

Научная статья

УДК 664.71-11+664.785.6+664.786.6

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-2-37-48

## Возможности использования экзогенной $\gamma$ -аминомасляной кислоты для биофортификации растительного сырья

А.В. Радкевич<sup>1</sup>, Н.В. Науменко<sup>2\*</sup>, И.В. Калинина<sup>2</sup>, Е.К. Васильева<sup>3</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск<sup>3</sup>Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ), Россия, Москва

\*Naumenko\_natalya@mail.ru

**Аннотация.** Исследовали технологический подход биофортификации зерна пшеницы, основанный на применении технологии проращивания в условиях присутствия экзогенной  $\gamma$ -аминомасляной кислоты с целью повышения ее антиоксидантных свойств. Объектом изучения выбрано зерно пшеницы мягкой, сорта Московская-39 урожая 2023 и 2024 годов, для создания растворов экзогенной  $\gamma$ -аминомасляной кислоты использовались порошки трех различных производителей. В пророщенных образцах зерна пшеницы в динамике длительности процесса (12, 18, 24 ч) при варьировании концентрации растворов экзогенной  $\gamma$ -аминомасляной кислоты (0,3; 0,6 и 0,9%) определялись следующие показатели: длина и интенсивность развития корневой системы (путем измерения корневой системы в 1000 ед. пробы), содержание флавоноидов (спектрофотометрически, с использованием этанольного раствора хлорида алюминия), содержание фенольных соединений (спектрофотометрически, с использованием реактива Фолина–Чокальтеу) и общая антиоксидантная активность. Для выявления наиболее эффективных режимов биофортификации применялось двухфакторное планирование эксперимента и обработка данных в программе MathCad 14.0. Установлено, что наиболее выраженная положительная динамика таких показателей, как длина и интенсивность развития корневой системы, содержание флавоноидов и фенольных соединений, а также общая антиоксидантная активность наблюдается при использовании концентрации растворов  $\gamma$ -аминомасляной кислоты в диапазоне от 0,45 до 0,75% независимо от выбранного производителя. Максимальное количество флавоноидов в исследуемых образцах колеблется в диапазоне 0,50–0,52 мг/г, а фенольных соединений – в диапазоне 2,19–2,40 мг/г. Доказано, что проведение процесса проращивания в условиях экзогенной  $\gamma$ -аминомасляной кислоты позволяет более чем в три раза повысить значения антиоксидантной активности 52,40–54,09 мг Trolox экв./г.

**Ключевые слова:** переработка растительного сырья; зерно пшеницы; биофортификация; гамма-аминомасляная кислота; флавоноиды; фенольные соединения; антиоксидантная активность

Original article

### Use of exogenous $\gamma$ -aminobutyric acid for bifortification of plant raw materials

Anastasia V. Radkevich<sup>1</sup>, Natalia V. Naumenko<sup>2\*</sup>, Irina V. Kalinina<sup>2</sup>, Elizaveta K. Vasileva<sup>3</sup><sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, \*Naumenko\_natalya@mail.ru<sup>3</sup>Russian University of Transport, RUT (MIIT), Moscow, Russia

**Abstract.** The paper investigated the technological approach of biofortification of wheat grain based on the application of germination technology in the presence of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid in order to increase its antioxidant properties. Soft wheat grain of the variety Moskovskaya-39 of the 2023 and 2024 harvests was chosen as the object of study; powders from three different manufacturers were used to create solutions of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid. In germinated wheat grain samples. in the dynamics of the process duration (12, 18, and 24 h) at varying concentration of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid solutions (0.3; 0.6, and 0.9%) the following parameters were determined: length and intensity of root system development (by measuring the root system in 1000 sample units), flavonoid content (spectrophotometrically, using ethanol solution of aluminium chloride), content of polyphenolic compounds (spectrophotometrically, using Folin–Chocalteu reagent), and total antioxidant activity. Two-factor planning and data processing in MathCad 14.0 software were used to identify the most effective biofortification conditions. The obtained results prove that the most pronounced positive dynamics of change in the indicators of length and intensity of root system development, content of flavonoids and polyphenolic compounds, as well as total antioxidant activity is observed using the concentration of  $\gamma$ -aminobutyric acid solutions in the range from 0.45 to 0.75% regardless of the manufacturer. The content of maximum flavonoids in the studied samples ranges between 0.50–0.52 mg/g and the one of polyphenolic compounds – between 2.19–2.40 mg/g. It has been proved that germination process under conditions of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid allows more than threefold increase in the values of antioxidant activity 52.40-54.09 mg Trolox eq./g.

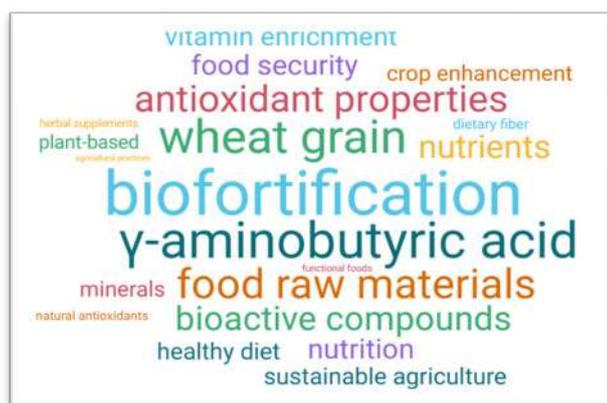
**Keywords:** processing of plant raw materials; wheat grain; biofortification;  $\gamma$ -aminobutyric acid; flavonoids; polyphenolic compounds; antioxidant activity

## Введение

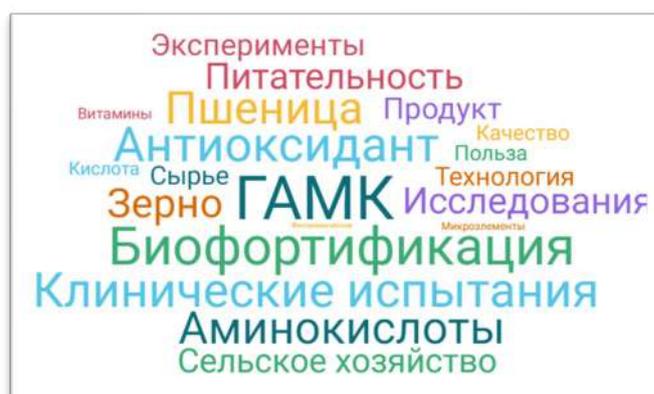
Использование комплексных наукоемких подходов в технологии переработки растительного сырья становится все более актуальным, учитывая необходимость получения пищевой продукции стабильно высокого качества, благоприятно влияющей на организм человека в долгосрочной перспективе. При этом ключевыми признаками жизнеспособности и перспективности разрабатываемых технологий является их экологичность при гарантированно высоком заданном результате. Одним из таких подходов можно предложить использование процессов проращивания зерна пшеницы в присутствии экзогенной  $\gamma$ -аминомасляной кислоты.

$\gamma$ -аминомасляная кислота (ГАМК) – это небелковая аминокислота с четырехуглеродной структурой, которая не участвует в процессе синтеза белка и повсеместно присутствует в живых организмах. Растения активно синтезируют данную аминокислоту в ответ на стрессовые факторы воздействия, минимизируя оксидативный стресс клеток и реализуя регуляцию метаболизма углерода и азота в тканях [1–4]. Благодаря своим полезным для здоровья свойствам ГАМК в последнее время привлекает значительное внимание при разработке технологий получения пищевых продуктов, благоприятно влияющих на организм человека в долгосрочной перспективе. ГАМК является мощным биологически активным соединением с доказанным положительным влиянием на здоровье человека, включая профилактику и лечение неврологических расстройств, диабета и гипертонии. Особо ценным в технологиях получения пищевых продуктов является использование максимально безопасных и естественных технологических подходов в создании сырьевых ингредиентов и продуктов на их основе.

Многочисленные исследования подтверждают положительное влияние ГАМК при естественной биофортификации пищевых продуктов в технологическом процессе [5–8]. Так обогащенные ГАМК кисломолочные продукты при регулярном употреблении могут существенно снижать артериальное давление и стабилизировать эмоциональное состояние [6]. Доказано [7, 8], что потребление 10–12 мг ГАМК облегчает симптомы умеренной гипертонии, оказывает положительное влияние в динамике гибели раковых клеток, улучшает чувствительность к инсулину и снижает уровень глюкозы в крови, способствует лечению бессонницы [8].



а



б

Рисунок 1 – Облако слов, генерируемое с применением сервиса Infogram, по наиболее часто встречающемуся понятию в библиографических базах данных sciencedirect.com (а) и Elibrary.ru (б) за 2010–2025 гг

Figure 1. Word cloud generated using Infogram service for the most frequently occurring concepts in the bibliographic database sciencedirect.com (a) and Elibrary.ru (b) for the period from 2010 to 2025

В настоящее время в научной среде появляется все больше работ, направленных на применение естественных технологических подходов для повышения пищевой ценности продовольственного сырья (рисунок 1). Полученные результаты генерации облака слов с применением сервиса Infogram позволяют отметить в библиографической базе данных sciencedirect.com за последние 15 лет в предметной области Agricultural and Biological Sciences насчитывается более 900 научных работ, включающих

понятие «биофортификация», более 700 работ – «γ-аминомасляная кислота» и более 600 – «зерно пшеницы». База данных Российской научной электронной библиотеки Elibrary.ru по числу упоминаний выделяет следующий понятийный аппарат: ГАМК, биофортификация, клинические испытания, антиоксидант (с убывающей частотой упоминания от 800 до 450 раз).

Внесение экзогенной ГАМК в растворы для проращивания зерна носит множественный положительный эффект: i выраженное обеззараживающее действие, реализуемое путем снижения патогенного развития грибной микрофлоры рода *Alternaria* и *Fusarium*. Так Sainan Yu с коллегами [9] доказывают, что концентрация экзогенной ГАМК от 0,01 моль/л и более негативно влияет на присутствие генов, отвечающих за синтез токсинов и подавляет активность ферментов, провоцирующих развитие мицелия *Alternaria* [9] и *Fusarium* [10]; ii стимулирующее действие эндогенного метаболизма ГАМК при проращивании и повышение антиоксидантной способности пророщенного зерна [11].

Рядом исследователей доказано [12–15], что применение экзогенной ГАМК является эффективным способом улучшения интенсивности роста растений и снятия стресса путем модуляции активности ферментов в путях метаболизма азота [12]. ГАМК, поставляя никотинамидадениндинуклеотид и сукцинат для митохондриального метаболизма через цикл трикарбоновых кислот [13], увеличивает накопление стресс-защитного аланина или способствует улучшению биосинтеза полиаминов, а также предотвращению их деградации [14]. Более высокие значения антиоксидантной активности наблюдаются в растительном сырье, полученном при использовании экзогенной ГАМК, установлено, что она способствует продлению срока годности растительной продукции [15].

Однако, использование экзогенной ГАМК в технологии проращивания именно зерна пшеницы носят отрывочный несистематизированный характер, возможно, это обусловлено территориальными и национальными особенностями исследователей (Китай, Индия, Пакистан, Канада, Корея, Испания и др.), тогда как для России данная культура является основополагающей в продовольственной безопасности страны, ее валовый сбор в 2023 г. составил 98,2 млн тонн (48,5% 4 класса), а в 2024 г. – 82,4 млн тонн (47,0% 4 класса). Таким образом наибольшую актуальность имеет сбор и систематизация экспериментальных данных по биофортификации зерна пшеницы 4 класса для получения сырьевых ингредиентов и конечных продуктов повышенной пищевой ценности, способных оказывать позитивное влияние на здоровье населения в долгосрочной перспективе.

Цель исследования – установить наиболее эффективные концентрации экзогенной ГАМК для биофортификации зерна пшеницы путем проращивания.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрано зерно пшеницы мягкой (*Triticum aestivum L.*), сорта Московская-39 4 класса, урожая 2023 и 2024 гг. Для подтверждения выявленных зависимостей результатов эксперимента пшеница в технологии проращивания использовалась из следующих мест произрастания: Владимирская и Ростовская области.

Для избежания развития токсигенной микрофлоры на поверхности зерна пшеницы проводили его трехкратное промывание анолитом pH = 2 [16], полученным на приборе «Мелеста» (МВП «Мелеста», Россия), по ТУ 5156-002-32064511-07 с последующим выдерживанием в течение 5 мин. Дальнейшее замачивание осуществляли с использованием растворов католита pH = 13 и коммерческих порошков ГАМК.

Для получения экзогенных растворов ГАМК использовали порошки следующих производителей:

- ✓ «Парусник», Россия, ТУ 9199-014-50876759-2016 (Образец 1);
- ✓ «МЛ-ТРЕЙД», Россия, ТУ 10.89.19-001-46249041-2021 (Образец 2);
- ✓ Suzhou Vitajoy Bio-Tech Co., ltd, Китай, ЕАЭС N RU Д-СН.РА06.В.75743/22 (Образец 3).

Для выявления наиболее эффективных режимов проращивания зерна пшеницы в условиях экзогенной ГАМК применяли двухфакторное планирование эксперимента и обрабатывали данные в программе MathCad 14.0. В качестве переменных факторов использовались:  $X_1$  – концентрация раствора экзогенной ГАМК (0,3; 0,6 и 0,9%) и  $X_2$  – длительность процесса проращивания (12, 18, 24 ч).

По окончании процесса проращивания образцы зерна высушивали при температуре 40–45°C до влажности 14–12% и измельчали разовым помолом на лабораторной мельнице Laboratoroff ЛМТ-3М

(«ЛТК Инструментс, Россия), частота вращения рабочего органа 12 000 об/мин. Для определения заявленных показателей использовали все составные части пророщенного зерна путем разового измельчения.

Контрольные образцы зерна пшеницы проращивали в идентичных условиях с использованием дистиллированной воды при контроле длительности процесса проращивания, высушивали, измельчали и далее определяли все заявленные показатели.

Контролируемыми показателями выбраны: длина корневой системы ( $Y_1$ ), интенсивность развития корневой системы ( $Y_2$ ), количество флавоноидов в пересчете на кверцетин ( $Y_3$ ), содержание фенольных соединений в пересчете на эквивалент галловой кислоты ( $Y_4$ ) и общая антиоксидантная активность, DPPH ( $Y_5$ ).

Длину и интенсивность развития корневой системы определяли на 1000 единиц зерна пшеницы, вычисляли среднеарифметическое значение [17].

Общую антиоксидантную активность (АОА) устанавливали по поглощению радикалов в образцах с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразида (DPPH), светопоглощение измеряли при 515 нм [18, 19].

Определение общего содержания флавоноидов проводили с использованием этанольного раствора хлорида алюминия и ацетата натрия, светопоглощение измеряли при 415 нм [20].

Уровень фенольных соединений устанавливали по методу Синглтона [20] с использованием реактива Фолина–Чокальтеу, светопоглощение определяли при 700 нм.

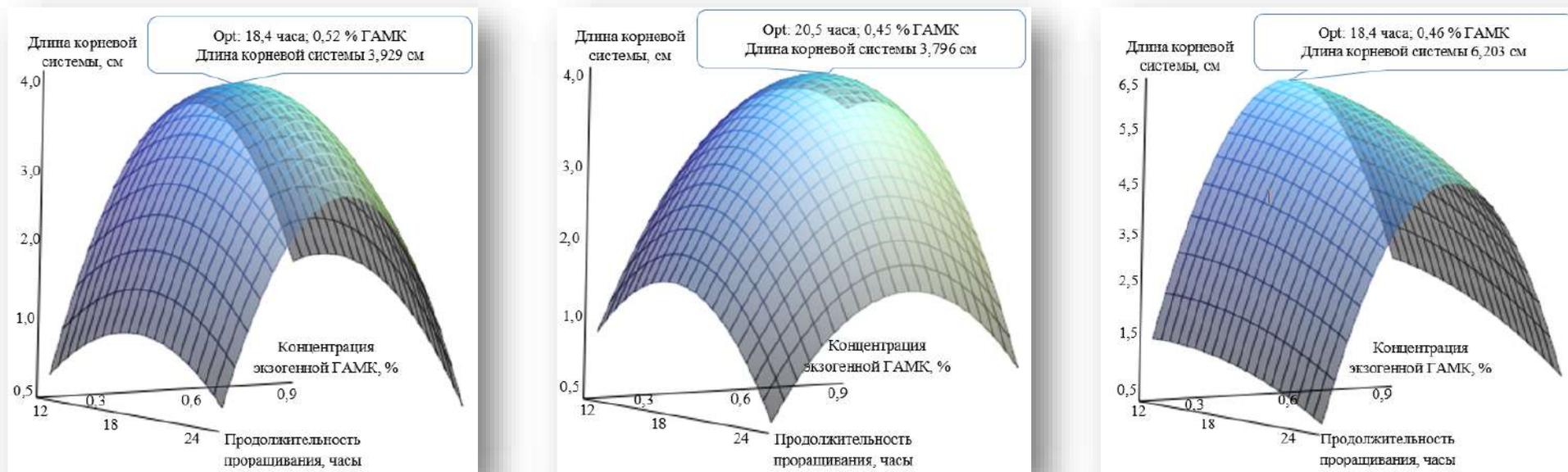
Количество ГАМК фиксировали спектрофотометрически [21] с использованием отрицательно заряженного зонда наночастиц серебра, покрытых цитратом (AgNP). Исследования проводились при ГАМК pH 3,8, светопоглощение определяли при 390 нм.

Для проведения всех исследований использовали спектрофотометр SSI 2101 (Shanghai KE QI Instrument Co., Ltd, Китай).

## Результаты и их обсуждение

Исследование растворов трех образцов экзогенной ГАМК в технологии проращивания имеет положительное влияние на длину (рисунок 2) и интенсивность (рисунок 3) развития корневой системы.

Все представленные поверхности откликов имеют схожую динамику от концентрации экзогенной ГАМК. Отмечается, что наиболее выраженный эффект наблюдается при использовании концентрации растворов ГАМК в диапазоне от 0,45 до 0,52% независимо от выбранного производителя. Исходя из вышеотмеченной динамики можно сказать, что высокие концентрации экзогенной ГАМК не являются гарантом интенсификации процесса проращивания, а выбор оптимумов данного процесса может сократить экономические расходы на реализацию данного подхода.



$$Y_1 = -3,407 \cdot X_1^2 - 0,031 \cdot X_2^2 - 0,083 \cdot X_1 \cdot X_2 + 5,078 \cdot X_1 + 1,201 \cdot X_2 - 8,446$$

**Образец 1**

$$Y_1 = -2,444 \cdot X_1^2 - 0,089 \cdot X_2^2 - 0,067 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,389 \cdot X_1 + 3,322 \cdot X_2 - 24,327$$

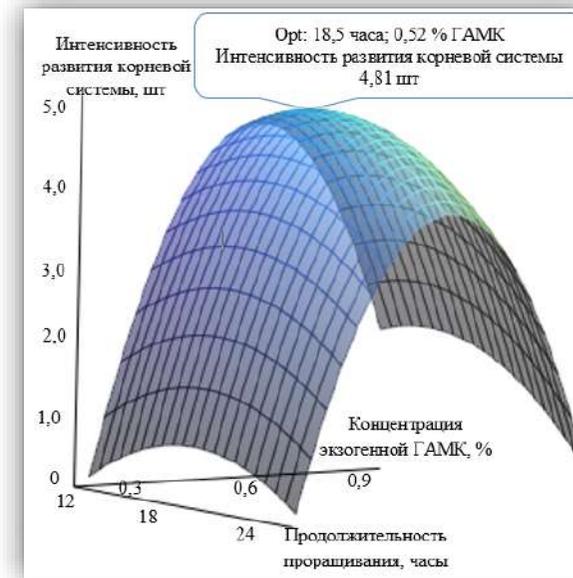
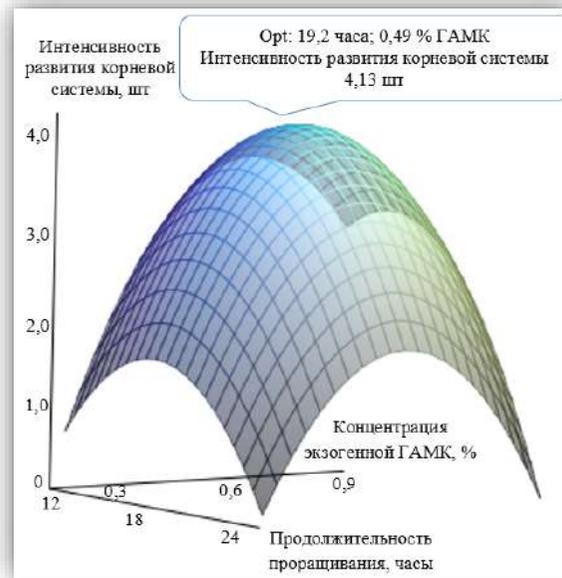
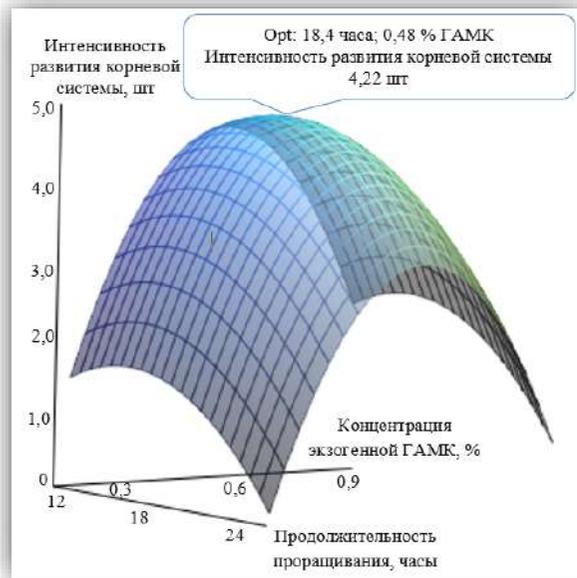
**Образец 2**

$$Y_1 = -6,667 \cdot X_1^2 - 0,019 \cdot X_2^2 - 0,157 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 9,236 \cdot X_1 + 0,844 \cdot X_2 - 6,918$$

**Образец 3**

Рисунок 2 – Результаты математического моделирования по показателю «Длина корневой системы, см» от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания

Figure 2. Results of mathematical modelling on the indicator 'Root system length, cm' depending on the concentration of exogenous GABA and duration of germination



$$Y_2 = -2,148 \cdot X_1^2 - 0,019 \cdot X_2^2 - 1,389 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,069 \cdot X_1 + 0,694 \cdot X_2 - 2,653$$

**Образец 1**

$$Y_2 = -3,481 \cdot X_1^2 - 0,012 \cdot X_2^2 - 0,074 \cdot X_1 \cdot X_2 + 4,836 \cdot X_1 + 0,51 \cdot X_2 - 1,963$$

**Образец 2**

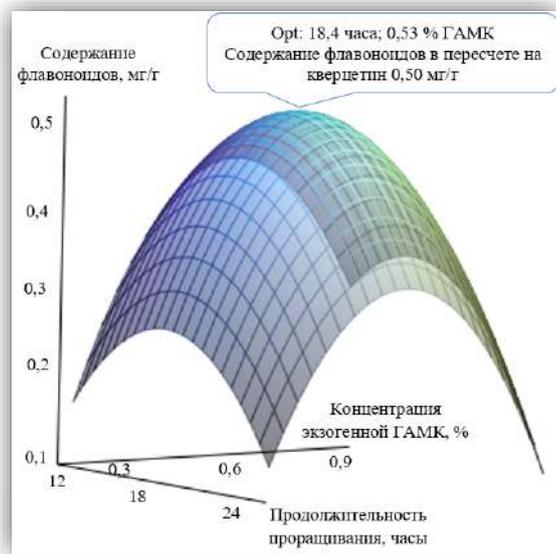
$$Y_2 = -2,093 \cdot X_1^2 - 0,03 \cdot X_2^2 - 0,056 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,183 \cdot X_1 + 1,147 \cdot X_2 - 6,624$$

**Образец 3**

Рисунок 3 – Результаты математического моделирования по показателю «Интенсивность развития корневой системы, шт» от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания

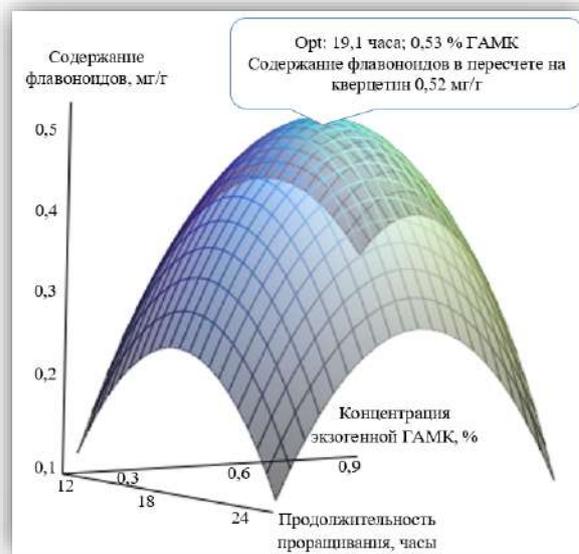
Figure 3. Results of mathematical modelling on the indicator 'Intensity of root system development, pcs' depending on the concentration of exogenous GABA and duration of germination

Процессы проращивания в условиях экзогенной ГАМК положительно влияют на накопление флавоноидов (рисунок 4) и фенольных соединений (рисунок 5).



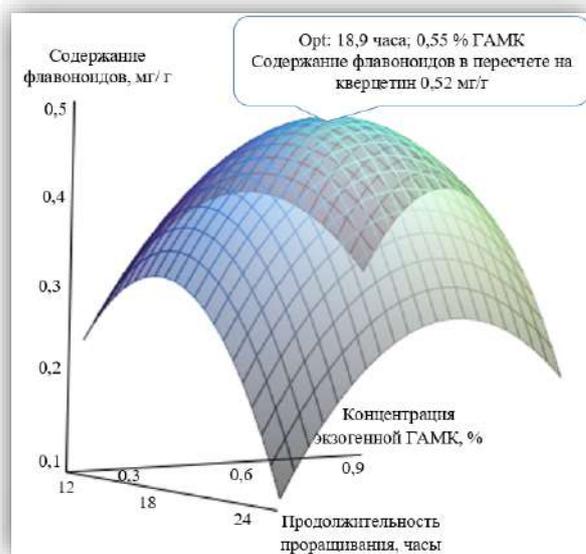
$$Y_3 = -0,131 \cdot X_1^2 - 5,787 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 1,944 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,176 \cdot X_1 + 0,022 \cdot X_2 - 0,202$$

**Образец 1**



$$Y_3 = -0,256 \cdot X_1^2 - 8,056 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 4,444 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,357 \cdot X_1 + 0,033 \cdot X_2 - 0,338$$

**Образец 2**

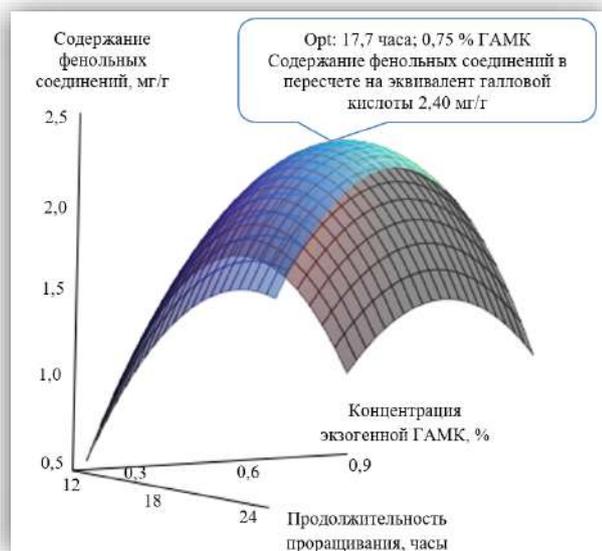


$$Y_3 = -0,222 \cdot X_1^2 - 4,722 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 + 1,111 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,222 \cdot X_1 + 0,017 \cdot X_2 - 0,173$$

**Образец 3**

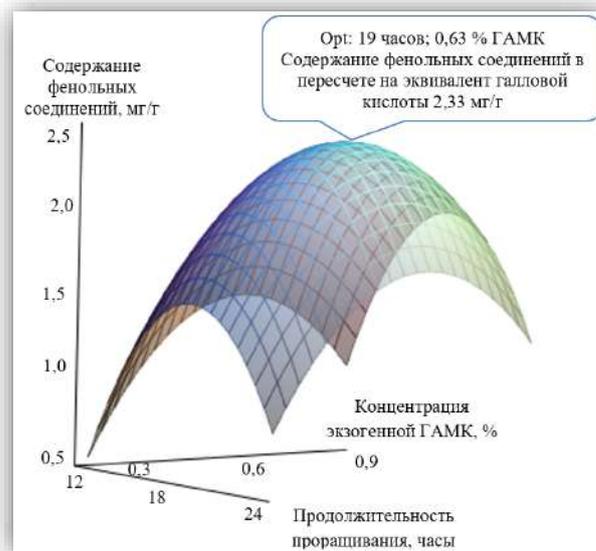
Рисунок 4 – Результаты математического моделирования по показателю «Содержание флавоноидов, мг/г» от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания

Figure 4. Results of mathematical modelling on the indicator 'Flavonoid content, mg/g' depending on the concentration of exogenous GABA and duration of germination



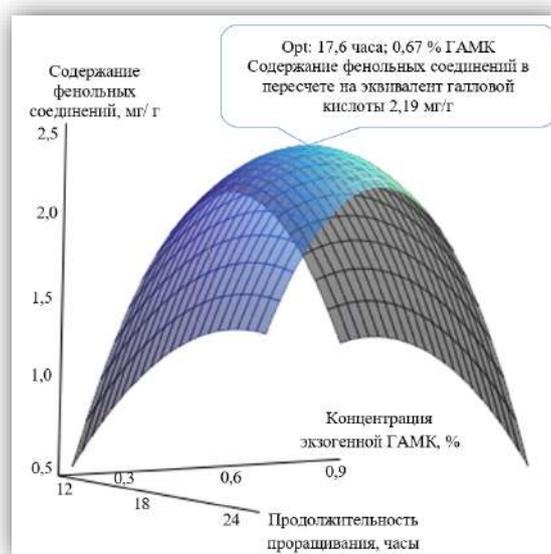
$$Y_4 = -0,144 \cdot X_1^2 - 8,889 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 4,028 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,288 \cdot X_1 + 0,034 \cdot X_2 - 0,172$$

**Образец 1**



$$Y_4 = -0,269 \cdot X_1^2 - 5,324 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 + 0,338 \cdot X_1 + 0,02 \cdot X_2 - 0,067$$

**Образец 2**



$$Y_4 = -0,018 \cdot X_1^2 - 8,843 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 5,417 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,205 \cdot X_1 + 0,035 \cdot X_2 - 0,157$$

**Образец 3**

*Рисунок 5 – Результаты математического моделирования по показателю «Содержание фенольных соединений, мг/г» от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания  
Figure 5. Results of mathematical modelling on the indicator 'Content of phenolic compounds, mg/g' depending on concentration of exogenous GABA and duration of germination*

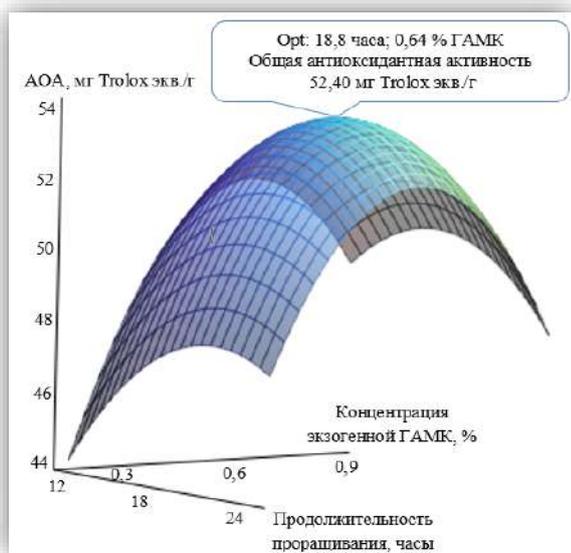
Содержание максимального количества флавоноидов в образцах колеблется в диапазоне 0,50–0,52 мг/г, тогда как у контрольных образцов зерна (проращиваемых без растворов экзогенной ГАМК) данные значения имеют диапазон 0,20–0,28 мг/г. В ряде работ показано [5, 22], что обработка растворами экзогенной ГАМК значительно индуцирует экспрессию таких антиоксидантных ферментов, как супероксиддисмутаза и каталаза в процессе проращивания с ГАМК, что интенсифицирует синтез и накопление флавоноидов.

Содержание максимального количества фенольных соединений в исследуемых образцах колеблется в диапазоне 2,19–2,40 мг/г, тогда как у контрольных образцов зерна эти значения имеют диапазон 0,12–0,23 мг/г. Полученные данные согласуются с результатами Yan Ma и его коллег [23],

которые отмечают, что экзогенное применение позволило повысить в 1,26 и 1,16 раз общее содержание фенолов на 4-й и 6-й день проращивания голозерного ячменя.

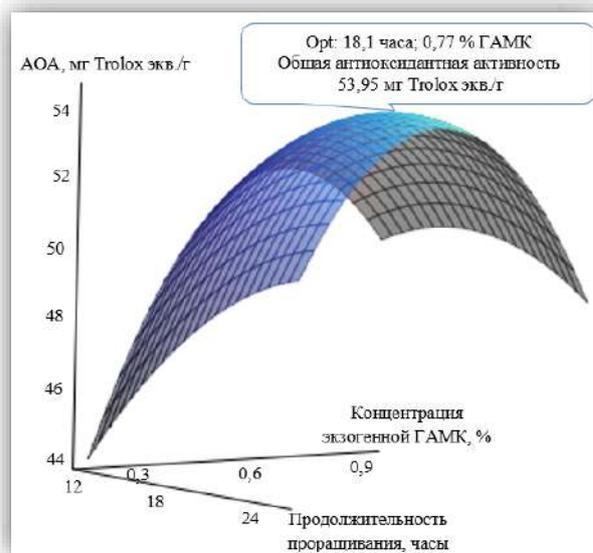
В работе [24] доказано, что экзогенная ГАМК способна проникать через клеточные мембраны и попадать в растительные клетки, тем самым стимулировать выработку гормонов, регулировать рост и развитие живых организмов, а также вызывать внутриклеточные физиологические и биохимические изменения, направляя экспрессию генов для синтеза фенольных соединений.

Рядом исследователей подчеркивается, что эффект использования экзогенной ГАМК заключается в увеличении синтеза белка и активности ферментов, что приводит к повышению содержания фенолов [25–27] и общей антиоксидантной активности (рисунок 6).



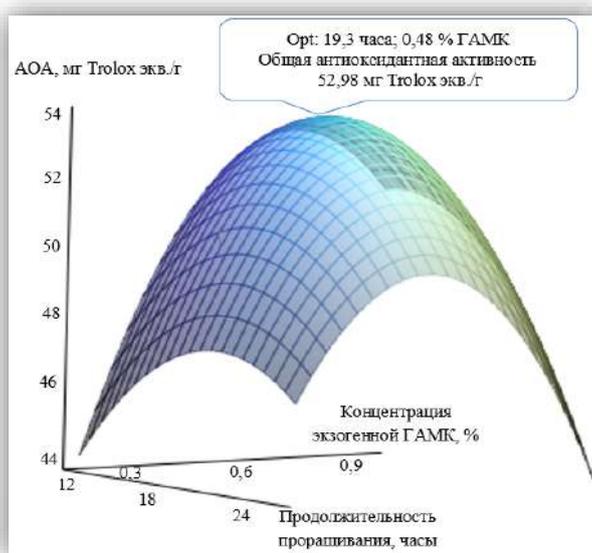
$$Y_5 = -13,222 \cdot X_1^2 - 0,084 \cdot X_2^2 - 0,386 \cdot X_1 \cdot X_2 + 24,07 \cdot X_1 + 3,42 \cdot X_2 + 12,527$$

**Образец 1**



$$Y_5 = -7,239 \cdot X_1^2 - 0,078 \cdot X_2^2 - 0,577 \cdot X_1 \cdot X_2 + 21,819 \cdot X_1 + 3,271 \cdot X_2 + 15,833$$

**Образец 2**



$$Y_5 = -9,654 \cdot X_1^2 - 0,053 \cdot X_2^2 - 0,552 \cdot X_1 \cdot X_2 + 20,245 \cdot X_1 + 2,327 \cdot X_2 + 25,599$$

**Образец 3**

*Рисунок 6 – Результаты математического моделирования по показателю «Антиоксидантная активность, мг Trolox экв./г» от концентрации раствора экзогенной ГАМК и длительности проращивания  
Figure 6. Results of mathematical modelling on the indicator ‘Antioxidant activity, mg Trolox eq./g’ depending on concentration of exogenous GABA and duration of germination*

Проведение процесса проращивания в условиях экзогенной ГАМК позволяет более чем в три раза повысить значения антиоксидантной активности с 15,3–18,6 мг Trolox экв./г (контроль) до 52,40–54,09 мг Trolox экв./г для опытных образцов зерна пшеницы.

Полученные данные согласуются с научными результатами [30, 31], в которых отмечено, что экзогенная ГАМК увеличивает значения антиоксидантной активности, определяемой методами ABTS и DPPH на 22 и 66% на 4-й день и на 5 и 11% на 6-й день проращивания зерна, соответственно. Кроме того, отмечается [28, 29], что содержание эндогенной ГАМК способствовало повышению активности ГАМК-трансаминазы (ГАМК-Т) и сукцинатполуальдегиддегидрогеназы, в то время как активность глутаматдекарбоксилазы снижалась. Также исследователи подчеркивают, что установлена прямая положительная зависимость между количеством экзогенной ГАМК и накоплением фенольных соединений.

Объяснение положительной роли экзогенной ГАМК в процессе проращивания зерна возможно предположить в следующих механизмах [5, 29, 30, 31]: i ГАМК-шунт является поставщиком никотинамидадениндинуклеотида (НАДН) через цикл трикарбоновых кислот, что влияет на уровень метаболитов зерна; ii устойчивость экзогенной ГАМК к неблагоприятным факторам способствует поддержанию гормонов и минеральных питательных веществ на необходимом уровне для прорастания зерна и снижает интенсивность перекисного окисления липидов; iii эндогенная ГАМК, путем активации транскрипции ферментов, участвующих в биосинтезе фенолов (p-гидроксibenзойной, сиреневой, галловой, протокатехиновой, кофейной и др. кислот), стимулирует увеличение содержания фенольных соединений зерна в процессе проращивания.

Полученные опытные образцы зерна пшеницы имели значения содержания общего количества ГАМК 22,6–24,2 мг/100 г относительно значений контрольных образцов зерна ГАМК 5,2–5,8 мг/100 г. Оценивая общее количество ГАМК в пророщенном зерне пшеницы нельзя недооценивать вклад процесса синтеза эндогенной ГАМК. Так в процессе проращивания ГАМК метаболизируется путем декарбоксилирования глутамата или деградации полиаминов [10, 15, 23]. Первый путь, известный как ГАМК-шунт, является основным метаболическим путем в процессах проращивания зерновых. Глутаматдекарбоксилаза является ключевым ферментом, участвующим в биосинтезе ГАМК, который преобразует L-глутаминовую кислоту в ГАМК [2, 8].

## Заключение

Использование современных технологий обработки растительного сырья и получения сырьевых ингредиентов с повышенным содержанием биологически активных веществ природного происхождения для создания пищевых продуктов, благоприятно влияющих на организм человека, является перспективным направлением развития пищевой промышленности. В качестве такой технологии была предложена биофортификация зерна пшеницы, основанная на применении способа проращивания в условиях присутствия экзогенной ГАМК.

Результаты экспериментов показали, что независимо от выбранного порошка экзогенной ГАМК динамика всех исследуемых параметров имела одинаковый характер. Это позволило на основе математической обработки данных определить наиболее оптимальный диапазон времени проращивания от 18 ч 15 мин до 18 ч 55 мин при концентрации экзогенной ГАМК 0,53–0,58%. Данные условия биофортификации позволяют получить общее содержание (экзогенной и эндогенной) ГАМК в количестве 22,6–24,2 мг/100 г пророщенного зерна пшеницы, содержание флавоноидов в пересчете на кверцетин 0,50–0,52 мг/г, фенольных соединений в пересчете на эквивалент галловой кислоты 2,19–2,40 мг/г и антиоксидантной активности 52,40–54,09 мг Trolox экв./г (DPPH).

Таким образом, использование подхода биофортификации для получения сырьевых ингредиентов повышенной пищевой ценности и продуктов питания на их основе можно считать актуальным и перспективным.

## Литература/References

1. Michaeli S., Fromm H. Closing the loop on the GABA shunt in plants: are GABA metabolism and signaling entwined? *Frontiers in Plant Science*. 2015, V. 6, article 419. DOI: 10.3389/fpls.2015.00419

2. Li W., Liu J., Ashraf U., Li G., Li Y., Lu W., Hu J. Exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) application improved early growth, net photosynthesis, and associated physio-biochemical events in maize. *Frontiers in Plant Science*. 2016, V. 7, article 919. DOI: 10.3389/fpls.2016.00919
3. Bhattacharjee P., Chakraborti S., Chakraborty S., Paul K. The role of gamma-aminobutyric acid (GABA) during abiotic stress in plants. In: Ramakrishna A., Gill S.S. (Eds) *Metabolic Adaptations in Plants during Abiotic Stress*. CRC Press. 2018. pp. 239–248. DOI: 10.1201/b22206-21
4. Ramos-Ruiz R., Martinez F., Knauf-Beiter G. The effects of GABA in plants. *Cogent Food & Agriculture*. 2019, V. 5, article 1670553. DOI: 10.1080/23311932.2019.1670553
5. Tufail T., Bader Ul Ain H., Virk M.S., Ashraf J., Ahmed Z., Khalil A.A., Rasheed A., Xu B. GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) enrichment and detection methods in cereals: Unlocking sustainable health benefits. *Food Chemistry*. 2025, V. 464, Ch. 3, article 141750. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141750
6. Hayakawa K., Kimura M., Kasaha K., Matsumoto K., Sansawa H., Yamori Y. Effect of a  $\gamma$ -aminobutyric acid-enriched dairy product on the blood pressure of spontaneously hypertensive and normotensive Wistar–Kyoto rats. *British Journal of Nutrition*. 2004, V. 92, no. 3, pp. 411–417.
7. Hinton T., Johnston G.A.R. GABA-enriched teas as neuro-nutraceuticals. *Neurochemistry International*. 2020, V. 141, article 104895. DOI: 10.1016/j.neuint.2020.104895
8. Feng W., Liu J., Cheng H., Zhang D., Tan Y., Peng C. Dietary compounds in modulation of gut microbiota-derived metabolites. *Frontiers in Nutrition*. 2022, V. 9, article 939571. DOI: 10.3389/fnut.2022.939571
9. Yu S., Zhen C., Zhao P., Li J., Qin Z., Gao H. Antifungal mechanisms of  $\gamma$ -aminobutyric acid against the postharvest pathogen *Alternaria alternata*. *LWT*. 2023, V. 173, article 114314. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114314
10. Wang H., Yin X., Li J., Sun Y., Cheng F., Zhu D.  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment improves disease resistance and preserves fresh-cut *Mesembryanthemum crystallinum* L. *LWT*. 2025, V. 217, article 117398. DOI: 10.1016/j.lwt.2025.117398
11. Ma Y., Wang P., Chen Z., Gu Z., Yang R. GABA enhances physio-biochemical metabolism and antioxidant capacity of germinated hulless barley under NaCl stress. *Journal of Plant Physiology*. 2018, V. 231, pp. 192–201. DOI: 10.1016/j.jplph.2018.09.015
12. Barbosa J.M., Singh N.K., Cherry J.H., Locy R.D. Nitrate uptake and utilization is modulated by exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2010, V. 48, no. 6, pp. 443–450. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.01.020
13. Bouché N., Fromm H. GABA in plants: just a metabolite? *Trends in Plant Science*. 2004, V. 9, no. 3, pp. 110–115. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.01.006
14. Hu X.Y., Trevelyan E., Chai Q.Y., Wang C.C., Fei Y.T., Liu J.P., Robinson N. Effectiveness and safety of using acupoint Shui Gou (GV 26): A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Acupuncture and Related Therapies*. 2015, V. 3, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.arthe.2014.12.001
15. Wang Y., Luo Z., Huang X., Yang K., Gao S., Du R. Effect of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel. *Scientia Horticulturae*. 2014, V. 168, pp. 132–137. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.01.022
16. Горобец Д.В., Оськин С.В., Цокур Д.С., Смолин С.А., Цокур Е.С. Влияние обработки анолита для обеззараживания мелкосемянной культуры амарант // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 4. С. 1–4. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.33  
Gorobets D.V., Oskin S.V., Tsokur D.S., Smolin S.A., Tsokur Y.S. Influence of anolyte treatment for the disinfection of the small seed amaranth culture. *International Research Journal*. 2023, no. 4, pp. 1–4. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.33 (In Russian)
17. Горобец Д.В., Петенко А.И., Цокур Д.С., Цокур Е.С., Смолин С.А. Повышение качества пищевых проростков путем стимуляции роста амаранта электроактивированным раствором католита // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 3. С. 1–5. DOI: 10.23670/IRJ.2023.129.72  
Gorobets D.V., Petenko A.I., Tsokur D.S., Tsokur Y.S., Smolin S.A. Improving the quality of food sprouts by stimulating the growth of amaranth with an electroactivated catholyte solution. *International Research Journal*. 2023, no. 3, pp. 1–5. DOI: 10.23670/IRJ.2023.129.72 (In Russian)
18. Sánchez-Moreno C., Larrauri A., Saura-Calixto F. A procedure to measure the antioxidant efficiency of polyphenols. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1998, V. 76, no. 2, pp. 270–276. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(199802)76:2.
19. Нилова Л.П. Оценка антиоксидантных свойств консервов из клюквы с сахаром при изготовлении и хранении // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2024. № 4. С. 3–11. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-4-3-11  
Nilova L.P. Antioxidant properties of canned cranberry with sugar during processing and storage. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 4, pp. 3–11. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-4-3-11 (In Russian)

20. Shafii Z.A., Basri M., Malek E.A., Ismail M. Phytochemical and antioxidant properties of Manilkara zapota (L.) P. Royen fruit extracts and its formulations for cosmaceutical application. *Asian Journal of Plant Science & Research*. 2017, V. 7, no. 3, pp. 29–41.
21. Jinnarak A., Teerasong S. A novel colorimetric method for detection of gamma-aminobutyric acid based on silver nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016, V. 229, pp. 315–320. DOI: 10.1016/j.snb.2016.01.115
22. Yang H., Zhang Q., Zhong S., Yang H., Ren T., Chen C., et al. Genome-wide identification of superoxide dismutase and expression in response to fruit development and biological stress in Akebia trifoliata: A bioinformatics study. *Antioxidants*. 2023, V. 12, no. 3, article 726. DOI: 10.3390/antiox12030726
23. Ma Y., Wang P., Wang M., Sun M., Gu Z., Yang R. GABA mediates phenolic compounds accumulation and the antioxidant system enhancement in germinated hullless barley under NaCl stress. *Food Chemistry*. 2019, V. 270, pp. 593–601. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.07.092
24. Gu M., Yang J., Tian X., Fang W., Xu J., Yin Y. Enhanced total flavonoid accumulation and alleviated growth inhibition of germinating soybeans by GABA under UV-B stress. *RSC Advances*. 2022, V. 11, pp. 6619–6630. DOI: 10.1039/D2RA00523A
25. Zhao Y.Y., Xie C., Wang P., Gu Z.X., Yang R.Q. GABA regulates phenolics accumulation in soybean sprouts under NaCl stress. *Antioxidants*. 2021, V. 10, no. 6, article 990. DOI: 10.3390/ANTIOX10060990
26. Estivi L., Brandolini A., Condezo-Hoyos L., Hidalgo A. Impact of low-frequency ultrasound technology on physical, chemical and technological properties of cereals and pseudocereals. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022, V. 86, article 106044. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106044
27. Науменко Н.В., Фаткуллин Р.И., Калинина И.В., Радкевич А.В., Науменко Е.Е., Попова Н.В., Васильева Е.К. Влияние экзогенной ГАМК на антиоксидантные свойства пророщенного зерна // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 3. С. 134–147. DOI: 10.36107/spfr.2023.423  
Naumenko N.V., Fatkullin R.I., Kalinina I.V., Radkevich A.V., Naumenko E.E., Popova N.V., Vasilieva E.K. The effect of exogenous gamma-aminobutyric acid on the antioxidant properties of sprouted grain. *Storage and Processing of Farm Products*. 2023, no. 3, pp. 134–147. DOI: 10.36107/spfp.2023.423 (In Russian)
28. Lee X.Y., Tan J.S., Cheng L.H. Gamma aminobutyric acid (GABA) enrichment in plant-based food – a mini review. *Food Reviews International*. 2023, V. 39, no. 8, pp. 5864–5885. DOI: 10.1080/87559129.2022.2097257
29. Hou D., Tang J., Feng Q., Niu Z., Shen Q., Wang L., Zhou S. Gamma-aminobutyric acid (GABA): A comprehensive review of dietary sources, enrichment technologies, processing effects, health benefits, and its applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2024, V. 64, no. 24, pp. 8852–8874. DOI: 10.1080/10408398.2023.2204373
30. Ali S., Anjum M.A., Nawaz A., Ejaz S., Anwar R., Khaliq G., et al. Postharvest  $\gamma$ -aminobutyric acid application mitigates chilling injury of aonla (*Emblica officinalis* Gaertn.) fruit during low temperature storage. *Postharvest Biology and Technology*. 2022, V. 185, article 111803. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2021.111803
31. Yang J., Sun C., Zhang Y., Fu D., Zheng X., Yu T. Induced resistance in tomato fruit by  $\gamma$ -aminobutyric acid for the control of *Alternaria* rot caused by *Alternaria alternata*. *Food Chemistry*. 2017, V. 221, pp. 1014–1020. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.11.061

#### Информация об авторах

Анастасия Владимировна Радкевич – аспирант факультета биотехнологий

Наталья Владимировна Науменко – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пищевых и биотехнологий

Ирина Валерьевна Калинина – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пищевых и биотехнологий

Елизавета Константиновна Васильева – студент кафедры цифровых технологий управления транспортными процессами

#### Information about the authors

Anastasia V. Radkevich, Postgraduate Student, Faculty of Biotechnology

Natalia V. Naumenko, D. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Food and Biotechnology

Irina V. Kalinina, D. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Food and Biotechnology

Elizaveta K. Vasileva, Student, Department of the Digital Technologies for Managing Transport Processes

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 26.02.2025

Одобрена после рецензирования 21.03.2025

Принята к публикации 24.03.2025

The article was submitted 26.02.2025

Approved after reviewing 21.03.2025

Accepted for publication 24.03.2025