template switching. *Journal of Virology*. 1999;73(10):7923–7932. DOI: 10.1128/JVI.73.10.7923-7932.1999.
6. Cariello NF, Thilly WG, Swenberg JA, Skopek TR. Deletion mutagenesis during polymerase chain reaction: dependence on DNA polymerase. *Gene*. 1991;99(1):105–108. DOI: 10.1016/0378-1119(91)90040-I.
7. Markham NR, Zuker M. DINAMelt web server for nucleic acid melting prediction. *Nucleic Acids Research*. 2005;33(suppl\_2):W577–W581. DOI: 10.1093/nar/gki591.

8. Birol I, Raymond A, Chiu R, Nip KM, Jackman SD, Kreitzman M, et al. KLEAT: cleavage site analysis of transcriptomes. In: Altman RB, Dunker AK, Hunter L, Ritchie MD, Murray T, Klein TE, editors. *Pacific symposium on biocomputing 2015; 4–8 January 2015; Kohala Coast, Hawaii, USA*. New Jersey: World Scientific; 2015. p. 347–358.
9. Arefeen A, Liu J, Xiao X, Jiang T. TAPAS: tool for alternative polyadenylation site analysis. *Bioinformatics*. 2018;34(15):2521–2529. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty110.

## References

1. Ilyushonak IM, Migas AA, Sukhareuski AY, Schneider AD, Grinev VV. The contribution of various mechanisms to mRNA diversity of human fusion oncogene *RUNX1-RUNX1T1*. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;2:45–59. Russian. DOI: 10.33581/2521-1722-2019-2-45-59.
2. Ishqi HM, Husain MA, Rehman SU, Sarwar T, Tabish M. Identification and expression of alternatively spliced novel isoforms of cancer associated MYD88 lacking death domain in mouse. *Molecular Biology Reports*. 2018;45(5):699–711. DOI: 10.1007/s11033-018-4209-5.
3. Houseley J, Tollervey D. Apparent non-canonical trans-splicing is generated by reverse transcriptase *in vitro*. *PLOS ONE* [Internet]. 2010 [cited 2020 April 20];5(8):e12271. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0012271>. DOI: 10.1371/journal.pone.0012271.
4. Mader RM, Schmidt WM, Sedivy R, Rizovski B, Braun J, Kalipciyan M, et al. Reverse transcriptase template switching during reverse transcriptase – polymerase chain reaction: artificial generation of deletions in ribonucleotide reductase mRNA. *Translational Research. The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*. 2001;137(6):422–428. DOI: 10.1067/mlc.2001.115452.
5. Delviks KA, Pathak VK. Effect of distance between homologous sequences and 3' homology on the frequency of retroviral reverse transcriptase template switching. *Journal of Virology*. 1999;73(10):7923–7932. DOI: 10.1128/JVI.73.10.7923-7932.1999.
6. Cariello NF, Thilly WG, Swenberg JA, Skopek TR. Deletion mutagenesis during polymerase chain reaction: dependence on DNA polymerase. *Gene*. 1991;99(1):105–108. DOI: 10.1016/0378-1119(91)90040-I.
7. Markham NR, Zuker M. DINAMelt web server for nucleic acid melting prediction. *Nucleic Acids Research*. 2005;33(suppl\_2):W577–W581. DOI: 10.1093/nar/gki591.
8. Birol I, Raymond A, Chiu R, Nip KM, Jackman SD, Kreitzman M, et al. KLEAT: cleavage site analysis of transcriptomes. In: Altman RB, Dunker AK, Hunter L, Ritchie MD, Murray T, Klein TE, editors. *Pacific symposium on biocomputing 2015; 4–8 January 2015; Kohala Coast, Hawaii, USA*. New Jersey: World Scientific; 2015. p. 347–358.
9. Arefeen A, Liu J, Xiao X, Jiang T. TAPAS: tool for alternative polyadenylation site analysis. *Bioinformatics*. 2018;34(15):2521–2529. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty110.

Статья поступила в редакцию 21.05.2020.  
Received by editorial board 21.05.2020.

## АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ В БГУ РАБОТ INDICATIVE ABSTRACTS OF THE PAPERS DEPOSITED IN BSU

*УДК 57:004(075.8)*

**Основы информационной биологии** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 01 01 «Биология (по направлениям)», направления спец.: 1-31 01 01-01 «Биология (научно-производственная деятельность)», 1-31 01 01-02 «Биология (научно-педагогическая деятельность)», 1-31 01 01-03 «Биология (биотехнология)»; 1-31 01 02 «Биохимия», 1-31 01 03 «Микробиология», 1-33 01 01 «Биоэкология» / С. В. Буга [и др.] ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2020. 64 с. : ил. Библиогр.: с. 62–64. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/241896>. Загл. с экрана. Деп. 20.04.2020, № 004120042020.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов 1-й ступени высшего образования специальностей 1-31 01 01 «Биология (по направлениям)», 1-31 01 02 «Биохимия», 1-31 01 03 «Микробиология», 1-33 01 01 «Биоэкология». Содержание ЭУМК посвящено использованию сетевых технологий для эффективного поиска и передачи научной информации, развитию навыков эффективного использования информационных технологий для анализа данных и документального оформления результатов биологических и экологических исследований, а также получению базовых знаний об использовании информационного подхода в основных разделах современной биологии.

*УДК 614.8(075.8)(076)*

**Безопасность жизнедеятельности человека** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1 31 04 01 «Физика (по направлениям)», 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии», 1-31 04 07 «Физика наноматериалов и нанотехнологий» / БГУ ; сост.: О. Д. Бичан, Л. К. Герасимова. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2019. 95 с. : ил. Библиогр.: с. 90–95. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/242299>. Загл. с экрана. Деп. 11.05.2020, № 004911052020.

Электронный учебно-методический комплекс содержит набор материалов, которые используются в учебном процессе: учебную программу, учебные пособия, включающие лекционный и практический материал по дисциплине, тематику и планы семинарских занятий, теоретические вопросы и тесты для контроля знаний, вопросы для подготовки к зачету, список рекомендуемой литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

### КЛЕТОЧНАЯ БИОЛОГИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ

|  |    |
|--|----|
| <i>Шаденко В. Н.</i> Возрастные изменения нейронных функций при нарушении метаболизма глюкозы .....  | 3  |
| <i>Шашко А. Ю., Бондаренко В. Ю., Черныш М. А., Пржевальская Д. А., Уснич С. Л., Пишбытко Н. Л., Смолич И. И., Демидчик В. В.</i> Современные феномные платформы и их применение в биологии растений и сельском хозяйстве..... | 15 |
| <i>Шинкевич М. В., Люзина К. М.</i> Биоритмологические особенности variability сердечного ритма у девушек.....   | 26 |

### БИОХИМИЯ

|   |    |
|---|----|
| <i>Нестер Г. В., Дитченко Т. И.</i> Стимуляция биосинтеза вторичных метаболитов фенольной природы в суспензионных культурах клеток <i>Echinacea purpurea</i> L. Moench под влиянием элиситоров дрожжевого экстракта ..... | 37 |
| <i>Колбас Н. Ю., Колбас А. П., Домась А. С., Првулович Д.</i> Оценка биохимических и дегустационных параметров плодов <i>Prunus cerasus</i> L. ....   | 49 |

### ЗООЛОГИЯ

|  |    |
|--|----|
| <i>Гричик В. В., Балаш А. В., Рак А. В., Спрингер А. М.</i> Новые данные о распространении и биологии редких видов семейства землеройковых (Soricidae, Mammalia) в Беларуси .....                    | 58 |
| <i>Сахвон В. В., Федоринчик К. А.</i> Межгодовая динамика видового разнообразия птиц Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (Минск) .....                               | 66 |
| <i>Плискевич Е. С.</i> Особенности комплексов жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) участков луговых биоценозов с засорением и без засорения борщевиком Сосновского ( <i>Heracleum sosnowskyi</i> ) ..... | 75 |

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

|  |    |
|--|----|
| <i>Потапович А. И., Албухайдар А., Глушен С. В., Костюк В. А.</i> Способность растительных полифенолов снижать количество УФС-индуцированных одноцепочечных разрывов ядерной ДНК в кератиноцитах .....                                 | 84 |
| <i>Ильющёнок И. Н., Полховский Л. И., Гринев В. В.</i> Комментарий авторов к публикации «Вклад различных механизмов генерации альтернативных транскриптов в разнообразии мРНК гибридного онкогена <i>RUNX1-RUNX1T1</i> человека» ..... | 90 |
| Аннотации депонированных в БГУ работ.....  | 95 |

## CONTENTS

### CELL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

|  |    |
|--|----|
| <i>Shadenko V. N.</i> Age-dependent changes of neural functions under glucose metabolism disorders....   | 3  |
| <i>Shashko A. Yu., Bandarenka U. Yu., Charnysh M. A., Przhevalskaya D. A., Usnich S. L., Pshybytko N. L., Smolich I. I., Demidchik V. V.</i> Modern phenotyping platforms and their application in plant biology and agriculture ..... | 15 |
| <i>Shinkevich M. V., Liuzina K. M.</i> Heart rate variability in healthy volunteers .....  | 26 |

### BIOCHEMISTRY

|  |    |
|--|----|
| <i>Nester G. V., Ditchenko T. I.</i> Stimulation of phenolic nature secondary metabolites biosynthesis in <i>Echinacea purpurea</i> L. Moench suspension cell cultures under influence yeast extract elisitors ..... | 37 |
| <i>Kolbas N. Y., Kolbas A. P., Domas A. S., Prvulović D.</i> Evaluation of biochemical and tasting parameters of <i>Prunus cerasus</i> L. fruits .....   | 49 |

### ZOOLOGY

|  |    |
|--|----|
| <i>Grichik V. V., Balash A. V., Rak A. V., Springer A. M.</i> New data on rare shrew species (Soricidae, Mammalia) distribution and biology in Belarus .....                                   | 58 |
| <i>Sakhvon V. V., Fedorynchik K. A.</i> Interannual dynamics of breeding bird assemblage within the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk).....       | 66 |
| <i>Pliskevich E. S.</i> Features of ground beetle (Coleoptera, Carabidae) assemblages in areas of meadow biocenosis with and without Sosnovsky's hogweed ( <i>Heracleum sosnowskyi</i> ) ..... | 75 |

### SHORT COMMUNICATIONS

|  |    |
|--|----|
| <i>Potapovich A. I., Albuhaydar A., Gloushen S. V., Kostyuk V. A.</i> The ability of plant polyphenols to reduce the number of UVC-induced single-stranded nuclear DNA breaks in keratinocytes .....         | 84 |
| <i>Ilyushonak I. M., Polkhovsky L. I., Grinev V. V.</i> Comment of the authors on the article «The contribution of various mechanisms to mRNA diversity of human fusion oncogene <i>RUNXI-RUNXIT1</i> »..... | 90 |
| Indicative abstracts of the papers deposited in BSU .....  | 95 |

*Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим наукам.*

*Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).*

**Журнал Белорусского  
государственного университета. Биология.  
№ 2. 2020**

Учредитель:  
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,  
220030, г. Минск.

Почтовый адрес: пр. Независимости, 4,  
220030, г. Минск.

Тел. (017) 259-70-74, (017) 259-70-75.

E-mail: [jbiol@bsu.by](mailto:jbiol@bsu.by)

URL: <https://journals.bsu.by/index.php/biology>

«Журнал Белорусского государственного  
университета. Биология» издается с января 1969 г.  
До 2017 г. выходил под названием «Вестник БГУ.  
Серия 2, Химия. Биология. География»  
(ISSN 2308-9164).

Редакторы *О. А. Семенец, Е. И. Костина*  
Технический редактор *В. В. Пишкова*  
Корректор *Л. А. Меркуль*

Подписано в печать 30.06.2020.  
Тираж 105 экз. Заказ 223.

Республиканское унитарное предприятие  
«Информационно-вычислительный центр  
Министерства финансов Республики Беларусь».  
ЛП № 02330/89 от 03.03.2014.  
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.

© БГУ, 2020

**Journal  
of the Belarusian State University. Biology.  
No. 2. 2020**

Founder:  
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,  
Minsk 220030.

Correspondence address: 4 Niezaliežnasci Ave.,  
Minsk 220030.

Tel. (017) 259-70-74, (017) 259-70-75.

E-mail: [jbiol@bsu.by](mailto:jbiol@bsu.by)

URL: <https://journals.bsu.by/index.php/biology>

«Journal of the Belarusian State University. Biology»  
published since January, 1969.  
Until 2017 named «Vestnik BGU.  
Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya»  
(ISSN 2308-9164).

Editors *O. A. Semenets, E. I. Kostina*  
Technical editor *V. V. Pishkova*  
Proofreader *L. A. Merkul'*

Signed print 30.06.2020.  
Edition 105 copies. Order number 223.

Republican Unitary Enterprise  
«Informatsionno-vychislitel'nyi tsentr  
Ministerstva finansov Respubliki Belarus'».  
License for publishing No. 02330/89, 3 March 2014.  
17 Kal'varyjskaja Str., Minsk 220004.

© BSU, 2020