

Спортивное питание

Sport nutrition

Научная статья

УДК 664.696.9

DOI: 10.14529/hsm250315

ЗЕРНОВЫЕ БИОБЕЗОПАСНЫЕ НАПИТКИ ДЛЯ СПОРТИВНОЙ НУТРИЦЕВТИКИ

И.Ю. Потороко, potorokoi@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3059-8061>

А.А. Руськина, ruskinaaa@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2451-9339>

А.В. Малинин, malininav@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9270-5945>

А.И. Ненашев, genri50374@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6881-8963>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. **Цель:** разработка биобезопасного напитка на основе зернового сырья, применимого для спортивной нутрицевтики в качестве источника дополнительной полезности рационов. **Материалы и методы:** квантово-химические вычисления с использованием метода Ground state Hartree-Fock (HF); молекулярное моделирование типов связей с использованием стратегии *in silico*; ИК-Фурье-спектроскопия для исследования функциональных групп, определяющих полезность зерновых напитков; АОА методом DPPH (%); индекс биоактивности (ИБА, %) путем моделирования процесса переваривания *in vitro*; общая токсичность с использованием тест-организмов – инфузории вида *Paramecium caudatum*. **Результаты.** В результате проведения исследований подтверждается антиоксидантная активность зерновых напитков на уровне от 43 до 57 %, DPPH; прослеживаются значения ИБА на уровне от 69,82 до 74,24 % для всех модельных образцов, что дает основание для их использования в качестве напитков-нутрицевтиков. В отношении рисков биобезопасности проведена дифференциация рисков миграции микотоксинов (МТ) вторичных метаболитов *Fusarium spp.* в частности, Зеараленона (ZEN) и вторичного метаболита Zeranол, определены наиболее устойчивые связи с белками зерновой матрицы для обеспечения безопасности. **Заключение.** Разработанный подход может быть рекомендован для внедрения на предприятиях пищевой отрасли в условиях стратегии разработки импортозамещающих технологий и ресурсосбережения вторичного сырья.

Ключевые слова: спортивная нутрицевтика, биобезопасность, зерновые напитки, нетепловое обеззараживание, добавленная полезность

Благодарности. Статья выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта 24-16-20028.

Для цитирования: Зерновые биобезопасные напитки для спортивной нутрицевтики / И.Ю. Потороко, А.А. Руськина, А.В. Малинин, А.И. Ненашев // Человек. Спорт. Медицина. 2025. Т. 25, № 3. С. 112–122. DOI: 10.14529/hsm250315

Original article
DOI: 10.14529/hsm250315

BIOSAFE GRAIN-BASED DRINKS FOR SPORTS NUTRACEUTICALS

I.Yu. Potoroko, potorokoi@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3059-8061>

A.A. Ruskina, ruskinaaa@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2451-9339>

A.V. Malinin, malinina@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9270-5945>

A.I. Nenashev, genri50374@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6881-8963>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aim. This study aimed to develop a biosafe grain-based drink for sports nutraceutical applications, providing enhanced nutritional value. **Materials and methods.** The multimethod approach incorporated ground-state quantum chemical calculations (Hartree-Fock method, HF); *in silico* molecular dynamics simulations of binding; Fourier transform infrared spectroscopy for functional group characterization; DPPH assay for antioxidant activity analysis (AOA) (%); bioactivity index (BAI, %) through *in vitro* gastrointestinal modeling; and biosafety assessment using *Paramecium caudatum* toxicity assay. **Result.** The optimized grain-based drink exhibited antioxidant activity (43–57%, DPPH) and bioactivity (69.82–74.24% BAI) across all model samples, supporting its potential application as a functional nutraceutical product. Regarding biosafety, the migration risks of *Fusarium spp.* mycotoxins (MT), particularly Zearalenone (ZEN) and its derivative zeranone, were identified. These metabolites form stable bonds with grain matrix proteins, ensuring product safety. **Conclusion.** The methodology aligns with import-substitution strategies and agro-industrial by-product valorization.

Keywords: sports nutraceuticals, biosafety, grain-based drinks, non-thermal disinfection, added value

Acknowledgements. This research was supported by the Russian Science Foundation (RSF) under grant number 24-16-20028.

For citation: Potoroko I.Yu., Ruskina A.A., Malinin A.V., Nenashev A.I. Biosafe grain-based drinks for sports nutraceuticals. *Human. Sport. Medicine*. 2025;25(3):112–122. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm250315

Введение. Растительные безалкогольные напитки на основе зернового сырья с учетом новых технологических решений как источник природных протеинов и углеводов являются полноценным дополнением к рационам питания спортсменов при физических нагрузках [13]. Доказано, что за счет натуральности макро- и микронутриентного состава напитки данной группы эффективны в спортивной нутрицевтике, так как эффективно обеспечивают гидратацию, снижают стресс и усталость после интенсивной физической нагрузки, повышая уровень энергетического «депо». Кроме того, доказана их уникальная способность блокировать развитие старения организма и обеспечивать успешность в спорте старшей возрастной группы, в том числе спортсменов-профессионалов [3, 5].

Спортивная нутрицевтика предполагает включение в состав рационов спортсменов следующих компонентов: дикарбоновые аминокислоты (глутаминовая и аспарагиновая кислоты) как строительный материал для мышц; поливитаминные комплексы в условиях усиленных тренировок; протеины для уве-

личения мышечной массы и компенсации затрат энергии; добавки, обладающие жиросжигающим и регенерирующим действием, которые предохраняют суставы от повреждения, ускоряющие заживление травм мышц и связок). Однако формирование полноценных рационов питания при физических нагрузках весьма трудоемко с точки зрения обеспечения ресурсов организма, прежде всего компенсации энергетических затрат на стадии периода восстановления [11].

Исследователи доказывают, что помимо пищевых добавок и медицинских препаратов пищевой состав основных рационов спортсменов может являться потенциальным источником непреднамеренного допинга [15], что законодательно определено в Общероссийских антидопинговых правилах, утвержденных приказом Минспорта России № 464 от 24.06. 2021 г. Сформирован реестр, который включает спортивное питание (например, спортивные напитки/батончики/гели, протеиновые порошки), отдельные питательные вещества с минералами или витаминами и эргогенные добавки (например, кофеин, креатин),

а также травяные/растительные продукты, в перечне продукты, обогащенные определенными ингредиентами (например, обогащенные витаминами/минералами) и многокомпонентные препараты [12]. Пищевые добавки определяются как: пища, пищевой компонент, питательное вещество или непищевое соединение, которое целенаправленно употребляется в дополнение к обычно потребляемому рациону с целью достижения определенной пользы для здоровья и/или работоспособности [12].

Рост популярности спортивных напитков можно объяснить повышенным осознанием физиологических требований, необходимых для достижения оптимальных результатов в спорте [9]. Спортивные напитки можно определить как напитки, специально разработанные для употребления до или во время физической активности с целью предотвращения обезвоживания, доставки необходимых электролитов (таких как натрий, калий и кальций), обеспечения углеводов и иногда добавления витаминов или других питательных веществ [8].

На фоне предлагаемых разработок в области спортивных напитков в приоритетах важности – использование натуральных ингредиентов на основе местного растительного сырья, в том числе зернового, способного улучшать работоспособность и скорость восстановления и обеспечивать дополнительную пользу для здоровья за счет антиоксидантных, противовоспалительных и др. свойств [6, 7, 14].

Анализ нутриентного состава зерна пшеницы как сырья для технологии зерновых напитков позволяет обоснованно включать их в рационы питания при интенсивных физических нагрузках с целью компенсации стрессовых состояний мышечных систем, а сочетание витаминов и антиоксидантов способствует укреплению иммунитета, формируя

мощный барьер для заболеваний. Клетчатка зерна пшеницы стимулирует работу желудочно-кишечного тракта, а пектины позволяют вывести из организма вредные вещества и ускоряют регенерацию слизистой оболочки желудка.

Однако при видимой полезности зерновые культуры в длинной цепочке товародвижения могут стать потенциальным источником рисков непреднамеренного допинга. Так, в экстремальных условиях глобального изменения климата в зону наблюдений рисков включены вторичные метаболиты отдельных видов токсигенных плесеней, в частности микромицетов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* and *Fusarium*. Так, *Zeranol*, известный как *Ralgro*, является вторичным метаболитом микотоксина Зеараленона (ZEN), продуцируемого *Fusarium spp.* во время роста злаковых и на этапах хранения при нарушении условий. *Zeranol* (рис. 1) относится к лактонам резорциновой кислоты (RALs), а будучи нестероидным анаболическим средством, запрещен к использованию в спорте, также с 2019 года официально запрещен к использованию в животноводстве [11].

Вместе с тем *Zeranol* может быть синтезирован искусственно из ZEN путем гидрирования, продукт экстракции включает смесь α -зеранола и β -зеранола, а структурно связанный с микотоксином ZEN может образовываться *in vivo* в организме животного.

Следовательно, естественное присутствие микотоксинов вторичных метаболитов *Fusarium spp.* в злаках (кукуруза, пшеница и др.) может обусловить на фоне случайного применения *Zeranol* непреднамеренные допинговые проблемы [10, 14].

Для оценки вклада пищевых рационов в спортивную нутрицевтику и прогнозирования возможности исключения обозначенных

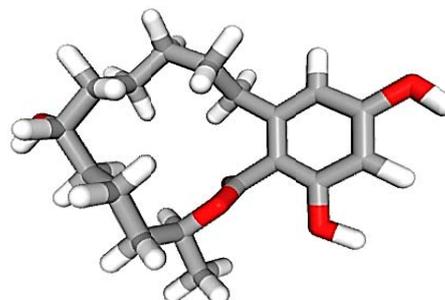
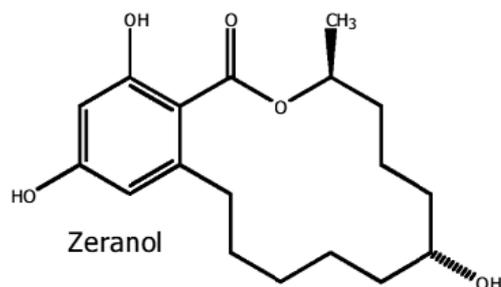


Рис. 1. Химическая структура Zeranol
Fig. 1. Chemical structure of Zeranol

рисков необходимы глубокие исследования, раскрывающие присутствие токсичных соединений в продуктах повседневного рациона, и поиск решений для минимизации возможных проблем.

Цель научного исследования: разработка биобезопасного напитка на основе зернового сырья, применимого для спортивной нутрицевтики в качестве источника дополнительной полезности рационов.

Методология и методы исследования. Достижение цели возможно за счет разработки новых технологических решений получения биобезопасных зерновых напитков, обладающих свойствами полезности, способных компенсировать негативное влияние длительных физических нагрузок на организм человека. Работа осуществлялась поэтапно с учетом комплексности решаемых задач в последовательности от прогностических исследований до формирования доказательной базы данных, применимой в технологиях.

Прогностические исследования оценки безопасности проводили на основе: 1) квантово-химических вычислений с использованием метода Ground state Hartree-Fock (HF) с применением базисного набора 3-21G/ RB3LYP; 2) стратегии *in silico* «Докинг-анализ». Молекулярное моделирование типов связей проводили с использованием AutoDock 4.2. Стыковку осуществляли методом генетического алгоритма Ламарка (LGA) и проанализировали с использованием инструмента визуализации молекулярной графики PyMOL [1].

В качестве объектов для исследования использовали две партии зерна пшеницы (*Triticum aestivum*) мягкой продовольственной и модельные образцы зерновых напитков. Технология зерновых напитков включала следующие этапы: замачивание (в течение 24–48 часов при температуре 18–20 °С); промывка и мокрое измельчение в гидромодуле 1:2; гомогенизация и настаивание (гидромодуль 1:5 в течение 2 часов при температуре 50 °С); грубая и тонкая фильтрация; пастеризация.

Для обеспечения добавленной полезности готовых зерновых напитков-нутрицевтиков применяли низкочастотный ультразвуковой гомогенизатор Q700 Sonicator (мощность 700 Вт) с зондом 1/2 от Qsonica, длительность воздействия 30 с (40 кГц, 180 Вт).

Для обеспечения биобезопасности применяли «зеленые» технологии нетеплового воздействия на основе атмосферной холодной

плазмы (АХП) в разности потенциалов воздействующих полей 8–15 кВт, частота 100 Гц, длительность импульса 1–100 мс (Патент RU 2794769 C1) [2, 4].

Исследование нутритивной полезности и безопасности проводилось с использованием: ИК-Фурье-спектроскопии на приборе UV-3600 (Shimadzu, Япония), оснащенном высокочувствительным термостабильным детектором DLATGS; общей антиоксидантной активности спектрофотометрически при 515 нм по оценке поглощающей способности свободного радикала DPPH (%); индекса биоактивности (ИБА) путем моделирования процесса переваривания *in vitro* последовательно в три фазы: ротовой полости (рН 6, фермент амилаза); фаза желудка (рН 2,5, фермент пепсин свиной); фаза тонкого кишечника (рН 6,5–7, ферменты панкреатин и липаза), в фильтрате определяется количество АОА (DPPH, %).

Культуру ожидаемой токсигенной микробиоты рода *Fusarium spp.* получали с использованием способа приготовления живых препаратов для световой микроскопии. Микологическую зараженность оценивали методом высевания на среду Чапека (ГОСТ 12044-93) с использованием электронного микроскопа высокого разрешения Jeol JEM-2100; общую токсичность оценивали на комплексе «Био-Лат» с использованием тест-организмов вида *Paramecium caudatum* (ГОСТ 31674-2012).

Результаты. На первом этапе исследований проводили квантово-химический расчет и молекулярное моделирование рисков миграции вторичных метаболитов *Fusarium spp.* микотоксина ZEN в протеиновом комплексе зернового сырья в напитки с целью определения рисков последующих *in-vivo* трансформаций ZEN в метаболит Zeranol.

Виды рода *Fusarium spp.* способны продуцировать широкий спектр МТ, среди которых наиболее распространенными и опасными являются Дезоксиниваленол (ДОН), Т-2-токсин, ZEN. Результаты квантово-химических расчетов по перечисленным МТ, полученные методом GFN2-хТВ, представлены в табл. 1.

В исследованиях учитывались следующие показатели: общая энергия (Total energy), энергия молекулярных орбиталей HOMO и LUMO, размер энергетического зазора HOMO-LUMO (Homo-LUMO gap), энергия отталкивания электронов (Repulsion energy), вибрационные частоты ИК-спектров, карты электростатического потенциала.

Наибольшее значение энергии отталкивания (Repulsion energy) определено для Т-2-токсина и составляет 1,022 Eh (Энергия Хартри). Последовательность, выстроенная по значению показателя Eh: Т-2 (1,022) > ZEN (0,899) > ДОН (0,673). Значение Total energy, Eh определяет аналогичную последовательность: Т-2 (-95,94) > ZEN (-70,4) > ДОН (-66,64).

Меньший НОМО-LUMO gap часто коррелирует с повышенной реактивностью, так как для возбуждения требуется меньше энергии. Некоторая локализация молекулярных орбиталей НОМО- и LUMO-микотоксинов представлена в табл. 2.

Представленные данные позволяют фиксировать связывающие, не связывающие и

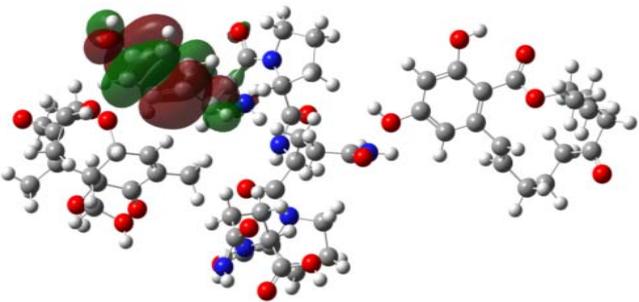
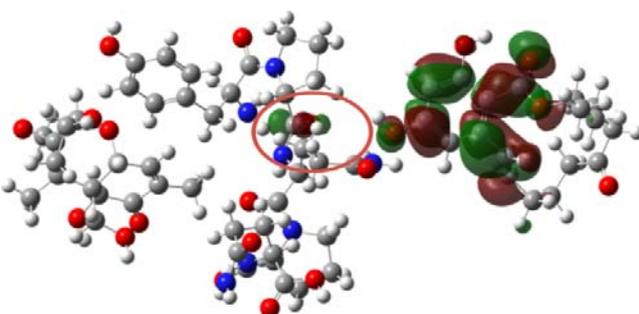
Таблица 1
Table 1

Результаты квантово-химических расчетов микотоксинов с использованием метода GFN2-хТВ
Quantum chemical properties of mycotoxins calculated using the GFN2-хТВ method

Расчетный параметр Calculated parameter	Микотоксины <i>Fusarium spp.</i> / <i>Fusarium spp.</i> mycotoxins		
	ДОН / DON	ЗЕН / ZEN	Т-2-токсин / T-2 toxin
Полная энергия, Eh Total energy, Eh	-66,64	-70,04	-95,94
Энергия НОМО, эВ HOMO energy, eV	-10,2796	-10,2924	-10,7203
Энергия LUMO, эВ LUMO energy, eV	-7,3719	-7,3905	-6,3588
НОМО-LUMO зазор, эВ HOMO-LUMO gap, eV	2,9076	2,9018	4,361
Энергия отталкивания, Eh Repulsion energy, Eh	0,673	0,899	1,022

Таблица 2
Table 2

Локализация молекулярных орбиталей НОМО и LUMO в белково-лигандном комплексе
Spatial localization of HOMO and LUMO orbitals in protein-ligand complexes

КОМПЛЕКС (Глиадин/ДОН/ ЗЕН) / COMPLEX (Gliadin/DON/ZEN)	
Расчетный параметр / Calculated parameter	
Электронная энергия, Хартри: -4272,59 / Electronic Energy, Hartree: -4272,59	
Дипольный момент, Дебай: 9,448 / Dipole Moment, Debye: 9,448	
Молекулярные орбитали / Molecular orbitals	
НОМО	
LUMO	

разрыхляющие молекулярные орбитали, что важно при оценке миграции МТ в продукты переработки и определении метода блокирования в нутритивной матрице.

При анализе молекулярных орбиталей НОМО и LUMO наблюдаются как связывающие, так и разрыхляющие орбитали. У белково-лигандного комплекса, состоящего из белка зерна Глиадина и микотоксинов ДОН и ZEN, наблюдается образование LUMO-орбиталей между белками и микотоксином ZEN (см. табл. 2, выделение красным).

Электронная энергия белково-лигандного комплекса Глиадин/ДОН /ZEN, согласно прогнозам, составила $-4272,59$, что значительно влияет на стабильность молекул через распределение электронной плотности между атомами и формирует равновесность конфигурации системы за счет расположения ядер в пространстве. Дипольный момент ($9,448$) является мерой полярности молекулы, указывающей на разделение положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы, что увеличивает прочность связи.

Анализ стыковки ZEN и метаболита Zeranol (ZRNL) с α -глиадином (8W83) и γ -глиадином (4D8P) (рис. 2) выявил различное сродство к связыванию и характер взаимодействия. ZEN связывается с обоими белками сильнее, о чём свидетельствует его более отрицательная энергия связи ($-7,9$ ккал/моль с γ -глиадином и $-8,5$ ккал/моль с α -глиадином) по сравнению с ZRNL ($-6,7$ ккал/моль и $-7,2$ ккал/моль соответственно). Это позволяет предположить,

что ZEN образует более стабильные комплексы с фракциями глиадина, вероятно, благодаря своей структурной гибкости и способности к множественным взаимодействиям.

ZTN демонстрирует более сильные и разнообразные взаимодействия с протеинами зерна пшеницы, чем ZRNL, что объясняется его способностью образовывать водородные связи, гидрофобные контакты и пи-взаимодействия.

Это предполагает, что ZRL может обладать более высокой склонностью к связыванию с белками пшеницы, что потенциально влияет на его биодоступность или токсичность в пищевых системах. Более слабое связывание ZRNL может быть связано с его более простой структурой и меньшим количеством участков взаимодействия, следовательно, высока вероятность миграции в матрицу напитков.

Результаты прогностических исследований определили необходимость включения в технологию получения зерновых напитков процесса обеззараживания токсигенных микробиот на основе применения эффектов «зеленых» нетепловых методов воздействия (УЗВ и АХП). Сформирована линейка модельных образцов зерновых напитков на основе зернового сырья пшеницы продовольственной двух партий, подвергнутого нетепловым воздействиям в описанных ранее режимах.

На втором этапе исследований в аспекте применимости для спортивной нутрицевтики модельные образцы зерновых напитков оценивались по показателям биобезопасности

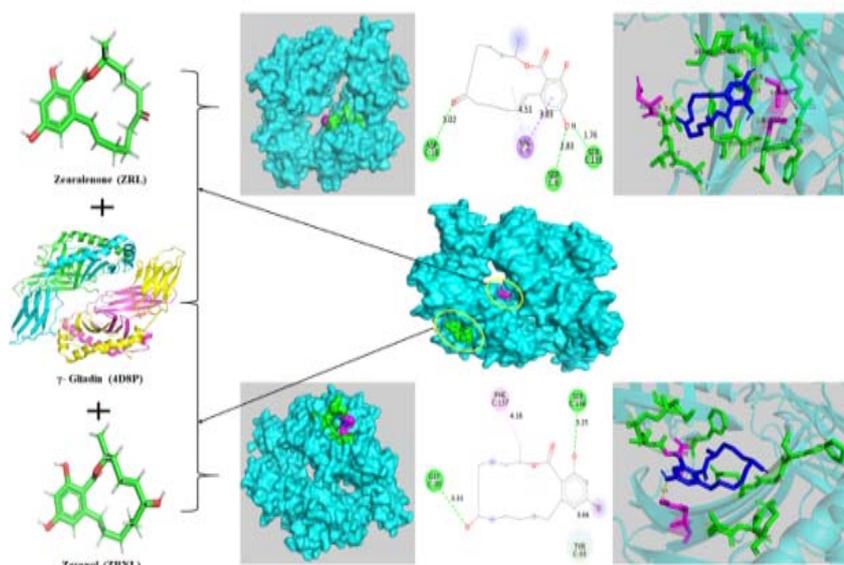


Рис. 2. Взаимодействие зеараленона и зеранола с γ -глиадином (4D8P)
Fig. 2. Interactions of Zearalenone and Zeranol with γ -Gliadin (4D8P)

и пищевой полезности. Следует отметить, что органолептически напитки имели приемлемые потребительские характеристики, а использование нетеплового воздействия заметно улучшало структуру, консистенцию и внешний вид.

Анализ общей токсичности по значению коэффициента выживаемости *Paramecium caudatum* стал оценочным критерием для скрининга биобезопасности. Результаты степени токсичности напитков по средней выживаемости варьируют в диапазоне для напитков первой партии зерна (партия 1) от 92 ± 10 до 150 ± 10 %, что определяет уровень «нетоксично» для всех модельных образцов напитков данной партии; напитков второй партии зерна (партия 2) от 53 ± 10 до 138 ± 10 %, что определяет уровень «слаботоксично» напитков исходного сырья и после УЗВ-обработки и уровень «нетоксично» после обеззараживания на основе АХП. Установлены образцы с критическими значениями показателя общей токсичности в диапазоне от 53 до 75 %, средние значения ОМЧ достигали $11,2 \times 10^4$ КОЕ/г, количество плесеней – $7,0 \times 10^3$ КОЕ/г.

Макро- и микроскопически были идентифицированы преобладающие микромицеты рода *Aspergillus* и *Fusarium spp.*, обуславливающие потенциальные риски накопления микотоксинов. Методом MALDI TOF установлен диапазон количества плесневых грибов в исходных пробах зерна от $1,6 \times 10^3$ до $2,3 \times 10^5$ КОЕ/г. Наибольший коэффициент идентификационного сора зафиксирован для следующих видов: *Fusarium spp.* (скор 1.959), *Aspergillus flavus* (скор 1.918), *Aspergillus parasiticus* (скор 2.054).

Контроль биобезопасности проб зерна на присутствие микотоксинов дал положительные результаты идентификации вторичного метаболита *Fusarium spp.* – Дезоксиниваленол (ДОН) на уровне 58 мкг/кг и отрицательный результат на присутствие Зеараленона (ZEN), что тем не менее в целях предупреждения рисков определяет необходимость применения технологий обеззараживания исходного зернового сырья.

Оценка потенциальной биоактивности образцов напитков (табл. 3) на модели пищеварения *in vivo* позволила спрогнозировать миграцию биоактивных нутриентов зерна пшеницы в напитки, формируя их нутритивную полезность. Важным фактором, определяющим нутритивную полезность напитков

для спортивного питания на фоне биобезопасности, выступает скорость включения пищевых нутриентов в процессы метаболизма и восстановления энергетического депо организма после физической нагрузки.

Используя «зеленые» технологии при производстве зерновых напитков, возможно обеспечить не только сохранение ценных макро- и микронутриентов, но обеспечить эффективность их усвоения, о чем свидетельствуют представленные результаты. В совокупности природных антиоксидантов пищевых злаков большая их часть содержится во внешней оболочке зерен, отруби содержат до 80 % антиоксидантов, поэтому цельные продукты переработки зерна являются неоспоримо более полезными.

Оценивая данные суммарного содержания антиоксидантов (ССА галловая кислота, мг/100г) для зерна пшеницы, которые составляют от 36 до 63 мг/100 г в сопоставлении со значениями общей антиоксидантной активности напитков, можно отметить устойчивые высокие значения на уровне от 43 до 57 %, DPPH.

Состояние дисперсии композиции напитков зависит от исходного состояния зерновой массы и используемого метода нетеплового воздействия. Фактические изменения дисперсии напитка, безусловно, определяют доступность нутриентов к перевариванию, но индекс биоактивности указывает на полноценное наполнение системы организма биоактивными компонентами антиоксидантного действия. Прослеживаются значения ИБА в третьей фазе тонкого кишечника на уровне от 69,82 до 74,24 % для всех модельных образцов напитков независимо от партии сырья. Результаты оценки потенциальной биоактивности модельных образцов зерновых напитков согласуются с данными ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 3).

Полосы поглощения при 3460 см^{-1} , 2918 см^{-1} , 1645 см^{-1} , 1541 см^{-1} , 1030 см^{-1} и 573 см^{-1} соответствуют: спиртовым связям O–H (предполагает наличие гидроксильных групп), C–H (алифатический углеводород), C=O (полоса амид I указывает на связь с белками/пептидами или кетонами/альдегидами), C–N (деформация NH, полоса амид II), C–O (характерна для полисахаридов и простых эфирных связей) и валентным колебаниям α -гликозидных связей соответственно.

Все исследованные образцы напитков (1-я партия зерна – образцы напитков 1–3,

Таблица 3
Table 3

Результаты оценки потенциальной биоактивности
модельных образцов зерновых напитков
Bioactivity potential of model grain-based drinks

Исследуемые образцы Tested samples	Дисперсия композиции, медианное значение, (нм) Composition dispersion, median (nm)	Общая антиоксидантная активность, % (DPPH) Total antioxidant activity, % (DPPH)	Индекс биоактивности (ИБА) 3-я фаза тонкого кишечника (%) Bioactivity index (BAI) Small intestine phase 3 (%)
Модельные зерновые напитки (1-я партия зерна) Model grain-based drinks (1st grain batch)			
ЗН ₁ -контроль GD ₁ Control	140,4	59,49	74,24
ЗН ₁ -УЗВ GD ₁ -US	657,0	55,48	73,77
ЗН ₁ -АХП GD ₁ -AGP	241,3	50,76	73,82
Модельные зерновые напитки (2-я партия зерна) Model grain-based drinks (2nd grain batch)			
ЗН ₂ -контроль GD ₂ Control	236,6	57,90	69,82
ЗН ₂ -УЗВ GD ₂ -US	850,0	55,41	72,83
ЗН ₂ -АХП GD ₂ -AGP	398,0	43,18	72,78

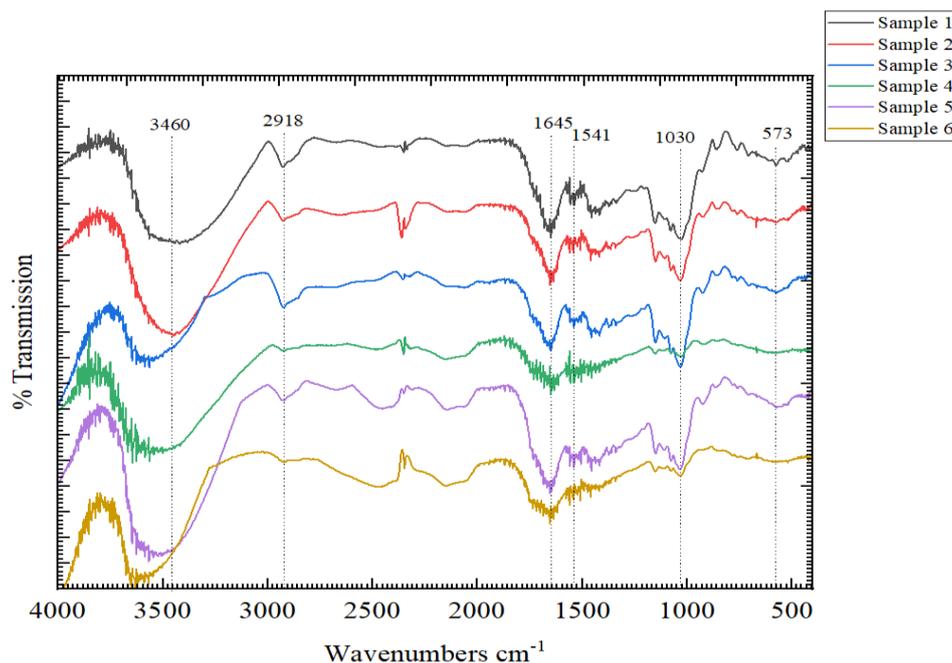


Рис. 3. Сравнение ИК-спектров образцов
Fig. 3. Comparison of FTIR spectra between samples

2-я партия зерна – образцы напитков 4–6) имеют схожие спектральные полосы, интенсивность спектров в обозначенных полосах незначительно изменяется. Тем не менее наблюдается небольшое изменение (уменьшение) интенсивности, следовательно, структура

незначительно изменяется при обработке ультразвуком (образцы 2 и 5) и атмосферной холодной плазмой (образцы 3 и 6).

Заключение. В исследовании было применено многофакторное исследование для разработки технологии биобезопасных зерно-

вых напитков-нутрицевтиков, применяемых в спортивном питании. В качестве основной цели было определено прогностическое и фактическое исследование присутствия рисков миграции микотоксинов продовольственного зернового сырья в дисперсию напитков и определены технологические подходы для минимизации рисков их возможной трансформации в организме потребителя. В качестве модели оценены «зеленые» технологии обеззараживания на основе нетепловых эффектов низкочастотного ультразвука и атмосферной холодной плазмы для исключения возможности случайного непреднамеренного проглатывания микотоксинов.

На основании полученных данных было установлено, что применение нетепловых методов обеззараживания значительно снижает общую токсичность напитков, использование эффектов атмосферного холодноплазменного воздействия обеспечивает высокую выживаемость простейших от 92 ± 10 до 150 ± 10 %,

что определяет уровень критерия оценки как «нетоксично» для всех модельных образцов напитков. Оценка присутствия в напитках вторичного метаболита Зеараленона (ZEN) показала отрицательный результат, что тем не менее в целях предупреждения рисков определяет необходимость применения технологий обеззараживания исходного зернового сырья.

Установлено, что применение «зеленых» технологий обеспечивает сохранение в напитках биоактивных свойств нативных нутриентов зерна пшеницы, что подтверждается высоким значением антиоксидантной активности на уровне от 43 до 57 %, DPPH. Прослеживаются значения ИБА в третьей фазе тонкого кишечника на уровне от 69,82 до 74,24 % для всех модельных образцов напитков.

Разработанный подход может быть рекомендован для внедрения на предприятиях пищевой отрасли в условиях стратегии разработки импортозамещающих технологий и ресурсосбережения вторичного сырья.

Список литературы

1. Молекулярный докинг растительных стабилизирующих частиц для функциональных эмульсионных пищевых систем / И.Ю. Потороко, А.М.Я. Кади, В. Анйум, А.А. Руськина // *Индустрия питания / Food Industry*. – 2023. – Т. 8, № 2. – С. 84–92. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-2-9. EDN: PGLDTN
2. Пат. 2794769 Российская Федерация. Способ обеззараживания зерновых культур и других продуктов растительного происхождения / И.Ю. Потороко, И.В. Калинина, Н.В. Науменко, А.Я. Лейви; заявитель и патентообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. – № 2022128581; заявл. 03.11.2022; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. – 10 с.
3. Полуэктова, Е.А. Нутрицевтики и «фармацевтики» / Е.А. Полуэктова, А.Г. Бениашвили, Р.В. Масленников // *Рос. журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. – 2020. – № 30 (2). – С. 68–75. DOI: 10.22416/1382-4376-2020-30-2-68-7
4. Пределы ультразвуковой коагуляции мелких частиц / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.С. Боченков, А.В. Шалунов // *Симметрия*. – 2021. – № 13. – С. 1607. DOI: 10.3390/sym13091607
5. Природные антиоксиданты. Содержание в пищевых продуктах и влияние их на здоровье и старение человека / Я.И. Яшин, В.Ю. Рыжнев, А.Я. Яшин, Н.И. Черноусова. – М.: ТрансЛит, 2009. – 193 с.
6. Растительные напитки *Avena sativa* с доказанной нутритивной и терапевтической полезностью / И.Ю. Потороко, В. Анйум, Н.П. Бондарь и др. // *Человек. Спорт. Медицина*. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 150–160. DOI: 10.14529/hsm250218
7. Хомяков, В.М. Проблема нутритивной недостаточности и методы ее коррекции у больных со злокачественными опухолями пищевода и желудка / В.М. Хомяков, В.Э. Хороненко, А.Д. Ермошина // *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена*. – 2016. – № 5 (5). – Р. 33–37. DOI: 0.17116/onkolog0165533-37
8. Committee on Nutrition and the Council on Sports Medicine and Fitness Sports drinks and energy drinks for children and adolescents: Are they appropriate? / B. Schneider, H.J. Benjamin // *Pediatrics*. – 2011. – Vol. 127 (6). – P. 1182–1189. DOI: 10.1542/peds.2011-0965
9. Determination of water-soluble vitamins in energy and sport drinks by micellar electrokinetic capillary chromatography / Navarro-Pascual-Ahuir, María & Lerma-García, María & Simó-Alfonso, Ernesto & Herrero-Martínez, José // *Food Control*. – 2015. – Vol. 63. DOI: 10.1016/j.foodcont.015.11.033

10. Development and validation of dry reagent time-resolved fluoroimmunoassays for zeranol and α -zearalenol to assist in distinguishing zeranol abuse from *Fusarium* spp. toxin contamination in bovine urine / K.M. Cooper, M. Tuomola, S. Lahdenperä et al. // *Food Additives & Contaminants*. – 2002. – Vol. 19 (12). – P. 1130–1137. DOI: 10.1080/0265203021000012411
11. Dietary Supplement and Food Contaminations and Their Implications for Doping Controls / K. Walpurgis, A. Thomas, H. Geyer and M. Thevis // *Foods*. – 2020. – Vol. 9 (8). – P. 1012. DOI: 0.3390/foods9081012
12. IOC Consensus Statement: Nutritional Supplements and High Performance Athletes / R.J. Moen, L.M. Burke, J. Dvorak et al. // *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*. – 2018. – Vol. 28. – P. 104–125.
13. Natural alternatives in sports nutrition: Formulation and quality evaluation of an isotonic sports drink using dates of Ajwa variety (*Phoenix dactylifera* L.) / Md. Shahidullah Kayshar, Juwel Rana, Md. Shoaib Arifin et al. // *Applied Food Research*. – 2024. – Vol. 4, No. 2. DOI: 10.1016/j.afres.2024.100618
14. Potential health risks of foodborne performance-enhancing drugs in competitive sports / Mao-qiong Wei, Ju'an Wang // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9. – No. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon. 2023.e21104
15. Prevalence of adulteration in dietary supplements and recommendations for safe supplement practices in sport / A.R. Jagim, P.S. Harty, J.L. Erickson et al. // *Frontiers in Sports and Active Living*. – 2023. DOI: 10.3389/fspor.2023.1239121

References

1. Potoroko I.Yu., Kadi A.M.Ya., Anyum V., Rus'kina A.A. [Molecular Docking of Plant Stabilizing Particles for Functional Emulsion Food Systems]. *Industriya pitaniya* [Food Industry], 2023, vol. 8, no. 2, pp. 84–92. (in Russ.) DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-2-9
2. Potoroko I.Iu., Kalinina I.V., Naumenko N.V., Leivi A.Ia. *Sposob obezzarazhivaniya zernovykh kul'tur i drugikh produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Method of Disinfection of Grain Crops and Other Products of Plant Origin]. Patent RF, no. 2794769, 2023.
3. Poluektova E.A., Beniashvili A.G., Maslennikov R.V. [Nutraceuticals and Pharmaceuticals]. *Rossiyskiy zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii* [Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology], 2020, no. 30 (2), pp. 68–75. (in Russ.) DOI: 10.22416/1382-4376-2020-30-2-68-75
4. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Bochenkov A.S., Shalunov A.V. [Limits of Ultrasonic Coagulation of Small Particles]. *Simmetriya* [Symmetry], 2021, no. 13, 1607. (in Russ.) DOI: 10.3390/sym13091607
5. Yashin Ya.I., Ryzhnev V.Yu., Yashin A.Ya., Chernousova N.I. *Prirodnyye antioksidanty. Soderzhaniye v pishchevykh produktakh i vliyaniye ikh na zdorov'ye i starenie cheloveka* [Natural Antioxidants. Content in Food Products and Their Effect on Human Health and Aging]. Moscow, TransLit Publ., 2009. 193 p.
6. Potoroko I.Yu., Anjum V., Bondar N.P. et al. Nutritional and Therapeutic Benefits of Plant-based Avena Sativa Beverages. *Human. Sport. Medicine*, 2025, vol. 25 (2), pp. 150–160. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm250218
7. Khomyakov V.M., Khoronenko V.E., Ermoshina A.D. [The Problem of Nutritional Deficiency and Methods of its Correction in Patients with Malignant Tumors of the Esophagus and Stomach]. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena* [Oncology. Journal P.A. Herzen], 2016, no. 5 (5), pp. 33–37. (in Russ.) DOI: 10.17116/onkolog20165533-37
8. Schneider B., Benjamin H.J. Committee on Nutrition and the Council on Sports Medicine and Fitness Sports Drinks and Energy Drinks for Children and Adolescents: Are They Appropriate? *Pediatrics*, 2011, vol. 127 (6), pp. 1182–1189. DOI: 10.1542/peds.2011-0965
9. Navarro-Pascual-Ahuir M., Lerma-García M., Simó-Alfonso E., Herrero-Martínez J. Determination of Water-soluble Vitamins in Energy and Sport Drinks by Micellar Electrokinetic Capillary Chromatography. *Food Control*, 2015, vol. 63. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.11.033
10. Cooper K.M., Tuomola M., Lahdenperä S. et al. Development and Validation of Dry Reagent Time-resolved Fluoroimmunoassays for Zeranol and α -zearalenol to Assist in Distinguishing Zeranol Abuse from *Fusarium* Spp. Toxin Contamination in Bovine Urine. *Food Additives & Contaminants*, 2002, vol. 19 (12), pp. 1130–1137. DOI: 10.1080/0265203021000012411

11. Walpurgis K., Thomas A., Geyer H., Thevis M. Dietary Supplement and Food Contaminations and Their Implications for Doping Controls. *Foods*, 2020, vol. 9 (8), p. 1012. DOI: 10.3390/foods9081012
12. Moen R.J., Burke L.M., Dvorak J. et al. IOC Consensus Statement: Nutritional Supplements and High Performance Athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2018, vol. 28, pp. 104–125.
13. Md. Shahidullah Kayshar, Juwel Rana, Md. Shoaib Arifin, Amirul Islam, Md. Mahfuzur Rob, Zannatul Ferdoush, Md. Anisur Rahman Mazumder, Md. Fahad Jubayer. Natural Alternatives in Sports Nutrition: Formulation and Quality Evaluation of an Isotonic Sports Drink Using Dates of Ajwa Variety (Phoenix Dactylifera L.). *Applied Food Research*, 2024, vol. 4, no. 2. DOI: 10.1016/j.afres.2024.100618
14. Maoqiong Wei, Ju'an Wang. Potential Health Risks of Foodborne Performance-enhancing Drugs in Competitive Sports. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21104
15. Jagim A.R., Harty P.S., Erickson J.L. et al. Prevalence of Adulteration in Dietary Supplements and Recommendations for Safe Supplement Practices in Sport. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2023. DOI: 10.3389/fspor.2023.1239121

Информация об авторах

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Руськина Алена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Малинин Артем Владимирович, ассистент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Ненасhev Александр Игоревич, студент кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Alena A. Ruskina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Artem V. Malinin, Assistant, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Alexander I. Nenashev, student of the Department of Theory and Methods of Physical Culture and Sports, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 22.03.2025

The article was submitted 22.03.2025