

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 591.1

EDN: PERORC

DOI: 10.21285/achb.1011



**Изучение влияния пищевой добавки на основе
трюфелевых грибов на гематологические
и физиологические показатели лабораторных крыс**

Т.Н. Вавилина[✉], Е.В. Малыгина, А.Ю. Белышенко, Н.А. Имидоева,
В.М. Жиленков, М.М. Моргунова, М.Е. Дмитриева, В.Н. Шелковникова,
А.А. Баталова, Д.В. Аксёнов-Грибанов

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Трюфелевые грибы (*Tuber sp.*) являются одними из самых редких и ценных грибов, обладающих высокой пищевой ценностью и биотехнологическим потенциалом. Мицелий трюфелевых грибов и их плодовые тела богаты белком и могут выступать источником биологически активных соединений. Целью исследования являлась оценка влияния пищевой добавки на основе плодовых тел трюфелей на физиологические и гематологические показатели лабораторных крыс. Для проведения эксперимента отобрано 18 взрослых особей мужского пола крыс линии Wistar, предварительно разделенных на три группы. Контрольная группа получала стандартный корм, а две экспериментальные группы дополнительно к злаковому корму получали порошок из плодовых тел трюфеля или вареное куриное мясо в количестве 20% от суточного рациона. Обе экспериментальные группы подвергались умеренным физическим нагрузкам с помощью метода вынужденного плавания. Так, в ходе эксперимента оценивали изменения в массе тела, силе хвата и гематологических показателях лабораторных животных. Для крыс, получавших продукт на основе порошка плодовых тел черного трюфеля, отмечена положительная динамика физиологических и гематологических параметров. Таким образом, полученные материалы свидетельствуют о потенциале трюфелей как функционального компонента питания, способствующего улучшению физической выносливости и метаболических процессов. Результаты исследования открывают перспективы для разработки биологически активных добавок и пищевых продуктов питания на основе трюфелевых грибов.

Ключевые слова: Трюфель, *Tuber sp.*, крысы, белок, гематологические показатели

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-76-10036.

Для цитирования: Вавилина Т.Н., Малыгина Е.В., Белышенко А.Ю., Имидоева Н.А., Жиленков В.М., Моргунова М.М. [и др.]. Изучение влияния пищевой добавки на основе трюфелевых грибов на гематологические и физиологические показатели лабораторных крыс // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 4. С. 528–534. DOI: 10.21285/achb.1011. EDN: PERORC.

Effect of a truffle-based food supplement on hematological and physiological parameters in laboratory rats

Tatyana N. Vavilina[✉], Ekaterina V. Malygina, Aleksandr Yu. Belyshenko,
Natalia A. Imidoeva, Vladimir M. Zhilenkov, Maria M. Morgunova, Maria E. Dmitrieva,
Victoria N. Shelkovnikova, Anna A. Batalova, Denis V. Axenov-Gribanov

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Truffles (*Tuber sp.*) are among the rarest and most valuable fungi with high nutritional value and biotechnological potential. Truffle mycelium and fruiting bodies are rich in protein and can serve as a source of biologically active compounds. The present study was aimed at assessing the effect of a food supplement based on truffle fruiting bodies on the physiological and hematological parameters of laboratory rats. For the experiment, eighteen adult male Wistar rats were selected and divided into three groups. The control group received standard feed, while the two experimental groups received powdered truffle fruiting bodies or boiled chicken meat (20% of their daily ration) in addition to the cereal feed. Both experimental groups were subjected to moderate physical exertion via forced swimming. The experiment assessed changes in the body weight, grip strength, and hematological parameters of laboratory animals. The rats receiving a product based on powdered black truffle fruiting bodies showed positive changes in physiological and hematological parameters. Thus, the obtained results indicate the potential of truffles to serve as a functional dietary component that improves physical endurance and metabolic processes. The findings offer prospects for the development of dietary supplements and food products on the basis of truffles.

Keywords: truffle, *Tuber sp.*, rats, protein, hematological parameters

Funding. The Russian Science Foundation (project no. 22-76-10036) financially supported the work.

For citation: Vavilina T.N., Malygina E.V., Belyshenko A.Yu., Imidoeva N.A., Zhilenkov V.M., Morgunova M.M., et al. Effect of a truffle-based food supplement on hematological and physiological parameters in laboratory rats. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(4):528-534. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1011. EDN: PERORC.

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативные источники белка привлекают большое внимание со стороны как науки, так и пищевой промышленности. Одним из наиболее перспективных является грибной белок, благодаря присутствию всех незаменимых аминокислот, кроме того, грибная биомасса обладает высокой питательной ценностью и набором микроэлементов. Среди различных источников грибного белка трюфели (*Tuber sp.*) представляют особый интерес, поскольку они содержат до 23% белка (от сухого веса [1]. По содержанию белка трюфели сопоставимы с другими видами грибов, а порой и превосходят их. Например, шитаке и вешенка содержат около 20% белка, а шампиньоны – около 30% белка от сухого веса [2]. Трюфели богаты белками с высоким содержанием незаменимых аминокислот, таких как цистеин, метионин и лизин, которые играют важную роль в метаболизме и поддержании здоровья [3, 4]. Помимо этого, трюфели содержат клетчатку, которая способствует улучшению пищеварения и поддержанию нормальной функции желудочно-кишечного тракта [4, 5]. Трюфели являются источником полезных жиров, в их составе преобладают ненасыщенные жирные кислоты, такие как олеиновая и линолевая, которые составляют более 60% в составе общих липидов [6]. В зависимости от вида трюфеля доля полиненасыщенных жирных кислот может достигать до

79,3%, при этом содержание жиров в трюфелях относительно низкое – около 4–9% от сухого веса, что делает их диетическим продуктом [7, 8].

Помимо вышеперечисленных характеристик трюфель содержит в своем составе биологически активные соединения, такие как флавоноиды, фенольные соединения, терпеноиды, стерины, полисахариды и другие метаболиты, благодаря которым он обладает выраженной антиоксидантной активностью [1, 8, 9]. Антиоксиданты, в том числе содержащиеся в составе трюфеля, помогают бороться со свободными радикалами, предотвращая окислительный стресс, что может снижать риск развития заболеваний, связанных с окислительным повреждением клеток, таких как сердечно-сосудистые заболевания и нейродегенеративные расстройства [9]. Кроме того, плодовые тела трюфеля являются источником витаминов группы В (B1, B2, B3, B5, B6), витамина С, а также β-глюканов, обладающих иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами [10]. Также в составе черного трюфеля присутствует эргостерол, который под действием ультрафиолетового излучения превращается в эргокальциферол (витамин D2), способствующий поддержанию минеральной плотности костей и снижению риска остеопороза [11, 12]. Трюфели содержат значительное количество макро- (калий и фосфор) и микроэлементов (железо, медь, цинк и марганец),

которые способствуют укреплению костей, улучшению кровообращения, поддержанию иммунной системы и регуляции обмена веществ [1, 13]. Исследования также подтверждают наличие антибиотической [14], противоопухолевой [15], противовоспалительной активности у экстрактов трюфелевых грибов [1], что делает их перспективным объектом для использования в фармацевтической промышленности.

Несмотря на значительный прогресс в изучении химического состава и биологических активностей черного трюфеля, многие механизмы его действия остаются недостаточно изученными. В связи с этим дальнейшие исследования направлены на углубленное изучение его физиологического воздействия. Перспективным направлением является моделирование влияния трюфелей на организм млекопитающих с использованием лабораторных животных, например крыс. Такие исследования позволяют более детально охарактеризовать биологическую активность трюфелей и оценить их потенциальную пользу для здоровья человека.

Целью представленного исследования являлась оценка влияния пищевой добавки, содержащей трюфелевые грибы, на некоторые гематологические и физиологические показатели лабораторных крыс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для эксперимента было отобрано 18 взрослых крыс линии *Wistar*, разделенных на три экспериментальные группы. Крыс содержали в контролируемых условиях при постоянной температуре 21–23 °C и влажности 55–60% с 12-часовым циклом день – ночь и свободным доступом к стандартному злаковому корму и чистой питьевой воде. В качестве контроля исследовались животные, получавшие стандартный злаковый корм и не подвергавшиеся физическим нагрузкам. Первая тестовая группа лабораторных крыс получала злаковый корм и продукт на основе черного трюфеля в размере 20% от дневного рациона. Вторая тестовая группа животных получала злаковый корм и вареное куриное мясо в размере 20% от дневного рациона. Обе экспериментальные группы проходили тренировки методом вынужденного плавания. Протокол тренировок включал плавательные упражнения, которые проводились 5 дней в неделю в течение 4 недель в стеклянном резервуаре объемом 0,1 м³ при температуре воды 25 °C [16, 17]. В начале эксперимента животных адаптировали к воде. Начальная высота водного столба составляла 5 см, время плавания – 5 мин. Каждую неделю уровень воды повышали на 5 см. Максимальная глубина резервуара в ходе тренировок составила 30 см. Время плавания также постепенно увеличивали с 5 до 30 мин в день.

В течение 4 недель эксперимента проводили контроль массы тела и регулярные измерения пиковой силы хвата крыс с помощью хватательного теста. Суть данного теста является оценка силы хвата, которую грызун создает с помощью мышц-сгибателей передних конечностей [18]. Замеры пиковой силы хвата проводили с помощью зафиксированного портативного динамометра Shahe AMF (Shahe, Китай) на максимальную силу нажима 20 Н. Для проведения теста крысу осторожно приподнимали за хвост и давали ухватиться за сетку, прикрепленную к стержню динамометра. Показатели регистрировали после того, как крыса переставала

тянуть и отпускала сетку.

Также за время эксперимента у всех животных, принимавших в нем участие, 3 раза отбирали кровь из хвостовой вены [19], а затем проводили ее исследование с использованием автоматического гематологического анализатора Mindray BC-5000 Vet (Mindray, Китай). В рамках эксперимента измеряли такие параметры, как: концентрация гемоглобина, средняя концентрация гемоглобина в эритроците, уровень эритроцитов, а также содержание лейкоцитов и эозинофилов.

Все эксперименты с участием лабораторных животных были спланированы и проведены согласно правилам этического комитета Иркутского государственного университета. Статистическую обработку данных выполняли в программах Microsoft Office Excel и Past 4 с помощью критерия Фридмана (для внутригруппового сравнения) и Краскела – Уоллиса (для межгруппового сравнения) при уровне значимости $\alpha = 0,05$. После выявления значимых различий проводили попарные сравнения: для независимых выборок использовали критерий Манна – Уитни, для зависимых – критерий Вилкоксона.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Материалы исследования показали, что крысы, употреблявшие грибной белок, имели статистически значимые более высокие показатели силы хвата в сравнении

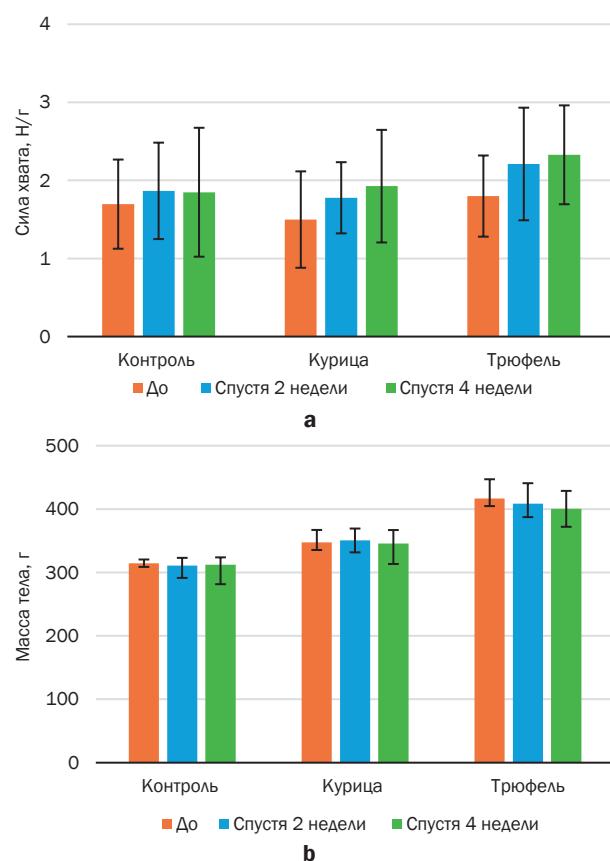


Рис. 1. Диаграмма относительной силы хвата с пересчетом на массу тела (а) и массы тела лабораторных животных (б), участвовавших в эксперименте

Fig. 1. Diagram of relative grip strength converted to body weight (a) and body weight of laboratory animals (b) participating in the experiment

с другими экспериментальными группами ($p \leq 0,05$). К 4-й неделе средняя пиковая сила хвата увеличилась: до $2,3 \pm 0,6$ Н/г в группе с использованием трюфеля; до $1,9 \pm 0,5$ Н/г в группе с применением куриного мяса; до $1,8 \pm 0,5$ Н/г в контрольной группе (рис. 1, а).

Вместе с тем показано, что животные, употребляющие грибной белок, эффективнее снижали массу тела, чем группа крыс, употребляющих курицу в качестве источника белка. Так, в группе, употреблявшей трюфель, к 4-й неделе зафиксировано снижение массы тела на 3,8%, в то время как в группе, получавшей курицу, данный показатель составил лишь 0,5% (рис. 1, б). Различие подтверждено статистически ($p \leq 0,05$).

Межгрупповой анализ, выполненный с использованием критерия Краскела – Уоллиса, выявил достоверные различия в содержании гемоглобина между тремя экспериментальными группами ($p \leq 0,05$). В группе с использованием трюфеля концентрация гемоглобина возросла с отметки $174,5 \pm 5,3$ до $188,1 \pm 5,4$ г/л к концу эксперимента, в то время как в группе, получавшей куриное мясо – с $167,3 \pm 8,2$ до $178,6 \pm 6,0$ г/л (рис. 2, а). В контрольной группе гемоглобин изменился незначительно. Дополнительный анализ с использованием

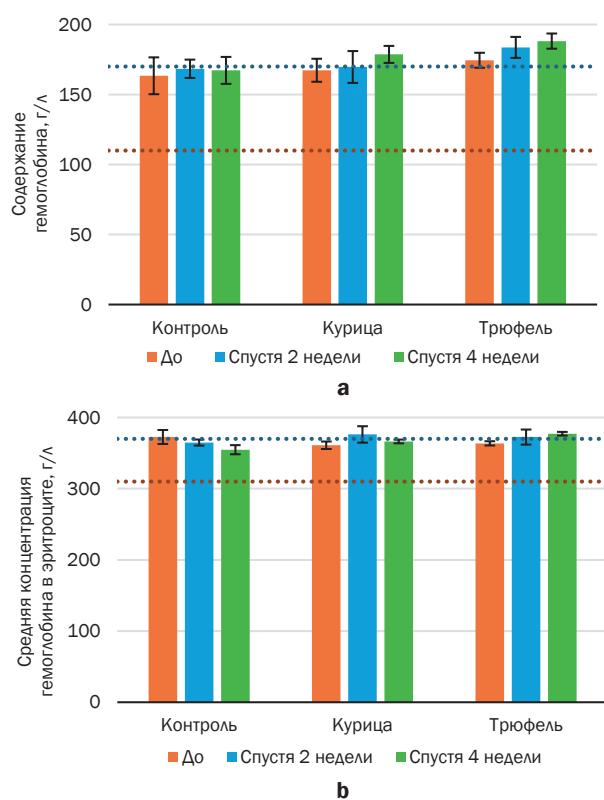


Рис. 2. Гистограмма содержания гемоглобина (а) и средней концентрации гемоглобина в эритроците (б) в крови лабораторных крыс в трех экспериментальных группах (пунктирной линией обозначены границы нормы: для содержания гемоглобина – 110–170 г/л; для средней концентрации гемоглобина в эритроците – 310–370 г/л)

Fig. 2. Histogram of hemoglobin content (a) and mean hemoglobin concentration in erythrocyte (b) in the blood of laboratory rats in three experimental groups (dotted line indicates normal limits: hemoglobin content – 110–170 g/L; mean hemoglobin concentration in erythrocyte – 310–370 g/L)

U-критерия Манна – Уитни показал достоверные различия по концентрации гемоглобина между всеми группами ($p \leq 0,05$). Также внутригрупповой анализ (критерий Фридмана) выявил значимое увеличение средней концентрации гемоглобина в эритроците ($p \leq 0,05$) в группе, потреблявшей продукт на основе трюфеля, с $363,6 \pm 3$ до $377,1 \pm 2,6$ г/л (рис. 2, б).

Одной из причин увеличения уровней гемоглобина и среднего содержания гемоглобина у животных, питав-

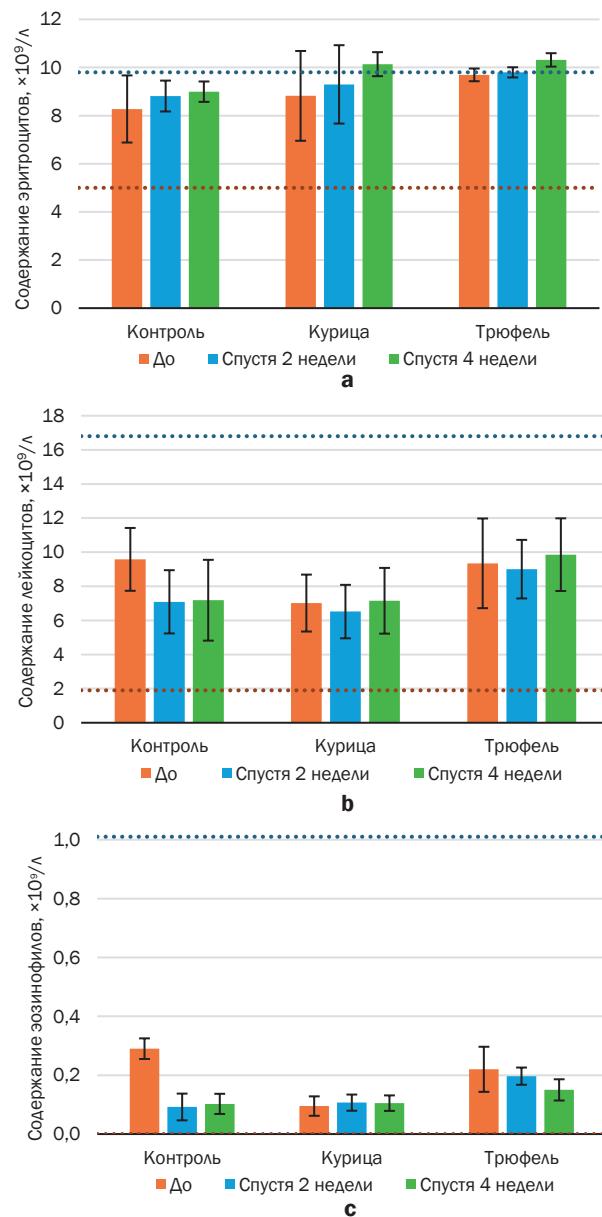


Рис. 3. Гистограмма содержания эритроцитов (а), лейкоцитов (б) и эозинофилов (с) в крови лабораторных крыс в трех экспериментальных группах (пунктирной линией обозначены границы нормы: для эритроцитов – $(5,0–9,8) \times 10^9/\text{л}$; для лейкоцитов – $(1,9–16,8) \times 10^9/\text{л}$; для эозинофилов – $(0,00–1,01) \times 10^9/\text{л}$)

Fig. 3. Histogram of erythrocyte (a), leukocyte (b) and eosinophil (c) content in the blood of laboratory rats in three experimental groups (the dotted line indicates the limits of normal: erythrocyte – $(5.0–9.8) \times 10^9/\text{L}$; leukocyte – $(1.9–16.8) \times 10^9/\text{L}$; eosinophil – $(0.00–1.01) \times 10^9/\text{L}$)

шихся трюфелевыми грибами, может быть высокое содержание железа в трюфелях (52,3 мг на 100 г) [13]. Железо является одним из ключевых компонентов гемоглобина – белка, ответственного за транспорт кислорода в крови по всему организму. Кроме того, железо входит в состав миоглобина – белка, который запасает кислород в мышцах, обеспечивая их работу во время физической активности. Железо также участвует в энергетическом метаболизме, являясь частью ферментов дыхательной цепи, которые производят энергию (аденозинтрифосфат) в митохондриях [20]. Трюфели, богатые железом, могут служить ценным источником данного микроэлемента. Это может объяснить более высокие показатели концентрации гемоглобина и средней концентрации гемоглобина в эритроците у крыс, получавших продукт из порошка трюфелей в рационе. Кроме того, трюфели содержат различные биологически активные вещества, которые могут способствовать стимуляции кроветворения и улучшению метаболических процессов.

Остальные гематологические показатели, такие как количество эритроцитов, лейкоцитов и эозинофилов, оставались в пределах физиологической нормы на протяжении всего исследования (рис. 3). Это свидетельствует о том, что употребление белка из черного трюфеля не вызывает значительных изменений в составе крови и не провоцирует аллергических реакций. Таким образом, результаты указывают на хорошую переносимость и

отсутствие токсического или аллергенного воздействия при длительном употреблении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование подтвердило положительные эффекты от употребления пищевой добавки на основе порошка из черных трюфелей. Полученные в ходе эксперимента данные указывают на его положительное влияние на мышечный тонус и процессы кислородного обмена. Группа животных, употребляющая в пищу данную добавку, показала увеличение силы хвата, а также снижение массы тела по сравнению с контрольной группой. Кроме того, в данной группе наблюдали повышение уровня гемоглобина и средней концентрации гемоглобина в эритроцитах, что может свидетельствовать о благоприятном влиянии трюфеля на процессы кроветворения и кислородного обмена. Анализ таких гематологических показателей, как общее число лейкоцитов и эозинофилов, подтвердил отсутствие аллергических и токсических реакций, что говорит о безопасности данного продукта. Высокая пищевая ценность черного трюфеля, обусловленная богатым аминокислотным составом, наличием антиоксидантов и биологически активных соединений, делает его перспективным компонентом для производства функционального питания и разработки биологически активных добавок.

REFERENCES

- 1.** Üstün N.Ş., Bulam S., Pekşen A. Biochemical properties, biological activities and usage of truffles. In: International Congress on Engineering and Life Science: Proceedings of the conference. 26–29 April 2018, Kastamonu. Kastamonu, 2018, p. 772–778.
- 2.** Assemie A., Abaya G. The effect of edible mushroom on health and their biochemistry. *International Journal of Microbiology*. 2022;8744788. DOI: 10.1155/2022/8744788.
- 3.** Hadi I.A. The nutritional value and specific properties of some truffle and red meat products. *Plant Archives*. 2020;20(2):779-782. DOI:10.13140/RG.2.2.18009.65124.
- 4.** Chauhan O.P., Vijay V., Pandey A.K., Semwal A.D. Biochemical and health properties of truffles. *Defence Life Science Journal*. 2021;6(3):251-258. DOI: 10.14429/dlsj.6.15659.
- 5.** Laganà V.R., Lombardi F., Di Gregorio D., Nicolosi A. Consumption preferences for truffles and truffle-based products: an application of the PLS-SEM model. *Sustainability*. 2024;16(12):5002. DOI: 10.3390/su16125002.
- 6.** Lee H., Nam K., Zahra Z., Farooqui M.Q.U. Potentials of truffles in nutritional and medicinal applications: a review. *Fungal Biology and Biotechnology*. 2020;7:9. DOI: 10.1186/s40694-020-00097-x.
- 7.** Shah N.N., Hokkanen S., Pastinen O., Eljamil A., Shamekh S. A study on the fatty acid composition of lipids in truffles selected from Europe and Africa. *3 Biotech*. 2020;10:415. DOI: 10.1007/s13205-020-02414-y.
- 8.** Tejedor-Calvo E., Amara K., Reis F.S., Barros L., Martins A., Calhelha R.C., et al. Chemical composition and evaluation of antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of *Tuber* and *Terfezia* truffles. *Food Research International*. 2021;140:110071. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.110071.
- 9.** Dahham S.S., Al-Rawi S.S., Ibrahim A.H., Majid A.S.A., Majid A.M.S.A. Antioxidant, anticancer, apoptosis properties and chemical composition of black truffle *Terfezia claveryi*. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2018;25(8):1524-1534. DOI: 10.1016/j.sjbs.2016.01.031.
- 10.** Jeong H.-G., Im S.-B., Kim K.-J., Jin S.-W., Koh Y.-W., Ha N.-I., et al. Useful components of *Tuber melanosporum*, *Tuber aestivum*, and *Tuber magnatum* used as truffles. *Journal of Mushrooms*. 2022;20(4):227-234. (In Korean). DOI: 10.14480/JM.2022.20.4.227.
- 11.** Özderin S., Allı H., Kivrak, İ. Nutrient elements contained in *Tuber aestivum* (summer truffle) mushroom. *Mantar Dergisi*. 2024;15:118-127. DOI: 10.30708/mantar.1582227.
- 12.** Pludowski P., Holick M.F., Pilz S., Wagner C.L., Hollis B.W., Grant W.B., et al. Vitamin D effects on musculoskeletal health, immunity, autoimmunity, cardiovascular disease, cancer, fertility, pregnancy, dementia and mortality – a review of recent evidence. *Autoimmunity Reviews*. 2013;12(10):976-989. DOI: 10.1016/j.autrev.2013.02.004.
- 13.** Segneanu A., Sfirloaga P., David I., Balcu I., Grozescu I. Characterisation of truffles using electrochemical and analytical methods. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 2012;7:199-205.
- 14.** Elkhateeb W., Daba G., Somasekhar T., Gundaju N.R. The precious truffles: bioactive compounds as a source of various biological activities. *Environmental Science Activities*. 2024;3(2):40-50. DOI: 10.5281/zenodo.12625345.
- 15.** Marathe S.J., Hamzi W., Bashein A.M., Deska J., Seppänen-Laakso T., Singhal R.S., et al. Anti-angiogenic and anti-inflammatory activity of the summer truffle (*Tuber aestivum* Vittad.) extracts and a correlation with the chemical constituents identified therein. *Food Research International*. 2020;137:109699. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109699.
- 16.** Lino-de-Oliveira C., De Lima T.C.M., de Pádua Carobrez A. Structure of the rat behaviour in the forced swimming

test. *Behavioural Brain Research*. 2005;158(2):243-250. DOI: 10.1016/j.bbr.2004.09.004.

17. Lee Y., Kim J.-H., Hong Y., Lee S.-R., Chang K.-T., Hong Y. Prophylactic effects of swimming exercise on autophagy-induced muscle atrophy in diabetic rats. *Laboratory Animal Research*. 2012;28(3):171-179. DOI: 10.5625/lar.2012.28.3.171.

18. Meyers E.C., Granja R., Solorzano B.R., Romeo-Ortega M., Kilgard M.P., Rennaker R.L., et al. Median and ulnar nerve injuries reduce volitional forelimb strength in

rats. *Muscle & Nerve*. 2017;56(6):1149-1154. DOI: 10.1002/mus.25590.

19. Lee G., Goosens K.A. Sampling blood from the lateral tail vein of the rat. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*. 2015;99:e52766. DOI: 10.3791/52766.

20. Abbaspour N., Hurrell R., Kelishadi R. Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Sciences: The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*. 2014;19(2):164-174.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вавилина Татьяна Николаевна,
лаборант-исследователь,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
✉ t.vavilina03@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-9725-9523>

Малыгина Екатерина Владимировна,
старший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
cat.malygina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2673-0226>

Бельшшенко Александр Юрьевич,
научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
al.belyshenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8812-2250>

Имидоева Наталья Александровна,
младший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
nat.imidoeva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6327-5517>

Жиленков Владимир Михайлович,
лаборант-исследователь,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
vladimirzhilenkov.0@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-0908-1419>

Моргунова Мария Михайловна,
старший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
marymikhmorg@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7939-1432>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana N. Vavilina,
Laboratory Assistant-Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
✉ t.vavilina03@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-9725-9523>

Ekaterina V. Malygina,
Senior Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
cat.malygina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2673-0226>

Aleksandr Yu. Belyshenko,
Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
al.belyshenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8812-2250>

Natalia A. Imidoeva,
Junior Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
nat.imidoeva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6327-5517>

Vladimir M. Zhilenkov,
Laboratory Assistant-Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
vladimirzhilenkov.0@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-0908-1419>

Maria M. Morgunova,
Senior Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
marymikhmorg@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7939-1432>

Дмитриева Мария Егоровна,
старший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1,
Российская Федерация,
marrie.dmitrieva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9229-1954>

Шелковникова Виктория Николаевна,
инженер-исследователь,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
shelkovnikova551@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4411-7521>

Баталова Анна Александровна,
студент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
ann.batalovaa@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-1343-4544>

Аксёнов-Грибанов Денис Викторович,
к.б.н., доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
denis.axengri@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2020-6084>

Вклад авторов

Т.Н. Вавилина – проведение исследования, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.
Е.В. Малыгина – курирование данных.
А.Ю. Бельшенко – проведение исследования.
Н.А. Имидоева – формальный анализ.
В.М. Жиленков – проведение исследования.
М.М. Моргунова – формальный анализ.
М.Е. Дмитриева – формальный анализ.
В.Н. Шелковникова – формальный анализ.
А.А. Баталова – формальный анализ.
Д.В. Аксёнов-Грибанов – научное руководство, предоставление ресурсов, редактирование текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.04.2025.
Одобрена после рецензирования 17.06.2025.
Принята к публикации 26.11.2025.

Maria E. Dmitrieva,
Senior Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
marrie.dmitrieva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9229-1954>

Victoria N. Shelkovnikova,
Engineer,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
shelkovnikova551@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4411-7521>

Anna A. Batalova,
Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
ann.batalovaa@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-1343-4544>

Denis V. Axenov-Gribanov,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
denis.axengri@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2020-6084>

Contribution of the authors

Tatyana N. Vavilina – investigation, validation, visualization, writing – original draft.
Ekaterina V. Malygina – data curation.
Aleksandr Yu. Belyshenko – investigation.
Natalia A. Imidoeva – formal analysis.
Vladimir M. Zhilenkov – investigation.
Maria M. Morgunova – formal analysis.
Maria E. Dmitrieva – formal analysis.
Victoria N. Shelkovnikova – formal analysis.
Anna A. Batalova – formal analysis.
Denis V. Axenov-Gribanov – supervision, resources, editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 03.04.2025.
Approved after reviewing 17.06.2025.
Accepted for publication 26.11.2025.