

УДК 664.71-11+ 664.785.6+ 664.786.6

Влияние экзогенной ГАМК на антиоксидантные свойства пророщенного зерна

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Науменко Наталья Владимировна

Адрес: 454080 г. Челябинск,

Пр. Ленина 86

E-mail: Naumenko_natalya@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования

доступны по запросу

у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Науменко, Н.В., Фаткуллин, Р.И., Калинина, И.В., Радкевич, А.В., Науменко, Е.Е., Попова, Н.В., & Васильева, Е.К.

(2023). Влияние экзогенной ГАМК на антиоксидантные свойства пророщенного зерна. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 133-146.

<https://doi.org/10.36107/spfr.2023.423>

ПОСТУПИЛА: 14.01.2023

ПРИНЯТА: 15.09.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-26-00290

Н. В. Науменко¹, Р. И. Фаткуллин¹, И. В. Калинина¹,
А. В. Радкевич², Е. Е. Науменко¹, Н. В. Попова¹, Е. К. Васильева³

АННОТАЦИЯ

Введение: Одним из путей переработки зерна является использование технологии проращивания, что позволяет повышать пищевую ценность и использовать полученное сырье в технологии создания пищевых продуктов. Среди новых подходов можно рассматривать использование растворов экзогенной γ -аминомасляной кислоты (ГАМК) в сочетании с ультразвуковым воздействием как эффективного метода повышения антиоксидантных свойств в технологии проращивания.

Цель: Выявить эффективную концентрацию экзогенной ГАМК, в наибольшей степени увеличивающей антиоксидантные свойства пророщенного зерна.

Материалы и методы: В качестве объектов исследования были выбраны следующие образцы: зерно пшеницы, ячменя и овса. Перед процессом проращивания зерно обрабатывали ультразвуковым воздействием в дистиллированной воде (контроль) и растворах экзогенной ГАМК (опыт). Применялось двух факторное планирование, переменными факторами были: концентрация ГАМК (1, 3, 5 %) и длительность проращивания (12, 24, 36 часов); контролируемым — общая антиоксидантная активность. Для оптимизированных образцов пророщенного зерна были исследована следующая номенклатура показателей: энергия и способность прорастания, содержание флавоноидов и полифенольных соединений, а также общая антиоксидантная активность.

Результаты: При помощи математического моделирования оптимизирована концентрация растворов экзогенной ГАМК и длительность процесса проращивания, которая для зерна пшеницы составила 4,1 % и 29,3 часа; для ячменя — 4,2 % и 29,5 часа и для овса — 3,1 % и 49,6 часа. Прирост показателя «Энергия прорастания» составил для зерна пшеницы 5,0 %; ячменя — 3,1 % и овса — 4,2 % относительно контроля, а для показателя «Способность прорастания» — 6,2 %; 2,0 % и 4,0 %, соответственно. В пророщенных опытных образцах содержание флавоноидов увеличивается в среднем на 18 % (зерно пшеницы); 16 % (зерно ячменя) и 64 % (зерно овса). Прирост полифенольных соединений составил — 47 %; 50 % и на 69 %, а общая антиоксидантная активность увеличилась в среднем на 20,6 %; 18,3 % и 16,6 % для образцов зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно.

Выводы: Проведенные нами исследования подтвердили, что использование растворов экзогенной ГАМК при ультразвуковом воздействии может быть использовано в качестве перспективной технологии для повышения интенсивности процессов проращивания и повышения антиоксидантных свойств пророщенного зерна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

зерно, технология проращивания, ультразвуковое воздействие, экзогенная ГАМК

The effect of exogenous gamma-aminobutyric acid on the antioxidant properties of sprouted grain

¹ South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

² ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

³ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

CORRESPONDENCE:

Natalya V. Naumenko

Address:

E-mail: Naumenko_natalya@mail.ru

FOR CITATIONS:

Naumenko, N.V., Fatkullin, R.I., Kalinina, I.V., Radkevich, A.V., Naumenko, E.E., Popova, N.V., & Vasileva, E.K. (2023). The effect of exogenous gamma-aminobutyric acid on the antioxidant properties of sprouted grain. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 133-146. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.423>

RECEIVED: 14.01.2023

ACCEPTED: 15.09.2023

PUBLISHED: 30.09.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FOUNDATION

The article was financially supported by the Russian Science Foundation grant 23-26-00290.



Natalya V. Naumenko¹, Rinat I. Fatkullin¹, Irina V. Kalinina¹, Anastasia V. Radkevich², Ekaterina Eu. Naumenko¹, Nataliya V. Popova¹, Elizaveta K. Vasileva³

ABSTRACT

Background: One of the ways of grain processing is the use of germination technology, which makes it possible to increase the nutritional value and use the resulting raw materials in the technology of creating food products. Among the new approaches, we can consider the use of solutions of exogenous gamma-aminobutyric acid (GABA) in combination with ultrasound exposure as an effective method of increasing antioxidant properties in germination technology.

Purpose: The aim of this study is to identify the effective concentration of exogenous GABA, which increases the antioxidant properties of sprouted grain to the greatest extent.

Materials and Methods: The following samples were selected as objects of research: wheat, barley and oats. Before the germination process, the grain was treated with ultrasonic exposure in distilled water (control) and solutions of exogenous GABA (experiment). Two-factor planning was used, variable factors were: GABA concentration (1, 3, 5 %) and germination duration (12, 24, 36 hours); controlled – total antioxidant activity. For optimized samples of sprouted grain, the following nomenclature of indicators were studied: energy and germination ability, the content of flavonoids and polyphenolic compounds, as well as the total antioxidant activity.

Results: Using mathematical modeling, the concentration of exogenous GABA solutions and the duration of the germination process were optimized, which for wheat grain was 4.1 % and 29.3 hours; for barley – 4.2 % and 29.5 hours and for oats – 3.1 % and 49.6 hours. The increase in the indicator «Germination energy» was 5.0 % for wheat grain; barley – 3.1 % and oats – 4.2 % relative to the control, and for the indicator «Germination ability» – 6.2 %; 2.0 % and 4.0 %, respectively. In the germinated experimental samples, the content of flavonoids increases by an average of 18 % (wheat grain); 16 % (barley grain) and 64 % (oat grain). The increase in polyphenolic compounds was 47 %; 50 % and 69 %, and the total antioxidant activity increased by an average of 20.6 %; 18.3 % and 16.6 % for wheat, barley and oat grain samples, respectively.

Conclusion: Our studies have confirmed that the use of exogenous GABA solutions under ultrasound exposure can be used as a promising technology to increase the intensity of germination processes and increase the antioxidant properties of sprouted grain

KEYWORDS

grain, germination technology, ultrasound exposure, exogenous GABA.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение рисков потери продовольственного сырья и поиск новых высокоэффективных технологий получения пищевых продуктов, в особенности из зерна, как никогда актуально для перерабатывающей отрасли (Науменко и др., 2020). В 2022 году был получен рекордный урожай зерна пшеницы, ячменя, овса, что привело к избыточному обеспечению внутреннего спроса. На сегодняшний день продовольственная независимость по зерну составляет 177,8% при значении в Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации — 95%, что обуславливает актуальность разработки и внедрения современных технологий переработки данной группы сырья и получения сырья повышенной пищевой ценности.

Одним из путей переработки зерна, особенно из низкосортного сырья, является использование технологии проращивания в контролируемых условиях, что позволяет гарантированно повышать пищевую ценность и использовать полученное сырьё в технологии пищевых продуктов (Poudel et al., 2019). Однако, получение сырьевых ингредиентов путем проращивания зерна связано с определенными рисками ведения технологического процесса. Так необходимо учитывать свойства исходного сырья (как биологического объекта со значительной вариацией показателей), условия ведения технологического процесса, способы интенсификации как самого процесса, так и синтеза биологически активных веществ (Rosa-Sibakov et al., 2015).

Рядом исследователей доказана эффективность ультразвукового воздействия в качестве интенсифицирующего фактора в технологии экстракции (Khmelev et al., 2006; Калинина, 2019), стабилизации эмульсий (Ashokkumar et al., 2007; Potoroko et al., 2017; Potoroko et al., 2018), обработки мясных систем (Krasulya, 2016). Одним из наиболее результативных направлений можно выделить интенсификацию процессов проращивания зерна (Naumenko et al., 2022a; Naumenko et al., 2022b). Проведенный нами ранее массив исследований при последовательной вариации мощности ультразвукового воздействия 126 до 630 Вт (экспозиция от 3 до 7 минут) позволяет сказать, что использование ультразвука на этапе замачивания зерна пшеницы позволяет сократить длительность процессов на 2,5–4,5 часа. Содержание флавоноидов увеличивается в среднем

на 41%, фенольных кислот — 33% и полифенольных соединений на 35%. При этом общая антиоксидантная активность увеличивается в 1,8–2,1 раза относительно контрольных образцов зерна пшеницы, пророщенных без ультразвукового воздействия. Представленные в работе (Naumenko et al., 2022b) результаты доказывают увеличение проникающей способности мембран растительных клеток, в результате у помещенного в воду или раствор зерна происходит более интенсивное расщепление запасных веществ и поступление мономеров к тканям зародыша, интенсифицируется ряд физиологических процессов. Эффекты ультразвукового воздействия могут быть использованы в технологии обработки зерна (Данильчук и др., 2008) на этапе замачивания в растворах, стимулирующих накопление биологически активных веществ. В качестве одного из таких веществ может быть использована γ -аминомасляная кислота (ГАМК) — непротеиногенная аминокислота, которая обычно синтезируется в растениях в результате реакции декарбоксилирования глутаминовой кислоты или путем деградации полиаминов (Wu et al., 2018).

ГАМК широко распространена в организмах растений, животных и микроорганизмов, при этом она выполняет различные функции. Ранее многочисленными исследованиями описывалось воздействие ГАМК на организм млекопитающих, как эффективного ингибиторного нейротрансмиттера в центральной нервной системе (Abdou et al., 2006); вещества, снижающего артериальное давление (Bai et al., 2009), улучшающего качества сна (Yu et al., 2020), обучения и памяти (Li et al., 2016) и регулирующего обменные процессы (Baranzelli et al., 2018). Исследователями (Sheteiwy et al., 2019) представлены результаты, свидетельствующие о том, что ГАМК действует в растениях как сигнальная молекула и играет решающую роль для формирования устойчивости и регуляции стресса при воздействии на растения окружающей среды. ГАМК не только регулирует внутренние процессы в ответ на биотические и абиотические стрессы растений, но и служит сигнальной молекулой для передачи информации (Abdel Razik et al., 2021). Рядом исследователей приводятся результаты использования экзогенной ГАМК как регулятора роста (Ashrafuzzaman et al., 2010; Li et al., 2016b); вещества, обладающего антимикробным действием и модулятора выработки активных форм кислорода в процессе роста растений (Seifkalhor et al., 2019).

Однако, собственные рекогносцировочные исследования показали, что использование растворов ГАМК в технологии проращивания зерна пшеницы позволяет получить минимальный положительный эффект с точки зрения интенсификации процесса (пророст показателей «Энергия прорастания» и «Способность прорастания» составил $(1,4 \pm 0,3)\%$ и $(1,3 \pm 0,4)\%$ соответственно, относительно контроля). При этом содержание флавоноидов, фенольных кислот, полифенольных соединений, а также значения общей антиоксидантной активности колеблются в минимальной вариации и не позволяют выявить устойчивой положительной динамики, что может быть связано с низкой проникающей способностью ГАМК через оболочку зерна.

Одним из новых подходов в проведении процесса проращивания зерна можно рассматривать использование сочетания ультразвукового воздействия с растворами экзогенной ГАМК как эффективного метода повышения энергии и способности прорастания и антиоксидантных свойств. Один из вариантов данного подхода предложен и успешно реализован (Wang et al., 2023a), для повышения пищевой ценности бобовой культуры (*Vigna radiata* (L.)), однако, представленные в открытой печати результаты исследований не могут быть универсальными и требуют индивидуального подхода для каждого вида сырья, что обуславливает актуальность проведенного исследования.

Целью данного исследования являлось выявление эффективной концентрации экзогенной ГАМК, в наибольшей степени увеличивающей антиоксидантные свойства пророщенного зерна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В данном исследовании для проведения процесса проращивания использовались следующие образцы зерна:

Образец 1 — зерно пшеницы (*Triticum aestivum* L.), сорта Эритроспериум, урожая 2022 года, выращенное в Уральском регионе, Россия. Содержание белка составило $12,3 \pm 0,8$ г/100 г в пересчете на влажность; натура — 712 ± 10 г/дм³;

Образец 2 — зерно ячменя (*Hordeum vulgare* L.), сорта Челябинец 1, урожая 2022 года, выращенное в Уральском регионе, Россия. Содержание белка составило $10,2 \pm 0,8$ г/100 г в пересчете на влажность; натура — 552 ± 12 г/дм³;

Образец 3 — зерно овса (*Avena sativa*), сорта Универсал 1, урожая 2022 года, выращенное в Уральском регионе, Россия. Содержание белка составило $6,2 \pm 0,9$ г/100 г в пересчете на влажность; натура — 522 ± 11 г/дм³.

Отбор проб зерна проводили согласно требованиям ГОСТ 13586.3–2015.

Используемое зерно перед проведением процесса замачивания проходило предварительный отбор и выравнивалось по длине и ширине с использованием программы для фенотипирования зерна SeedCounter v.1.9.5, разработанной сотрудниками Новосибирского государственного университета (Komyshev et al., 2018). Для проведения исследований и разработки технологии проращивания использовали зерно заведомо низкой классовой (пшеница — 4 класс, ячмень — 3 класс, овес — 3 класс) для соблюдения экономической эффективности разработки.

Замачивание зерна

Для удаления продуктов загрязнения и посторонних веществ зерновые культуры предварительно промывали в проточной воде при 20 ± 2 °С в пятикратной повторности.

Образцы зерна замачивали в дистиллированной воде (контроль) и в растворах экзогенной ГАМК при вариации концентраций 1, 3 и 5 % (опыт).

С целью интенсификации процессов замачивания зерна и лучшего проникновения экзогенной ГАМК в центральные части зерна сразу после его помещения в дистиллированную воду/растворы проводили дополнительную обработку ультразвуковым воздействием. Система из ультразвукового генератора и резервуара для воды/раствора ГАМК с замоченным зерном из нержавеющей стали, объемом 1 литр. Обработываемое зерно постоянно перемешивалось.

Воздействие ультразвуком ($22 \pm 1,25$ кГц) осуществлялось при 245 Вт/л в течение 5 мин. Для ультразвуковой обработки использовался метод описанный (Naumenko N. et al., 2022a). Применялся ультразвук высокой интенсивности (20 Вт/см^2). Для обработки применялся аппарат ультразвуковой технологический (Волна-М УЗТА-0,63/22-ОМ, г. Бийск, Россия). Условия обработки ультразвуковым воздействием изучались ранее и представлены в работах (Naumenko N. et al., 2022a). Нашими исследованиями с помощью метода электронной сканирующей микроскопии доказано, что именно данные параметры воздействия являются наиболее оптимальными при интенсификации процесса замачивания зерна и за счет кавитационных эффектов ускоряют процесс увлажнения продольного, поперечного и трубчатого слоев плодовых оболочек, пигментного и гиалинового слоев семенных оболочек, эндосперма и зародыша (Naumenko et al., 2022b). Использование данных параметров ультразвукового воздействия в процессе замачивания при последующем проращивании позволяет увеличить содержание флавоноидов, фенольных кислот и полифенольных соединений. Вышеуказанные результаты позволили выбрать данные параметры воздействия для проведения дальнейших исследований.

После ультразвуковой обработки зерно оставляли для дальнейшего замачивания в дистиллированной воде (контроль) и растворах экзогенной ГАМК с вариацией концентраций (опыт) при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течении 8 часов (зерно пшеницы) и 12 часов (зерно ячменя и овса). Опытные образцы находились в растворах экзогенной ГАМК на протяжении всей длительности замачивания.

Проращивание зерна

Проращивание зерна проводили в камере с контролируемой температурой $22 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажностью воздуха $95 \pm 3\%$. Проросшее зерно удалялось из камеры по достижению величины ростка 1,5–2 мм более чем у 90% зерен, время проращивания составило от 30 до 50 часов.

В дальнейшем образцы зерна высушивались при температуре $40\text{--}45^\circ$, влажности 14–12% и измельчались разовым помолом на лабораторной мельнице ЛМТ-3м Laboratoroff до значений средне-

взвешенного размера частиц (170 ± 15) мкм с разбросом размерного ряда частиц от 52 до 296 мкм. Для определения показателей использовались все части пророщенного зерна.

Определение энергии прорастания и способности прорастания проводили согласно ГОСТ 10968–88.

Общую антиоксидантную (антирадикальную) активность (АОА) определяли по поглощению радикалов в образцах с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) (Sánchez-Moreno, 1998). Экстракты получали путем помещения 0,1 г сухой измельченной навески пророщенного зерна в 20 мл этанола и последующего 4 часового выдерживания на шейкере ПЭ-6500 без нагревания. Экстракты 0,5 мл смешивали с 3,6 мл раствора реактива DPPH и выдерживали без доступа солнечных лучей в течении 30 минут. Абсорбцию образца экстракта определяли с использованием спектрофотометра при 515 нм. АОА рассчитывали по формуле:

$$\text{АОА} = \frac{1 - (D_i - D_j)}{D_c} \times 100, \quad (1)$$

где D_i — оптическая плотность исследуемого раствора; D_j — оптическая плотность контрольного раствора DPPH с этанолом; D_c — оптическая плотность раствора DPPH.

Определение общего содержания флавоноидов проводили с использованием этанольного раствора хлорида алюминия и ацетата натрия, светопоглощение измеряли с использованием спектрофотометра при 415 нм (Shafii, Z.A. 2017). В качестве стандарта использовали кверцетин ($0,01\text{--}0,5 \text{ мг L}^{-1}$; $R^2 = 0,997$), и результаты выражали в мг^{-1} -эквивалентах кверцетина.

Содержание полифенольных соединений определяли по методу Синглтона (Shafii, Z.A. 2017) с использованием реактива Фолина-Чокальтеу. Для этого 0,1 мл экстракта образца смешивали с 0,1 мл реактива Фолина-Чокальтеу, 1 мл 20% (мас/об.) карбоната натрия и 8,8 мл дистиллированной воды. Через 30 мин выдерживания в темноте определяли поглощение при 700 нм с использованием спектрофотометра. В качестве стандарта использовали галловую кислоту, результаты выражали в эквивалентах галловой кислоты.

В качестве контрольных исследуемых образцов были определены следующие:

- (1) зерно пшеницы, пророщенное по вышеуказанной технологии с использованием ультразвукового воздействия и дистиллированной воды (контроль);
- (2) зерно ячменя, пророщенное по вышеуказанной технологии с использованием ультразвукового воздействия и дистиллированной воды (контроль);
- (3) зерно овса, пророщенное по вышеуказанной технологии с использованием ультразвукового воздействия и дистиллированной воды (контроль).

В качестве опытных исследуемых образцов были определены следующие:

- (1) зерно пшеницы, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК с концентрацией 1, 3 и 5 % на этапе замачивания, соответственно;
- (2) зерно ячменя, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК с концентрацией 1, 3 и 5 % на этапе замачивания, соответственно;
- (3) зерно овса, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК с концентрацией 1, 3 и 5 % на этапе замачивания, соответственно;

Анализ данных

Исследования проводились в трехкратный повторности. Проращивание зерна осуществлялось в одинаковых условиях, для обеспечения точности результатов. Экспериментальные данные были обработаны на основе методов математической статистики с использованием Microsoft Excel и MathCad 14.0. Полученные данные представлены с доверительным коэффициентом 0,95.

Для выявления наиболее эффективных режимов проращивания зерна в условиях экзогенной ГАМК применялось двух факторное планирование и обработка данных в программе MathCad 14.0. В качестве переменных факторов использовались: концентрация раствора экзогенной ГАМК (1, 3, 5 %)

и длительность проращивания (12, 24, 36 часов). Контролируемым показателем была определена общая антиоксидантная (антирадикальная) активность (AOA), % (DPPH).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В обеспечении населения продуктами питания значительную роль играет зерно. Повышение эффективности использования низкосортного зерна предполагает разработку новых высокоэффективных технологий. Одним из таких приемов является технология проращивания в контролируемых условиях, что позволяет гарантированно повышать пищевую ценность сырьевых ингредиентов для использования в пищевых продуктах. При этом необходимо понимать, что исходный сырьевой материал связан с биологическими особенностями сельскохозяйственной культуры. Использование в качестве биостимулятора, регулятора и стимулятора роста в технологии получения пророщенного зерна экзогенной γ -аминомасляной кислоты (ГАМК) обосновывается доказательной базой ряда исследований (Wang et al., 2023a; Wang et al., 2023b), а выявление эффективной её концентрации позволяет минимизировать финансовые затраты на внедрение данной технологии в реальное производство.

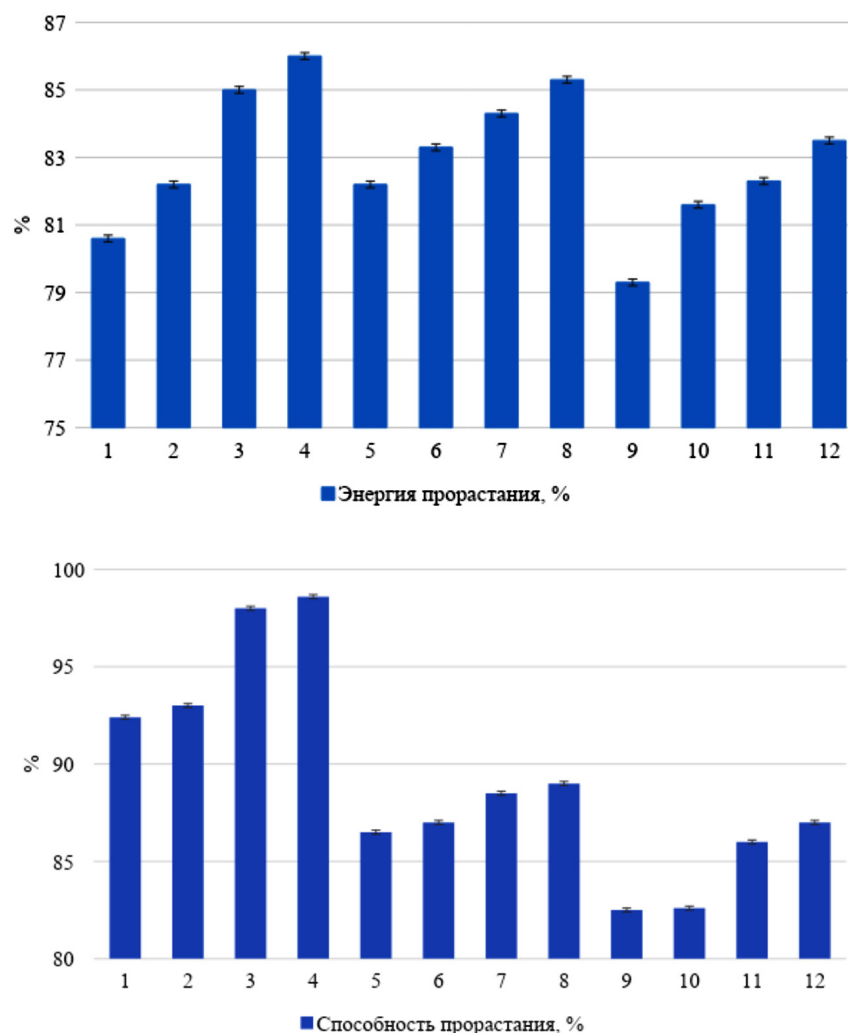
Оценка концентрации экзогенной ГАМК на интенсивность протекания процессов проращивания

На начальном этапе исследований была проведена оценка влияния экзогенной γ -аминомасляной кислоты на интенсивность протекания процессов проращивания. Данная характеристика напрямую позволяет говорить о целесообразности проведения данного процесса и охарактеризовать динамику интенсивности протекания процессов проращивания зерна. Результаты определения энергии и способности прорастания исследуемых образцов представлены на Рисунке 1.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии более высоких концентраций растворов экзогенной ГАМК на интенсивность процессов проращивания. Так 1 % растворы ГАМК повышают значения энергии и способности прорастания в пределах 1–3 %. Тогда как применение более высоких концентраций рас-

Рисунок 1

Результаты определения энергии и способности прорастания исследуемых образцов зерна при вариации концентрации растворов экзогенной ГАМК



творов ГАМК (5 %) позволяет получить положительную динамику и увеличить значения для энергии прорастания в среднем на 5,4; 3,1 и 4,2 % для зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно.

Необходимо отметить, что данный эффект обусловлен концентрацией используемых растворов экзогенной ГАМК, так как контрольные образцы зерна также как и опытные на этапе замачивания подвергались ультразвуковому воздействию. Ранее в ходе рекогносцировочных исследований было установлено, что ультразвуковое воздействие оказывает положительный эффект на увеличение данных показателей, однако, данная динамика фиксировалась в меньшей степени, что согласуется с ранее опубликованными результатами (На-

уменко и др., 2019). Так для зерна пшеницы после ультразвукового воздействия прирост показателя «Энергия прорастания» в среднем составил 3,8 %; ячменя — 1,8 % и овса — 3,6 % относительно контрольных (не обработанных) образцов зерна. Данная динамика также сохранялась и для показателя «Способность прорастания».

Выявление наиболее эффективной концентрации экзогенной ГАМК в технологии проращивания

Использование методов математической обработки экспериментальных данных позволяет оптимизировать параметры технологического про-

цесса и выявить наиболее эффективные условия системы, в данном случае концентрацию растворов экзогенной ГАМК, используемой в технологии проращивания зерна. По полученным данным определения антиоксидантной активности пророщенного зерна в условиях экзогенной ГАМК (с экспозицией концентрации 1, 3 и 5 %) и вариации длительности проращивания (12, 24, 36 часов), для каждого образца были построены многофакторные поверхности, что позволило выявить наиболее эффективные режимы проращивания. Результаты проведения двух факторного планирования для каждого исследуемого образца зерна представлены на Рисунке 2.

Полученные в ходе математической обработки данных на основе двух факторного планирования результаты позволили определить оптимальную концентрацию растворов экзогенной ГАМК и длительность проращивания для каждого исследуемого образца зерна. Так для зерна пшеницы оптимальная концентрация ГАМК составила 4,1 %; для ячменя — 4,2 % и для овса — 3,1 %.

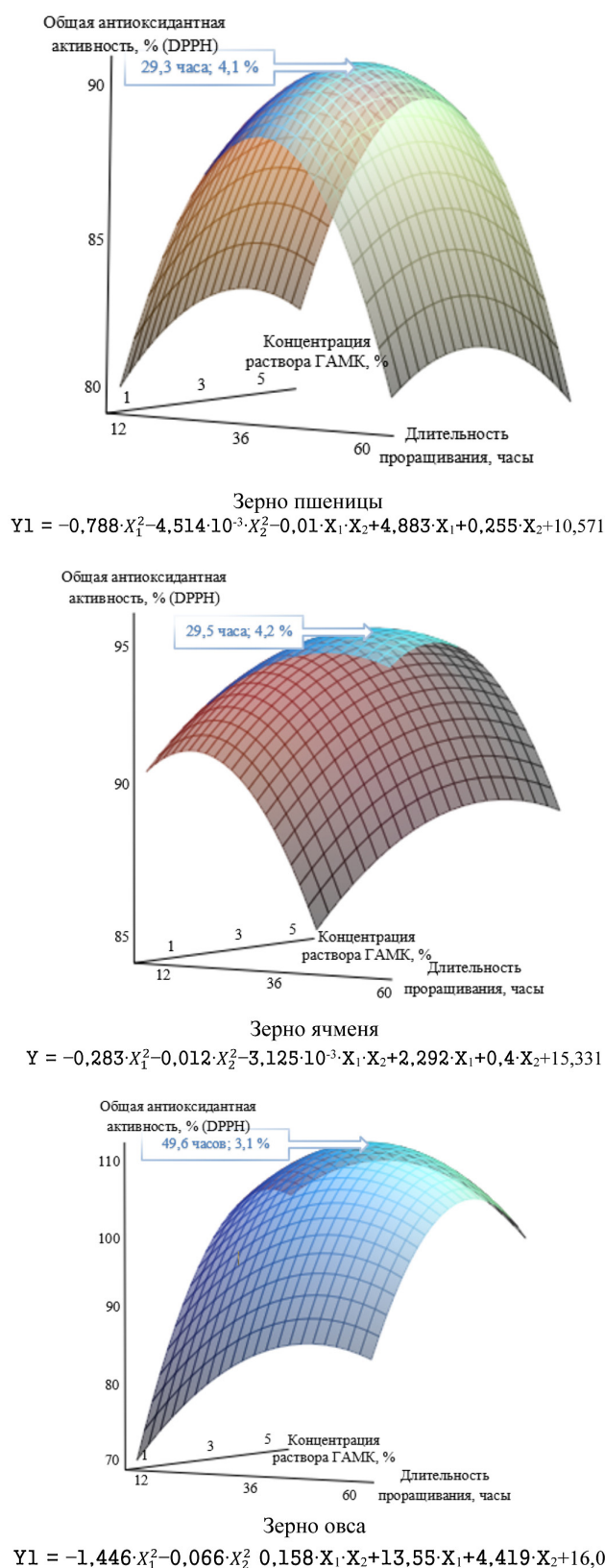
Весомый вклад в повышение общей антиоксидантной активности внес временной фактор процесса проращивания, что подтверждается опубликованными в открытой печати исследованиями (Nelson et al., 2013; Калинина и др., 2019a). Наблюдается положительная зависимость роста общей антиоксидантной активности от продолжительности ведения процесса. Необходимо отметить, что оптимальная длительность проращивания составляет $29,3 \pm 0,5$ часа; $29,5 \pm 0,4$ часа и $49,6 \pm 0,4$ часа для образцов зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно. Данный параметр также был скорректирован в дальнейших исследованиях.

Результаты исследования оптимизированных по концентрации экзогенной ГАМК в технологии проращивания образцов зерна

Экспериментальное подтверждение полученных математически результатов наиболее важно для формирования доказательной базы проведенных исследований и грамотного внедрения разработок в условия реального производства.

Рисунок 2

Результаты математического моделирования общей антиоксидантной активности от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания



На данном этапе исследований были определены следующие образцы:

ЗПопт — зерно пшеницы, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК оптимизированной концентрации (4,1 %) и длительности проращивания ($29,3 \pm 0,5$ часа);

ЗЯопт — зерно ячменя, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК оптимизированной концентрации (4,2 %) и длительности проращивания ($29,5 \pm 0,4$ часа);

ЗОопт — зерно овса, пророщенное по вышеуказанной технологии при сочетании ультразвукового воздействия и экзогенной ГАМК оптимизированной концентрации (3,1 %) и длительности проращивания ($49,6 \pm 0,4$ часа).

Результаты определения энергии и способности прорастания исследуемых образцов зерна при оптимизированной концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности процесса в сравнении с контролем представлены на Рисунке 3.

Полученные результаты исследований позволяют отметить средний прирост показателя «Энергия прорастания» для опытных оптимизирован-

ных по концентрации экзогенной ГАМК образцов у зерна пшеницы 5,0 %; ячменя — 3,1 % и овса — 4,2 % относительно контроля. Указанная динамика сохранялась также для показателя «Способность прорастания» и в среднем составила — 6,2 %; 2,0 % и 4,0 %, для опытных образцов зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно.

Использование раствора экзогенной ГАМК оптимизированной концентрации на этапе замачивания оказало положительное влияние на содержание флавоноидов и полифенольных соединений в пророщенном зерне. Полученные результаты представлены на Рисунке 4.

Полученные результаты позволяют отметить увеличение содержания флавоноидов и полифенольных соединений при получении пророщенного зерна с использованием раствора экзогенной ГАМК. Так содержание флавоноидов увеличивается в среднем на 18 % (зерно пшеницы); на 16 % (зерно ячменя) и на 64 % (зерно овса) относительно контрольных образцов зерна. Подобная динамика также отмечается для полифенольных соединений, содержание которых увеличивается в среднем на 47 % (зерно пшеницы); на 50 % (зерно ячменя) и на 69 % (зерно овса) относительно контрольных образцов.

Результаты определения общей антиоксидантной активности контрольных и опытных образцов зер-

Рисунок 3

Результаты определения энергии и способности прорастания контрольных и опытных образцов зерна, полученных при оптимизированной концентрации раствора экзогенной ГАМК

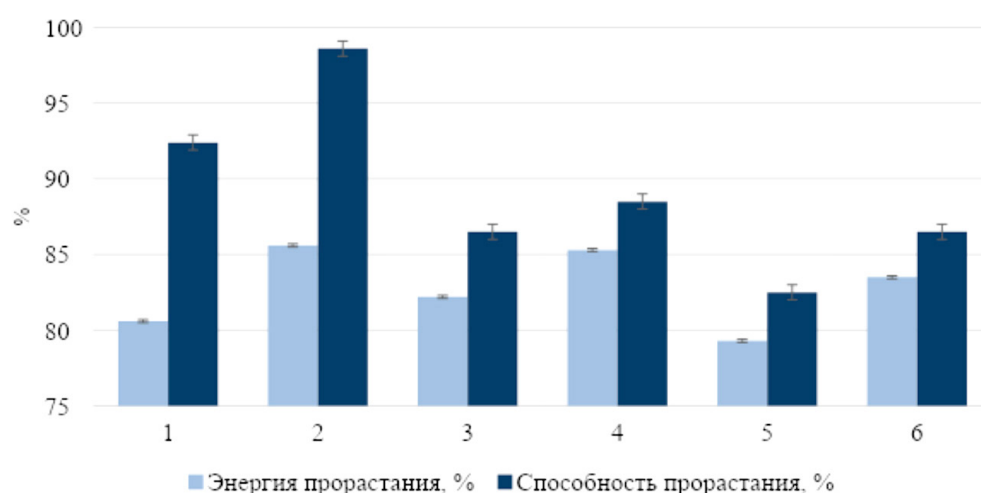


Рисунок 4

Результаты определения содержания флавоноидов и полифенольных соединений контрольных и опытных образцов пророщенного зерна

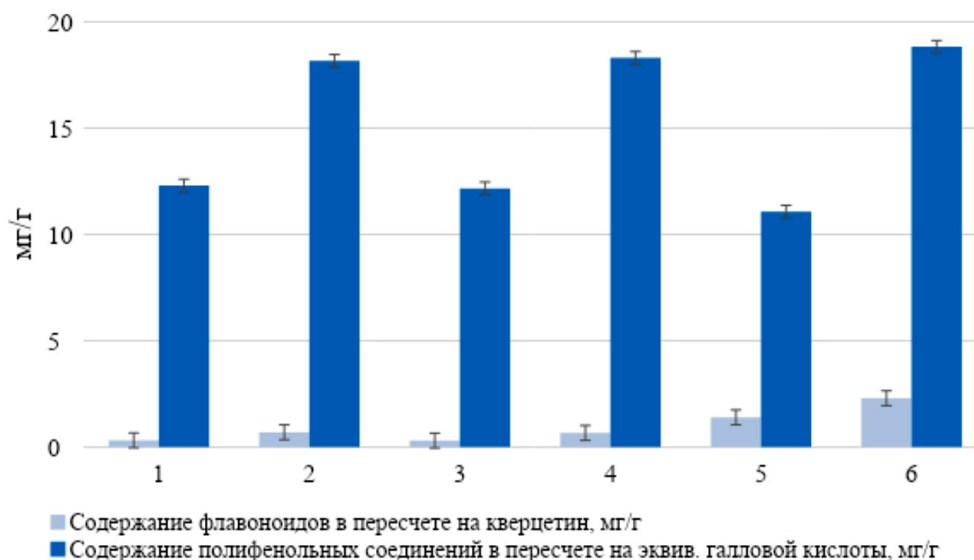
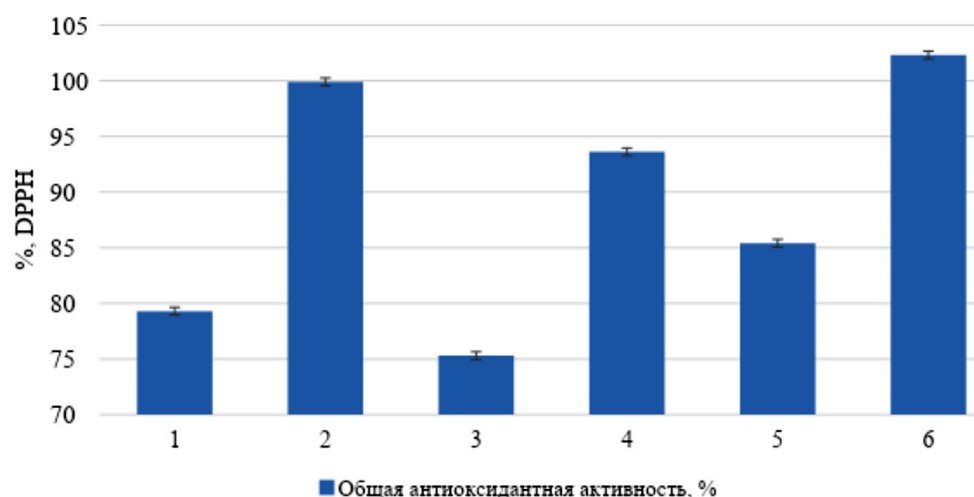


Рисунок 5

Результаты определения общей антиоксидантной активности контрольных и опытных образцов пророщенного зерна



на, полученных по оптимизированным параметрам, представлены на Рисунке 5.

Проведенные исследования показали, что процесс проращивания зерна в растворах экзогенной ГАМК заданной концентрации позволяют увеличить значения общей антиоксидантной активности в среднем на 20,6%; 18,3% и 16,6% для образцов зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии растворов с экзогенной ГАМК, используемых на этапе замачивания зерна, и ультразвукового воздействия на интенсивность протекания процессов проращивания и на антиоксидантные его свойства.

Наиболее высокие значения показателей «Энергия прорастания» и «Способность прорастания» отмечены для образца зерна пшеницы. Прирост показателей составил в среднем 6,0 % и 6,2 %, соответственно. Возможно предположить, что оболочка зерна пшеницы наиболее подвержена ультразвуковому воздействию, что способствует более полному проникновению раствора экзогенной ГАМК к зародышу (Yang et al., 2015). Прирост показателей «Энергия прорастания» и «Способность прорастания» для составил в среднем 3,1 % и 2,0 % для зерна ячменя и 4,2 % и 4,0 % для зерна овса, соответственно. Активацию данных процессов можно объяснить в первую очередь ультразвуковым воздействием, которое вызывает образование микротрещин оболочки зерна и ускоряет процесс гидратации раствора экзогенной ГАМК (Estivi et al., 2022; Kalita et al., 2021), что приводит к изменениям молекулярной структуры ферментов, и повышает их активность, запуская систему защитных реакций и усиливая выработку вторичных метаболитов, таких как флавоноиды и полифенолы (Miano et al., 2016). Как отмечают Nobuki и его коллеги, кавитация и механическое воздействие ультразвука повышают проницаемость клеточных мембран зерна пшеницы, способствуя диффузии и трансмембранному транспорту ионов и метаболитов (Nobuki et al., 2009), которым в нашем случае, выступает раствор ГАМК. Нашими исследованиями подтверждено, что подобные эффекты могут быть достигнуты при проращивании зерна ячменя и овса. Доказано (Gu et al., 2022), что экзогенная ГАМК может проникать через клеточные мембраны и попадать в клетки, стимулировать выработку гормонов, регулировать рост и развитие и дополнительно вызывать внутриклеточные физиологические и биохимические изменения, тем самым регулируя экспрессию генов пути метаболизма полифенолов. Рядом исследователи подчеркивается, что эффект использования экзогенной ГАМК заключается в увеличении синтеза белка и активности ферментов, что приводит к повышению содержания полифенолов (Zhao et al., 2021). Estivi et al. (2022) и Kalita et al. (2021).

Представленные нами результаты исследований по сочетанию ультразвукового воздействия с раствором экзогенной ГАМК, доказывают, что данный подход позволяет получить более высокое содержание флавоноидов и полифенольных соединений, чем при одиночном воздействии вышеуказанных факторов. Так прирост флавоноидов находится

в диапазоне 16–64 %, а полифенолов 47–69 %, что увеличило общую антиоксидантную активность на 16,6–20,6 %, относительно контрольных образцов, полученных с использованием исключительно ультразвукового воздействия.

ВЫВОДЫ

Проведенные нами исследования подтвердили возможность и эффективность использования растворов экзогенной ГАМК заданной концентрации в сочетании с ультразвуковым воздействием в технологии получения пророщенного зерна пшеницы, ячменя и овса.

При помощи математического моделирования оптимизирована концентрация растворов экзогенной ГАМК и длительность процесса проращивания, которая для зерна пшеницы составила 4,1 % и 29,3 часа; для ячменя — 4,2 % и 29,5 часа и для овса — 3,1 % и 49,6 часа. Средний прирост показателя «Энергия прорастания» составил для зерна пшеницы 5,0 %; ячменя — 3,1 % и овса — 4,2 % относительно контроля, а для показателя «Способность прорастания» — 6,2 %; 2,0 % и 4,0 %, соответственно. В пророщенных опытных образцах содержание флавоноидов увеличивается в среднем на 18 % (зерно пшеницы); 16 % (зерно ячменя) и 64 % (зерно овса). Прирост полифенольных соединений составил — 47 %; 50 % и на 69 %, а общая антиоксидантная активность увеличилась в среднем на 20,6 %; 18,3 % и 16,6 % для образцов зерна пшеницы, ячменя и овса, соответственно.

Полученные результаты позволяют предположить, что использование растворов экзогенной ГАМК при ультразвуковом воздействии может быть использовано в качестве перспективной технологии для повышения содержания биологически активных соединений в растительном сырье. В данном направлении необходимы дальнейшие исследования, повреждающие потенциальную пользу для здоровья человека полученных пищевых продуктов на их основе пророщенного зерна.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Науменко Наталья Владимировна: концептуализация; создание модели исследования; редактирование рукописи.

Фаткуллин Ринат Ильгидарович: концептуализация; создание модели исследования; проведение исследования; создание и редактирование рукописи.

Калинина Ирина Валерьевна: проведение исследования; верификация данных; формальный анализ.

Радкевич Анастасия Владимировна: проведение исследования; формальный анализ; валидация данных

Науменко Екатерина Евгеньевна: проведение исследования; администрирование данных;

Попова Наталия Викторовна: проведение исследования; программное обеспечение;

Васильева Елизавета Константиновна: проведение исследования; визуализация.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Данильчук, Т. Н., Юрьев, Д. Н., & Ратников, А. Ю. (2008). Стимуляция биохимических процессов в прорастающем зерне акустическими и электрофизическими методами воздействия. *Пиво и напитки*, (6), 11–14.
- Daniľchuk T. N., Yur'ev D. N., & Ratnikov A. Yu. (2008). Stimulation of biochemical processes in germinating grain by acoustic and electrophysical methods of exposure. *Beer and Drinks*, (6), 11–14. (In Russ.)
- Калинина, И. В. (2019). Исследование стабильности наноэмульсий с дигидрокверцетином, полученных на основе ультразвукового воздействия. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, 7(3), 52–58. <https://doi.org/10.14529/food190306>
- Kalinina, I. V. (2019). Investigation of the stability of nanoemulsions with dihydroquercetin obtained on the basis of ultrasound exposure. *Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology*, 7(3), 52–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/food190306>
- Калинина, И. В., Потороко, И. Ю., Фаткуллин, Р. И., Иванова, Д., Канева-Киселова, Й., & Соनावэйн, Ш. (2019). Повышение биоактивности дигидрокверцетина на основе ультразвуковой микронизации. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, (1), 27–33.
- Kalinina, I. V., Potoroko, I. Yu., Fatkullin, R. I., Ivanova, D., Kaneva-Kiselova, I., & Sonavein, Sh. (2019). Increasing the bioactivity of dihydroquercetin based on ultrasonic micronization. *Technology and Commodity Science of Innovative Food Products*, (1), 27–33. (In Russ.)
- Науменко, Н. В., Ботвинникова, В. В., Нилова, Л. П., Сергеев, А. А., Науменко, Е. Е., & Степанова, Д. С. (2020). Возможности использования экотехнологий для минимизации продовольственных потерь. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, 8(4), 69–76. <https://doi.org/10.14529/food200409>
- Naumenko, N. V., Botvinnikova, V. V., Nilova, L. P., Sergeev, A. A., Naumenko, E. E., & Stepanova, D. S. (2020). Possibilities of using eco-technologies to minimize food losses. *Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology*, 8(4), 69–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/food200409>
- Науменко, Н. В., Потороко, И. Ю., Малинин, А. В., & Цатуров, А. В. (2019). Оптимизация условий процесса проращивания зерна пшеницы. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 151(07), Статья 17. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-151-017>
- Naumenko, N. V., Potoroko, I. Yu., Malinin, A. V., & Tsaturov, A. V. (2019). Optimization of the conditions of the wheat grain germination process. *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 151(07), Article 17. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-151-017>
- Abdel Razik, E. S., Alharbi, B. M., Pirzadah, T. B., Alnusairi, G. S. H., Soliman, M. H., & Hakeem, K. R. (2021). γ -Aminobutyric acid (GABA) mitigates drought and heat stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by regulating its physiological, biochemical and molecular pathways. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 505–527. <https://doi.org/10.1111/ppl.13216>
- Abdou, A. M., Higashiguchi, S., Horie, K., Kim, M., Hatta, H., & Yokogoshi, H. (2006). Relaxation and immunity enhancement effects of γ -aminobutyric acid (GABA) administration in humans. *BioFactors*, 26(3), 201–208. <https://doi.org/10.1002/biof.5520260305>
- Ashokkumar, M., Lee, J., Kentish, S., & Grieser, F. (2007). Bubbles in an acoustic field: An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(4), 470–475. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.09.016>
- Ashrafuzzaman, M., Ismail, M., Fazal, K. M., Uddin, M., & Prodhan, A. K. M. A. (2010). Effect of GABA application on the growth and yield of bitter melon (*Momordica charantia*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 12(1), 129–132.

- Bai, Q. Y., Chai, M. Q., Gu, Z. X., Cao, X. H., Li, Y., & Liu, K. L. (2009). Effects of components in culture medium on glutamate decarboxylase activity and γ -aminobutyric acid accumulation in foxtail millet (*Setaria italica* L.) during germination. *Food Chemistry*, 116(1), 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.022>
- Baranzelli, J., Kringel, D. H., Colussi, R., Paiva, F. F., Aranha, B. C., Zavariz de Miranda, M., Zavareze, E. R., & Guerra Dias, A. R. (2018). Changes in enzymatic activity, technological quality and gamma-aminobutyric acid (GABA) content of wheat flour as affected by germination. *LWT. Food Science and Technology*, 90, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.070>
- Estivi, L., Brandolini, A., Condezo-Hoyos, L., & Hidalgo, A. (2022). Impact of low-frequency ultrasound technology on physical, chemical and technological properties of cereals and pseudocereals. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, Article 106044. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106044>
- Gu, M., Yang, J., Tian, X., Fang, W., Xu, J., & Yin, Y. (2022). Enhanced total flavonoid accumulation and alleviated growth inhibition of germinating soybeans by GABA under UV-B stress. *RSC Advances*, 11, 6619–6630. <https://doi.org/10.1039/D2RA00523A>
- Kalita, D., Jain, S., Srivastava, B., & Goud, V. V. (2021). Sono-hydro priming process (ultrasound modulated hydration): Modelling hydration kinetic during paddy germination. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, Article 105321. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105321>
- Khmelev, V. N., Lebedev, A. N., & Khmelev, M. V. (2006). Ultrasonic drying and pre sowing treatment of seeds. In *International workshop and tutorials on electron devices and materials: Proceedings 7th annual inter-national workshop and tutorials on electron devices and materials* (pp. 251–253). Novosibirsk: EDM.
- Komyshchev, E., Genaev, M., & Afonnikov, D. (2017). Evaluation of the SeedCounter, a mobile application for grain phenotyping. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01990>
- Krasulya, O., Bogush, V., Trishina, V., Potoroko, I., Khmelev, S., Sivashanmugam, P., & Anandane, S. (2016). Impact of acoustic cavitation on food emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 30, 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.013>
- Li, G., Lv, J., Wang, J., Wan, P., Li, Y., Jiang, H., & Jin, Q. (2016). GABAB receptors in the hippocampal dentate gyrus are involved in spatial learning and memory impairment in a rat model of vascular dementia. *Brain Research Bulletin*, 124, 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2016.05.006>
- Li, W., Liu, J., Ashraf, U., Li, G., Li, Y., Lu, W., & Hu, J. (2016). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) application improved early growth, net photosynthesis, and associated physio-biochemical events in maize. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 919. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00919>
- Miano, A. C., Pereira, J. D., Costa, C. N., & Augusto, P. E. D. (2016). Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*, 6, Article 38996. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
- Naumenko, N., Potoroko, I., & Kalinina, I. (2022a). Stimulation of antioxidant activity and γ -aminobutyric acid synthesis in germinated wheat grain *Triticum aestivum* L. by ultrasound: Increasing the nutritional value of the product. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, Article 106000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106000>
- Naumenko, N., Potoroko, I., Kalinina, I., Naumenko, E., & Ivanisova, E. (2022b). The effect of ultrasonic water treatment on the change in the microstructure of wheat grain, dough, and wheat flour bread. *International Journal of Food Science*, 2022, Article 1986438. <https://doi.org/10.1155/2022/1986438>
- Nelson, K., Stojanovska, L., Vasiljevic, T., & Mathai, M. (2013). Germinated grains: A superior whole grain functional food. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 91(6), 429–441. <https://doi.org/10.1139/cjpp-2012-0351>
- Nobuki, K., Kengo, O., & Katsuyuki, Y. (2009). Sonoporation by single-shot pulsed ultrasound with microbubbles adjacent to cells. *Biophysical Journal*, 96(12), 4866–4876. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.02.072>
- Potoroko, I. U., Kalinina, I. V., Naumenko, N. V., Fatkullin, R. I., Shaik, S., Sonawane, S. H., Ivanova, D., Kiselova-Kaneva, Y., Tolstykh, O., & Paymulina, A. V. (2017). Possibilities of regulating antioxidant activity of medicinal plant extracts. *Human. Sport. Medicine*, 17(4), 77–90. <https://doi.org/10.14529/hsm170409>
- Potoroko, I. Y., Kalinina, I. V., Naumenko, N. V., Fatkullin, R. I., Nenashcheva, A. V., Uskova, D. G., Sonawane, S. H., Ivanova, D. G., & Velyamov, M. T. (2018). Sonochemical micronization of taxifolin aimed at improving its bioavailability in drinks for athletes. *Human. Sport. Medicine*, 18(3), 90–100. <https://doi.org/10.14529/hsm180309>
- Poudel, R., Finnie, S., & Rose, D. J. (2019). Effects of wheat kernel germination time and drying temperature on compositional and end use properties of the resulting whole wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 86, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.004>
- Rosa-Sibakov, N., Poutanen, K., & Micard, V. (2015). How does wheat grain, bran and aleurone structure impact their nutritional and technological properties. *Trends in Food Science & Technology*, 41(2), 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.10.003>
- Seifkhalhor, M., Aliniaieifard, S., Hassani, B., Niknam, V., & Lastochkina, O. (2019). Diverse role of γ -aminobutyric acid in dynamic plant cell responses. *Plant Cell Reports*, 38, 847–867. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02396-z>
- Shafii, Z. A., Basri, M., Malek, E. A., & Ismail, M. (2017). Phytochemical and antioxidant properties of Manilkara zapota (L.) P Royen fruit extracts and its formulations for cosmeceutical application. *Asian Journal of Plant Science & Research*, 7(3), 29–41.
- Wang Y., Cao H., Wang S., Guo J., Dou H., Qiao J., Yang Q., Shao R., & Wang H. (2023b). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) improves salt-inhibited nitrogen metabolism and the anaplerotic reaction of the tricarboxylic acid cycle by regulating GABA-shunt metabolism in maize seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 254, Article 114756. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114756>

- Wang, L., Li, X., Gao, F., Liu, Y., Lang, S., Wang, C., & Zhang, D. (2023a). Effect of ultrasound combined with exogenous GABA treatment on polyphenolic metabolites and antioxidant activity of mung bean during germination. *Ultrasonics Sonochemistry*, 94, Article 106311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106311>
- Wu, Q. Y., Ma, S. Z., Zhang, W. W., Yao, K. B., Chen, L. U., Zhao, F., & Zhuang, Y. Q. (2018). Accumulating pathways of γ -aminobutyric acid during anaerobic and aerobic sequential incubations in fresh tea leaves. *Food Chemistry*, 240, 1081–1086. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.004>
- Yang, H., Gao, J., Yang, A., & Chen, H. (2015). The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts. *Food Research International*, 77(4), 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.011>
- Yu, L., Han, X., Cen, S., Duan, H., Feng, S., Xue, Y., & Chen, W. (2020). Beneficial effect of GABA-rich fermented milk on insomnia involving regulation of gut microbiota. *Microbiological Research*, 233, Article 126409. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126409>
- Zhao, Y. Y., Xie, C., Wang, P., Gu, Z. X., & Yang, R. Q. (2021). GABA regulates phenolics accumulation in soybean sprouts under NaCl stress. *Antioxidants*, 10(6), Article 990. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX10060990>