

Н.В. Наumenko¹, ✉
Р.И. Фаткуллин¹,
И.В. Калинина¹,
Е.Е. Наumenko¹,
Е. Иванисова²,
Е.К. Васильева³,
А.В. Радкевич⁴

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Словацкий сельскохозяйственный университет, Нитра, Словакия

³Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉ Naumenkonv@susu.ru

Поступила в редакцию:
03.03.2023

Одобрена после рецензирования:
01.06.2023

Принята к публикации:
21.06.2023

Natalya V. Naumenko¹, ✉
Rinat I. Fatkullin¹,
Irina V. Kalinina¹,
Ekaterina E. Naumenko¹,
Eva Ivanišová²,
Elizaveta K. Vasilyeva³,
Anastasia V. Radkevich⁴

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Slovak University of Agriculture, Nitra, Slovakia

³Russian University of Transport, Moscow, Russia

⁴ITMO University, St. Petersburg, Russia

✉ Naumenkonv@susu.ru

Received by the editorial office:
03.03.2023

Accepted in revised:
01.06.2023

Accepted for publication:
21.06.2023

Контролируемое проращивание зерновых культур – эффективный способ переработки низкокачественного сырья

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Развитие технологий приработки зерновых культур и получения сырьевых ингредиентов, обладающих повышенными антиоксидантными свойствами, содержащих в своем составе биологически активные вещества природного происхождения, позволит сформировать современный отечественный рынок полезных пищевых продуктов для поддержания здоровья населения страны в долгосрочной перспективе. В качестве одного из таких подходов может быть контролируемое проращивание зерновых культур при ультразвуковой обработке на этапе замачивания. Данная технология позволит получить максимальный выход готовой продукции с единицы перерабатываемого сырья, перерабатывать низкокачественное сырье и создавать продукты с повышенной пищевой ценностью.

Методы. Объектами исследования были определены три образца зерновых культур: пшеница, ячмень, овес. На начальном этапе проводился входной контроль качества сырья и его обеззараживание физическим методом воздействия. Для опытных образцов зерновых культур на этапе замачивания осуществляли воздействие ультразвуком ($22 \pm 1,25$ кГц) 245 Вт/л в течение 5 мин., далее зерно замачивали в течение 8 час. (зерно пшеницы) и 12 час. (зерно ячменя и овса) проводили процесс проращивания до достижения величины роста 1,5–2 мм более чем у 90% зерен. С контрольными образцами проводили все операции в той же последовательности, исключая процесс ультразвукового воздействия. Во всех исследуемых образцах были определены общее содержание флавоноидов и полифенольных соединений с применением спектрофотометрического метода, общая антиоксидантная активность с использованием DPPH-метода, а также содержание γ -аминомасляной кислоты с использованием автоматизированной системы жидкостной хроматографии.

Результаты. Исследования показали, что для всех пророщенных образцов зерновых культур характерны достаточно высокие значения содержания флавоноидов и полифенольных соединений. При этом у образцов, полученных при ультразвуковом воздействии, отмечается увеличение содержания флавоноидов в среднем в 7,3–8,9 раза, полифенолов — в 2–5,6 раза. В процессе интенсифицированного контролируемого проращивания общая антиоксидантная активность увеличивается на 31,6–40,0% относительно контрольных образцов зерновых культур. Прирост содержания ГАМК в образцах после ультразвукового воздействия составил в среднем 360–490%. Полученные результаты подтвердили возможность и целесообразность использования предложенной технологии контролируемого проращивания в получении сырьевых ингредиентов из пророщенных зерновых культур. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 23-26-00290.

Ключевые слова: зерновые культуры, зерно пшеницы, зерно ячменя, зерно овса, антиоксидантные свойства, γ -аминомасляная кислота, ультразвуковое воздействие

Для цитирования: Наumenko Н.В. и др. Контролируемое проращивание зерновых культур — эффективный способ переработки низкокачественного сырья. *Аграрная наука*. 2023; 372(7): 149–154. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-149-154>

© Наumenko Н.В., Фаткуллин Р.И., Калинина И.В., Наumenko Е.Е., Иванисова Е., Васильева Е.К., Радкевич А.В.

Controlled germination of grain crops is an effective way to processing low-quality raw materials

ABSTRACT

Relevance. The development of technologies of cereal crops germination and obtaining of raw ingredients with increased antioxidant properties, containing in their composition biologically active substances of natural origin, will allow to form a modern domestic market of useful food products to maintain the health of the country in the long term. One such approach could be controlled germination of grain crops by ultrasonic treatment during the soaking stage. This technology will maximise the yield of finished products per unit of processed raw material, process low-quality raw materials and create products with increased nutritional value.

Methods. The objects of the study were three samples of grain crops: wheat, barley, oats. At the initial stage, incoming quality control of raw materials and their disinfection by physical method of exposure were carried out. For experimental samples of cereal crops at the stage of soaking the impact of ultrasound (22 ± 1.25 kHz) 245 W/l for 5 min, then the grain was soaked for 8 hours (wheat grain) and 12 hours (barley and oats grain), the process of germination was carried out until reaching the sprout size 1.5–2 mm in more than 90% of grains. All operations with control samples were performed in the same sequence, excluding the process of ultrasound exposure. The total content of flavonoids and polyphenolic compounds was determined in all tested samples using spectrophotometric method, total antioxidant activity using DPPH-method, and γ -aminobutyric acid content using automated liquid chromatography system.

Results. The studies showed that all germinated samples of cereal crops are characterized by sufficiently high values of flavonoid and polyphenolic compounds. At the same time, the samples obtained by ultrasound exposure showed an increase in the content of flavonoids by an average of 7.3–8.9 times, polyphenols by 2–5.6 times. In the process of intensified controlled germination, the total antioxidant activity increased by 31.6–40.0%, relative to the control samples of grain crops. The increase in GABA content in samples after ultrasound exposure averaged 360–490%. The results confirmed the possibility and feasibility of using the proposed technology of controlled germination in obtaining raw ingredients from germinated cereal crops. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation Grant 23-26-00290.

Key words: cereals, wheat grain, barley grain, oat grain, antioxidant properties, γ -aminobutyric acid, ultrasound

For citation: Naumenko N.V. *et al.* Controlled sprouting of grain crops is an effective way to process low-quality raw materials. *Agrarian science*. 2023; 372(7): 149–154 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-149-154>

© Naumenko N.V., Fatkullin R.I., Kalinina I.V., Naumenko E.E., Ivanisova E., Vasileva E.K., Radkevich A.V.

Введение/Introduction

По данным Росстата¹, увеличение урожая зерновых культур в России в 2022 году относительно прошлого года составило 7,4% (150 млн т). Полученные объемы зерна и внешнеполитические факторы привели к ряду проблем, связанных с переориентацией экспорта и недостаточностью мощностей зерновых хранилищ. Полученные рекордные урожаи, особенно зерна пшеницы, по своему качественному составу в большом процентном соотношении содержат четвертый (и даже пятый) класс, что обуславливает необходимость разработки технологических подходов переработки низкокачественного сырья и создания продуктов с повышенной пищевой ценностью [1, 3].

Поиск новых высокоэффективных подходов переработки растительной продукции является актуальным и востребованным направлением для пищевой отрасли. Особый упор делается на внедрение современных отечественных технологий переработки сырья и максимальный выход готовой продукции с единицы перерабатываемого сырья.

Одним из таких направлений можно выделить проращивание зерновых культур в контролируемых условиях. Предыдущими исследованиями [2] и рядом работ, представленных в открытой печати [20], установлено, что контролируемое проращивание зерновых культур должно проводиться в регламентируемых значениях таких характеристик, как температура, влажность, доступ кислорода, длительность процесса и использование различных способов интенсификации накопления биологически активных веществ. Данная технология позволяет получать сырьевые ингредиенты повышенной пищевой ценности. Так, Ding и его коллеги [9, 10] отмечают увеличение при проращивании содержания витаминов (A, группы B, C и E), полифенолов и флавоноидов [23], что положительно сказывается на антиоксидантной активности [14] и синтезе фитостероидов [24].

Технология проращивания зерновых культур запускает ряд процессов, основанных на активации ферментативной системы, что повышает усвояемость сахаров, аминокислот [24] и стимулирует накопление γ -аминомасляной кислоты (ГАМК) [8–10], минеральных веществ [25], пищевых волокон [26].

Вместе с тем важно учитывать, что сам по себе процесс проращивания связан с множеством рисков, таких как излишнее повышение амилазной активности, кислотности, развитие плесневой микрофлоры и др., что может сделать непригодным полученное сырье для дальнейшего использования. Поэтому данная технология должна разрабатываться строго персонализированно для каждого отдельного вида зерновой культуры с учетом особенностей ее химического состава, длительности ведения процесса и использования технологических приемов, интенсифицирующих данный процесс.

В качестве одного из приемов повышения интенсивности процесса контролируемого проращивания и интенсификации накопления биологически активных веществ может быть использовано ультразвуковое воздействие.

Ультразвуковое воздействие — это форма акустической энергии, принимающая природу циклического звукового давления, имеющая волны с частотой, превышающей верхний предел человеческого слуха (0,20 кГц) [7]. Данный вид воздействия как новая технология акустической обработки активно используется для интенсификации накопления биологически активных веществ² в растениях, в том числе в семенах [7, 12, 17]. Акустическая энергия подается через жидкие среды, поэтому обработку зерновых культур необходимо проводить в гидромодуле с водой или растворами специального химического состава.

Исследователи [6, 8] отмечают, что содержание ГАМК увеличивается в растительном сырье при применении ультразвуковой обработки (40 кГц, 300 Вт) во время процесса замачивания в течение 30 мин. Обработка в режиме (25 кГц, 5,1 Вт/л) в течение 10–30 мин. способна активизировать накопление витаминов B_1 , B_2 , B_3 [23], воздействие в режиме (25 кГц, 26 Вт/л) повышает антиоксидантную способность [23]. Ряд исследователей [13, 15] отмечают положительное влияние регулярного употребления растительных продуктов на основе пророщенных культур, которые содержат в большом количестве ГАМК, на улучшение памяти, пространственных когнитивных функций [24] и защитных эффектов при гипотиреозе, а также на улучшение сердечно-сосудистых заболеваний. На основании вышесказанного можно отметить, что оценка потенциального положительного влияния пророщенных зерновых культур на организм человека является актуальной [4–9].

Цель исследования — оценка антиоксидантных свойств и содержания γ -аминомасляной кислоты в зерновых культурах после проведения процесса контролируемого проращивания.

Материал и методы исследования /

Material and methods

Для проведения исследований были определены следующие объекты:

- зерно пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Эритропермум урожая 2022 года;
- зерно ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Челябинец 1 урожая 2022 года;
- зерно овса (*Avena sativa*) сорта Универсал 1 урожая 2022 года.

Для формирования проб зерновых культур руководствовались ГОСТ 13586.3-2015³. Для выравнивания размерного ряда и проведения контролируемого проращивания предварительно использовали программу SeedCounter v.1.9.5 [16].

На этапе входного контроля зерновых культур определяли органолептические показатели исследуемых образцов зерновых культур согласно ГОСТ 9353-2016⁴, ГОСТ 28672-2019⁵, ГОСТ 28673-2019⁶, *натуру* исследуемых образцов зерновых культур — по ГОСТ 10840-2017⁷.

С точки зрения экономической эффективности предлагаемой технологии контролируемого проращивания зерновых культур использовали зерно заведомо низкой классности.

¹ Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. — URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 26.03.2023).

² Kalinina I.V., Potoroko I., Sonawane Sh.H. Sonochemical encapsulation of taxifolin into cyclodextrine for improving its bioavailability and bioactivity for food. Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System. Elsevier. 2020. 85–102. ISBN 9780128193631 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819363-1.00005-3>.

³ ГОСТ 13586.3-2015 Зерно. Правила приемки и методы отбора проб.

⁴ ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия.

⁵ ГОСТ 28672-2019 Ячмень. Технические условия.

⁶ ГОСТ 28673-2019 Овес. Технические условия.

⁷ ГОСТ 10840-2017 Зерно. Метод определения *натуры*.

На начальном этапе контролируемого проращивания удаляли все загрязнения и проводили процесс обеззараживания физическим методом воздействия с целью обеспечения безопасности получаемых сырьевых ингредиентов. Для опытных образцов на этапе замачивания осуществляли воздействие ультразвуком ($22 \pm 1,25$ кГц) 245 Вт/л в течение 5 мин. Для обработки применялся аппарат ультразвуковой технологической «Волна-М УЗТА-0,63/22-ОМ» (г. Бийск, Россия). Гидро модуль зерна с водой был определен 1:1. Условия обработки ультразвуковым воздействием варьировались, изучались ранее и представлены в работах [2].

После ультразвукового воздействия образцы зерна замачивали в воде при 22 ± 2 °С в течение 8 час. (зерно пшеницы) и 12 час. (зерно ячменя и овса), затем проводили процесс проращивания в камере с контролируемой температурой 22 ± 2 °С и влажностью воздуха $95 \pm 3\%$. Проросшее зерно удалялось из камеры по достижении величины роста 1,5–2 мм более чем у 90% зерен. Время проращивания — от 15 до 40 час. Использование ультразвукового воздействия позволило сократить процесс проращивания образцов в среднем на $25 \pm 3\%$.

С контрольными образцами проводили все операции в той же последовательности, исключая процесс ультразвукового воздействия. Время проращивания контрольных образцов — от 26 до 50 час.

В качестве исследуемых образцов после проведения процедуры контролируемого проращивания были определены следующие:

образец 1 — зерно пшеницы, полученное путем контролируемого проращивания без ультразвукового воздействия (контроль);

образец 2 — зерно ячменя, полученное путем контролируемого проращивания без ультразвукового воздействия (контроль);

образец 3 — зерно овса, полученное путем контролируемого проращивания без ультразвукового воздействия (контроль);

образец 1.1 — зерно пшеницы, полученное путем контролируемого проращивания с УЗВ на этапе замачивания;

образец 2.1 — зерно ячменя, полученное путем контролируемого проращивания с УЗВ на этапе замачивания;

образец 3.1 — зерно овса, полученное путем контролируемого проращивания с УЗВ на этапе замачивания.

Полученные образцы высушивали при температуре не более 50 °С в условиях принудительной конвекции до влажности не более 14%. Для проведения дальнейших исследований измельчали разовым помолком с использованием лабораторной мельницы ЛМТ-3М.

В проросшем зерне определяли *общую антиоксидантную активность* по поглощению радикалов в образцах с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) [5].

Определение *общего содержания флавоноидов* проводили с использованием процедуры [5]. В качестве стандарта использовали кверцетин ($0,01\text{--}0,5$ мг L-1, $R_2 = 0,997$), результаты выражали в мкг-1-эквивалентах кверцетина (мг QE/г). Абсорбцию образца экстрактов определяли с использованием спектрофотометра Jenway (6405 UV/Vis, Англия) при 515 нм и 415 нм соответственно.

Содержание полифенольных соединений определяли с использованием реактива Фолина-Чокальтеу при светопоглощении 700 нм. В качестве стандарта использовали галловую кислоту, результаты выражали в эквивалентах галловой кислоты (мг GAE/г) [19].

Таблица 1. Результаты определения входных параметров зерновых культур в исходном состоянии (до проведения процесса контролируемого проращивания)

Table 1. The results of determining the input parameters of grain crops in the initial state (before the process of controlled germination)

Наименование показателей	Фактическое значение показателей исследуемых образцов		
	зерно пшеницы	зерно ячменя	зерно овса
Состояние	в здоровом, негреющемся состоянии		
Цвет	свойственный здоровому состоянию данной зерновой культуры		
Запах	свойственный здоровому состоянию данной зерновой культуры		
Натура, г/л	702–722	540–564	511–532
Влажность, %	11,8–13,5	11,8–12,5	11,3–12,9
Массовая доля белка в пересчете на сухое вещество, %	11,6–12,1	10,2–10,6	6,2–6,4
Содержание флавоноидов, мг QE/г	$0,188 \pm 0,019$	$0,178 \pm 0,017$	$0,269 \pm 0,016$
Содержание полифенольных соединений, мг GAE/г	$0,218 \pm 0,016$	$0,241 \pm 0,018$	$0,267 \pm 0,015$
Общая антиоксидантная активность, %	$32,4 \pm 0,2$	$36,8 \pm 0,3$	$41,6 \pm 0,2$
Содержание ГАМК, мг 100/г	$1,66 \pm 0,07$	$1,45 \pm 0,04$	$1,82 \pm 0,06$

Определение содержания γ -аминомасляной кислоты (ГАМК) осуществляли хроматографически с использованием автоматизированной системы жидкостной хроматографии Shimadzu Prominence LC-20 (Япония) с колонкой с обращенной фазой Prodigy C 18 (5 мкм) с внутренним диаметром 4,6 × 250 мм [19].

Полученные данные были обработаны на основе методов математической статистики с использованием Microsoft Excel и MathCad, представлены с доверительным коэффициентом 0,95.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Качество пищевых ингредиентов из проросших зерновых культур во многом зависит от свойств исходного сырья. В связи со сложившейся тенденцией на рынке зерновых культур, заключающейся в присутствии значительной доли низкосортного сырья и активного развития технологии его переработки, в исследовании было использовано зерно, характеризующееся значительной вариабельностью исходных показателей (табл. 1).

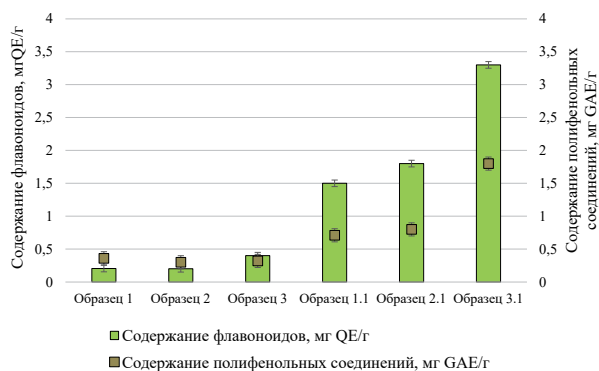
Органолептические показатели всех образцов зерновых культур соответствовали ГОСТ 9353-2016, ГОСТ 28672-2019 и ГОСТ 28673-2019. Имели свойственное здоровому зерну цвет и запах, а также необходимое состояние для проведения процесса контролируемого проращивания. Образец зерна пшеницы сорта Эритроспериум (согласно результатам определения массовой доли белка и натуры) соответствовал 4-му классу. Образцы зерна ячменя сорта Челябинец 1 и зерна овса сорта Универсал 1 — 2-му и 3-му классу соответственно.

Исследуемые образцы до проведения процесса проращивания имеют низкие значения содержания флавоноидов, полифенольных соединений и слабовыраженную антиоксидантную активность. Содержание ГАМК также находится на минимальном уровне, характерном для сырья растительного происхождения.

Процесс проращивания зерновых культур позволяет повысить их антиоксидантные свойства, причем использование ультразвукового воздействия в качестве интенсифицирующего фактора позволяет получить более выраженный эффект (рис. 1).

Рис. 1. Результаты определения содержания флавоноидов и полифенольных соединений зерновых культур (до и после процесса прорастивания)

Fig. 1. The results of determining the content of flavonoids and polyphenolic compounds of grain crops (before and after the germination process)



Использование ультразвукового воздействия позволяет для зерна пшеницы в 7,3 раза увеличить содержание флавоноидов и в 2 раза — полифенольных соединений. В большей степени синтез флавоноидов в процессе прорастивания происходит у образцов ячменя и овса и прирастает в 8,9 и 8,3 раза. Максимальное накопление полифенольных соединений отмечается для зерна овса (прирост составил 5,6 раза). Необходимо отметить, что фенольные соединения в зерновых культурах присутствуют в свободной, растворимой конъюгированной и связанной формах. При этом связанная и свободная формы представляют основную часть фенольных кислот [11]. Полученные сырьевые ингредиенты из цельного пророщенного зерна, выстраиваясь в матрицу продукта, могут в значительной степени повышать их антиоксидантные свойства (рис. 2).

В процессе проведения контролируемого прорастивания исследуемых образцов зерновых культур общая антиоксидантная активность повышается относительно исходных значений, прирост в среднем составил 5,9%, 9,45% и 7,7% для образцов зерна пшеницы, ячменя и овса соответственно. Применение ультразвукового воздействия на этапе замачивания позволяет увеличить значения данного показателя относительно контрольных пророщенных образцов в среднем на 31,6%, 37,4% и 40,0% соответственно.

В ходе прорастивания зерновых культур активизируются ферментативные процессы, нацеленные на высвобождение фитохимических веществ из зародыша, эндосперма и оболочечных частей, в том числе флавоноидов, определяющих антиоксидантную активность⁸. Результаты доказывают интенсифицирующее действие ультразвука в процессе прорастивания на количество флавоноидов, полифенолов и общую антиоксидантную активность. Использование ультразвукового воздействия позволяет получить эффекты, сходные с абиотическим стрессом растений. Данный факт был отмечен рядом исследователей как для зерновых культур [9, 20, 21], так и для листовой зелени [15]. Говоря о механизме данного воздействия, можно отметить, что, реагируя на стресс, растения запускают синтез вторичных метаболитов и активируют накопление веществ фенольной природы.

Еще одним важным веществом, накапливающимся при прорастивании зерновых культур, является ГАМК.

Рис. 2. Результаты определения общей антиоксидантной активности зерновых культур (до и после процесса прорастивания)

Fig. 2. The results of determining the total antioxidant activity of grain crops (before and after the germination process)

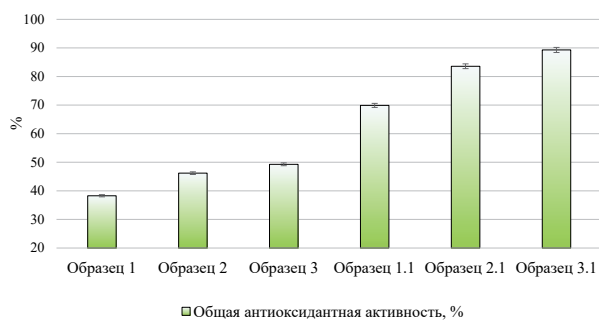
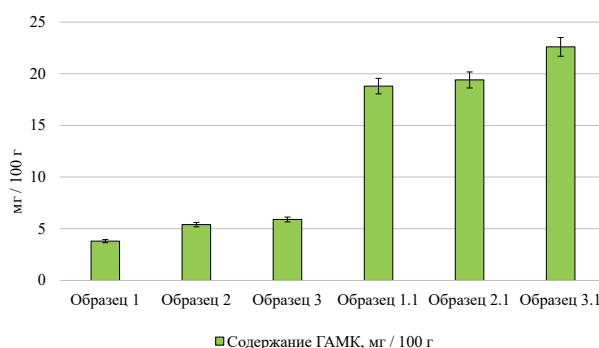


Рис. 3. Результаты определения содержания γ -аминомасляной кислоты зерновых культур (до и после процесса прорастивания)

Fig. 3. The results of determining the content of γ -aminobutyric acid in grain crops (before and after the germination process)



Ряд авторов [6, 15] отмечают, что особенно выражен данный эффект при активации процесса с использованием ультразвукового воздействия [20].

Результаты определения содержания γ -аминомасляной кислоты зерновых культур до и после процесса прорастивания представлены на рисунке 3.

Полученные результаты позволяют говорить о выраженном влиянии ультразвукового воздействия на синтез и накопление ГАМК в процессе контролируемого прорастивания. Так, прирост относительно контрольных пророщенных образцов составил в среднем 490% (для зерна пшеницы), 360% (для зерна ячменя) и 385% (для зерна овса).

В своих исследованиях, представленных в открытой печати, ряд авторов [6, 13, 15] описывают два возможных механизма повышенного накопления ГАМК. В первом случае зерно испытывает стресс, вследствие которого происходит метаболические нарушения с последующим цитозольным подкислением, затем активируется синтез глутаматдекарбоксилазы и ГАМК. Во втором случае в результате ультразвукового воздействия значительно возрастает клеточный уровень цитозольного кальция $[Ca^{2+}]_{цит}$, который стимулирует активность кальмодулинзависимой глутаматдекарбоксилазы, что приводит к накоплению ГАМК [6, 21]. Отмечается, что накопление фенольных соединений в растительном сырье является типичной реакцией на стресс окружающей среды [13]. Такие флавоноиды, как трицетин и трицин, часто встречаются в зерне пшеницы, ячменя и других культур, при этом они играют основную роль в защите растений [22].

⁸ Вигмор Э. Проростки — пища жизни Санкт-Петербург: Весь. 2001; 208. — ISBN 5-266-00131-3

Выводы/Conclusion

Полученные результаты позволяют сказать, что используемая технология контролируемого прорастивания с ультразвуковой интенсификацией процесса в переработке низкоклассового зернового сырья является эффективной. Использование данного подхода позволит создать сырьевые ингредиенты с повышенными антиоксидантными и содержанием ГАМК. Так, применение ультразвука позволило увеличить содержание флавоноидов в среднем на 7,3–8,9 раза, полифенолов — на 2–5,6 раза. Общая антиоксидантная активность увеличивается на 31,6–40,0% относительно контрольных пророщенных

образцов зерновых культур. Прирост содержания ГАМК в образцах после ультразвукового воздействия составил в среднем 360–490%, что, несомненно, подтверждает эффективность используемой технологии.

Процесс прорастивания — это сложная многоаспектная система взаимодействия биологических объектов и физических способов воздействия на них, требующая четкого отслеживания процесса для достижения заданного результата, что в итоге позволяет получить сырьевые ингредиенты с повышенными антиоксидантными свойствами, что, несомненно, требует проведения дальнейших исследований.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу.

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work.

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.

The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

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

FUNDING:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехина Н.Н. Изменения теплофизических характеристик теста из биоактивированного зерна пшеницы в процессе замораживания. *Хлебопродукты*. 2015; (10): 44–45. <https://elibrary.ru/uktjiz>
2. Науменко Н.В., Потороко И.Ю., Велямов М.Т. Цельнозерновая мука из пророщенного зерна пшеницы как пищевой ингредиент в технологии продуктов питания. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2019; 7(3): 23–30. <https://doi.org/10.14529/food190303>
3. Нилова Л.П. Влияние технологических факторов на качество и антиоксидантную активность обогащенных хлебобулочных изделий. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2016; 4(1): 55–63. <https://doi.org/10.14529/food160107>
4. Нилова Л.П., Пилипенко Т.В., Потороко И.Ю. Токоферолы и токотриенолы: свойства, функции, природные источники. Аналитический обзор. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2021; 9(1): 68–81. <https://doi.org/10.14529/food210108>
5. Потороко И.Ю., Паймулина А.В., Ускова Д.Г., Калинина И.В., Попова Н.В., Ширш С. Антиоксидантные свойства функциональных пищевых ингредиентов, используемых при производстве хлебобулочных и молочных продуктов, их влияние на качество и сохраняемость продукции. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2017; 79(4): 143–151. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-4-143-151>
6. Abdel Razik E.S., Alharbi B.M., Pirzadah T.B., Alnusairi G.S.H., Soliman M.H., Hakeem K.R. γ -Aminobutyric acid (GABA) mitigates drought and heat stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by regulating its physiological, biochemical and molecular pathways. *Physiologia Plantarum*. 2021; 172(2): 505–527. <https://doi.org/10.1111/ppl.13216>
7. Ashokkumar M., Lee J., Kentish S., Grieser F. Bubbles in an acoustic field: an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2007; 14(4): 470–475. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2006.09.016>
8. Ashrafuzzaman M., Ismail M.R., Fazal K.M.A.I., Uddin M.K., Prodhon A.K.M.A. Effect of GABA application on the growth and yield of bitter melon (*Momordica charantia*). *International Journal of Agriculture and Biology*. 2010; 12(1): 129–132.
9. Ding J., Hou G.G., Nemzer B.V., Xiong S., Dubat A., Feng H. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by Ultrasonication. *Food Chemistry*. 2018; 243: 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.128>
10. Ding J. et al. Enhancing Contents of γ -Aminobutyric Acid (GABA) and Other Micronutrients in Dehulled Rice during Germination under Normoxic and Hypoxic Conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016; 64(5): 1094–1102. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04859>
11. Dzik D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds. *Trends in Food Science & Technology*. 2014; 40(1): 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.07.010>
12. 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; 86: 106044. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2022.106044>
13. 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; (12): 6619–6630. <https://doi.org/10.1039/D2RA00523A>
14. Hung P.V., Hatcher D.W., Barker W. Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. *Food Chemistry*. 2011; 126(4): 1896–1901. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.015>
15. Baranzelli Julia et al. Changes in enzymatic activity, technological quality and gamma-aminobutyric acid (GABA) content of wheat flour as affected by germination. *LWT*. 2018; 90: 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.070>
16. Komyshev E., Genaev M., Afonnikov D. Evaluation of the SeedCounter, A Mobile Application for Grain Phenotyping. *Frontiers in Plant Science*. 2016; (7): 1990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01990>

REFERENCES

1. Alekhina N.N. Changes in the thermophysical characteristics of dough from bioactivated wheat grain during freezing. *Khleboproducty*. 2015; (10): 44–45 (In Russian). <https://elibrary.ru/uktjiz>
2. Naumenko N.V., Potoroko I.Yu., Velyamov M.T. Sprouted whole wheat grain as a food constituent in food technology. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnologies*. 2019; 7(3): 23–30 (In Russian). <https://doi.org/10.14529/food190303>
3. Nilova L.P. Influence of technological factors on the quality and antioxidant activity of enriched bakery products. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnologies*. 2016; 4(1): 55–63 (In Russian). <https://doi.org/10.14529/food160107>
4. Nilova L.P., Pilipenko T.V., Potoroko I.Yu. Tocopherols and tokotrienols: properties, functions, natural sources. Analytical review. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnologies*. 2021; 9(1): 68–81 (In Russian). <https://doi.org/10.14529/food210108>
5. Potoroko I.Yu., Paimulina A.V., Uskova D.G., Kalinina I.V., Popova N.V., Shirish S. The antioxidant properties of functional food ingredients used in the production of bakery and dairy products, their impact on quality and storageability of the product. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2017; 79(4): 143–151 (In Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-4-143-151>
6. Abdel Razik E.S., Alharbi B.M., Pirzadah T.B., Alnusairi G.S.H., Soliman M.H., Hakeem K.R. γ -Aminobutyric acid (GABA) mitigates drought and heat stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by regulating its physiological, biochemical and molecular pathways. *Physiologia Plantarum*. 2021; 172(2): 505–527. <https://doi.org/10.1111/ppl.13216>
7. Ashokkumar M., Lee J., Kentish S., Grieser F. Bubbles in an acoustic field: an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2007; 14(4): 470–475. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2006.09.016>
8. Ashrafuzzaman M., Ismail M.R., Fazal K.M.A.I., Uddin M.K., Prodhon A.K.M.A. Effect of GABA application on the growth and yield of bitter melon (*Momordica charantia*). *International Journal of Agriculture and Biology*. 2010; 12(1): 129–132.
9. Ding J., Hou G.G., Nemzer B.V., Xiong S., Dubat A., Feng H. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by Ultrasonication. *Food Chemistry*. 2018; 243: 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.128>
10. Ding J. et al. Enhancing Contents of γ -Aminobutyric Acid (GABA) and Other Micronutrients in Dehulled Rice during Germination under Normoxic and Hypoxic Conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016; 64(5): 1094–1102. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04859>
11. Dzik D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds. *Trends in Food Science & Technology*. 2014; 40(1): 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.07.010>
12. 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; 86: 106044. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2022.106044>
13. 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; (12): 6619–6630. <https://doi.org/10.1039/D2RA00523A>
14. Hung P.V., Hatcher D.W., Barker W. Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. *Food Chemistry*. 2011; 126(4): 1896–1901. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.015>
15. Baranzelli Julia et al. Changes in enzymatic activity, technological quality and gamma-aminobutyric acid (GABA) content of wheat flour as affected by germination. *LWT*. 2018; 90: 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.070>
16. Komyshev E., Genaev M., Afonnikov D. Evaluation of the SeedCounter, A Mobile Application for Grain Phenotyping. *Frontiers in Plant Science*. 2016; (7): 1990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01990>

17. Krasulya O. *et al.* Impact of acoustic cavitation on food emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; 30: 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.013>
18. Miano A.C., Pereira J.d.C., Castanha N., da Matta Júnior M.D., Augusto P.E.D. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*. 2016; (6): 38996. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
19. Naumenko N., Potoroko I., Kalinina I. 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*. 2022; 86: 106000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106000>
20. Nelson K., Stojanovska L., Vasiljevic T., Mathai M. Germinated grains: a superior whole grain functional food? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 2013; 91(6): 429–441. <https://doi.org/10.1139/cjpp-2012-0351>
21. Ragaee S., Guzar I., Dhull N., Seetharaman K. Effects of fiber addition on antioxidant capacity and nutritional quality of wheat bread. *LWT – Food Science and Technology*. 2011; 44(10): 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.016>
22. Seifkhalhor M., Aliniaieifard S., Hassani B., Niknam V., Lastochkina O. Diverse role of γ -aminobutyric acid in dynamic plant cell responses. *Plant Cell Reports*. 2019; 38: 847–867. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02396-z>
23. Singh H., Singh N., Kaur L., Saxena S.K. Effect of sprouting conditions on functional and dynamic rheological properties of wheat. *Journal of Food Engineering*. 2001; 47(1): 23–29. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00094-7)
24. Tian B. *et al.* Physicochemical changes of oat seeds during germination. *Food Chemistry*. 2010; 119(3): 1195–1200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.035>
25. Wu Q.Y. *et al.* Accumulating pathways of γ -aminobutyric acid during anaerobic and aerobic sequential incubations in fresh tea leaves. *Food Chemistry*. 2018; 240: 1081–1086. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.004>
26. Yang H., Gao J., Yang A., Chen H. The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts. *Food Research International*. 2015; 77(4): 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.011>
17. Krasulya O. *et al.* Impact of acoustic cavitation on food emulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; 30: 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.013>
18. Miano A.C., Pereira J.d.C., Castanha N., da Matta Júnior M.D., Augusto P.E.D. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Scientific Reports*. 2016; (6): 38996. <https://doi.org/10.1038/srep38996>
19. Naumenko N., Potoroko I., Kalinina I. 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*. 2022; 86: 106000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106000>
20. Nelson K., Stojanovska L., Vasiljevic T., Mathai M. Germinated grains: a superior whole grain functional food? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 2013; 91(6): 429–441. <https://doi.org/10.1139/cjpp-2012-0351>
21. Ragaee S., Guzar I., Dhull N., Seetharaman K. Effects of fiber addition on antioxidant capacity and nutritional quality of wheat bread. *LWT – Food Science and Technology*. 2011; 44(10): 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.016>
22. Seifkhalhor M., Aliniaieifard S., Hassani B., Niknam V., Lastochkina O. Diverse role of γ -aminobutyric acid in dynamic plant cell responses. *Plant Cell Reports*. 2019; 38: 847–867. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02396-z>
23. Singh H., Singh N., Kaur L., Saxena S.K. Effect of sprouting conditions on functional and dynamic rheological properties of wheat. *Journal of Food Engineering*. 2001; 47(1): 23–29. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00094-7)
24. Tian B. *et al.* Physicochemical changes of oat seeds during germination. *Food Chemistry*. 2010; 119(3): 1195–1200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.035>
25. Wu Q.Y. *et al.* Accumulating pathways of γ -aminobutyric acid during anaerobic and aerobic sequential incubations in fresh tea leaves. *Food Chemistry*. 2018; 240: 1081–1086. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.004>
26. Yang H., Gao J., Yang A., Chen H. The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts. *Food Research International*. 2015; 77(4): 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.011>

ОБ АВТОРАХ:

Наталья Владимировна Науменко, доктор технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, доцент, Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия naumenkonv@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-9520-3251>

Ринат Ильгидарович Фаткуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия fatkullinri@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-1498-0703>

Ирина Валерьевна Калинина, доктор технических наук, профессор кафедры пищевых и биотехнологий, доцент, Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия kalininaiv@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6246-9870>

Екатерина Евгеньевна Науменко, студент, Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия 9193122375@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0213-1595>

Ева Иванисова, PhD, доцент Института пищевых наук, Словацкий сельскохозяйственный университет, 2 Триеда Андрея Глинки, Нитра, 94976, Словакия eva.ivanisova@uniag.sk <https://orcid.org/0000-0001-5193-2957>

Елизавета Константиновна Васильева, студент, Российский университет транспорта, Огородный проезд, 25/20, Москва, 127322, Россия VasilevaE.04@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-9559-8137>

Анастасия Владимировна Радкевич, аспирант, Университет ИТМО, Кронверкский пр-т, 49, лит. А. Санкт-Петербург, 197101, Россия Nastya.rh.98@gmail.ru <https://orcid.org/0009-0001-0519-759X>

ABOUT THE AUTHORS:

Natalya Vladimirovna Naumenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, Associate Professor, South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia naumenkonv@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-9520-3251>

Rinat Ilgidarovich Fatkullin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia fatkullinri@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-1498-0703>

Irina Valerievna Kalinina, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food and Biotechnology, Associate Professor, South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia kalininaiv@susu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6246-9870>

Ekaterina Evgenievna Naumenko, Student, South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia 9193122375@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0213-1595>

Eva Ivanišová, PhD, Associate Professor Institute of Food Sciences, Slovak University of Agriculture, 2 Trieďa Andreja Hlinku, Nitra, 94976, Slovakia eva.ivanisova@uniag.sk <https://orcid.org/0000-0001-5193-2957>

Elizaveta Konstantinovna Vasileva, Student, Russian University of Transport, 25/20 Ogorodny proezd, Moscow, 127322, Russia VasilevaE.04@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-9559-8137>

Anastasia Vladimirovna Radkevich, Graduate Student, ITMO University, 49 lit. A, Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia Nastya.rh.98@gmail.ru <https://orcid.org/0009-0001-0519-759X>