

# Влияние термической, микроволновой и барогидротермической обработки на содержание алкалоидов в зерне люпина

<sup>1</sup> ООО «Протеин Плюс»,  
г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> ВНИИ люпина – филиал  
ФГБНУ ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»,  
пос. Мичуринский, Брянская область,  
Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «Гамма-Маркет»,  
г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

<sup>4</sup> ООО «Центр-соя», Станица  
Тбилисская, Краснодарский край,  
Российская Федерация

В. Н. Красильников<sup>1</sup>, В.С. Мехтиев<sup>1</sup>, Е.В. Афонина<sup>2</sup>, Е.С. Тимошенко<sup>2</sup>,  
М.Е. Торопова<sup>3</sup>, Т.И. Родионова<sup>4</sup>

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

**Вадим Сейдуллаевич Мехтиев**  
E-mail: VadimMekhtiev@lecithin.ru

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Красильников, В.Н., Мехтиев, В.С., Афонина, Е.В., Тимошенко, Е.С., Торопова, М.Е., & Родионова, Т.И. (2025). Изменение содержания алкалоидов в зерне люпина при различных способах обработки: термическая, микроволновая, барогидротермическая обработка зерен люпина. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(3), 107-133. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.646>

**ПОСТУПИЛА:** 10.06.2025

**ПРИНЯТА:** 15.09.2025

**ОПУБЛИКОВАНА:** 30.09.2025

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Люпин рассматривается как перспективная высокобелковая культура, сопоставимая с соей по аминокислотному составу и не содержащая ингибиторов протеаз, что делает его потенциально ценным сырьем для пищевой промышленности. Однако его широкое применение сдерживается высоким содержанием хинолизидиновых алкалоидов, формирующих горький вкус и обуславливающих токсикологические ограничения. Традиционные методы снижения алкалоидов, основанные преимущественно на жидкостной экстракции, характеризуются значительными потерями питательных веществ и ограниченной технологической масштабируемостью. В связи с этим актуальной задачей является разработка альтернативных способов снижения содержания алкалоидов в зерне люпина без использования жидкостной экстракции.

**Цель:** Дать сравнительную оценку эффективности трех технологических подходов: термической, микроволновой и барогидротермической обработки (БГТО) для снижения содержания алкалоидов в зерне люпина при сохранении органолептических характеристик.

**Материалы и методы:** В исследовании использованы семена люпина узколистного (*Lupinus angustifolius L.*, сорта Белозерный 110 и Радужный) и белого (*Lupinus albus L.*, сорт Дега). Термическая обработка проводилась при 120–180 °С в течение 10–20 мин, микроволновая – при 2450 МГц в течение 5–25 мин, БГТО включала предварительный нагрев при 90–100 °С с последующей экспозицией паром под давлением 10 атм до 28 с. Содержание алкалоидов определялось фотоколориметрическим методом по модификации ВНИИ люпина. Эксперименты выполнялись в трехкратной повторности, статистическая обработка включала расчет средних значений и стандартных отклонений.

**Результаты:** Все методы продемонстрировали значительное снижение алкалоидов, однако эффективность и органолептическая приемлемость зависели от сорта и условий обработки. Максимальное снижение достигло 69,5 % при БГТО, при микроволновой обработке составило 66 %, а при термическом нагреве – 64,5 %. При этом обработка выше 150 °С (термическая) и свыше 20 мин (микроволновая) приводила к деградации органолептических свойств. Для БГТО оптимальное время составило 28 с; превышение этого значения также сопровождалось потемнением и появлением постороннего привкуса.

**Заключение:** Сравнительный анализ подтвердил эффективность трех методов снижения алкалоидов, при этом БГТО продемонстрировала наибольший потенциал для практического внедрения благодаря балансу между снижением токсичных соединений и сохранением качества продукта. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий переработки люпина для производства продуктов питания с высоким содержанием растительного белка.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

люпин; хинолизидиновые алкалоиды; термическая обработка зерна; микроволновая обработка зерна; барогидротермическая обработка зерна

<sup>1</sup> PROTEIN PLUS Co. LTd, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> The All-Russian Research Institute of Lupin – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Bryansk Region, Russian Federation

<sup>3</sup> Gamma Market LLC, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>4</sup> ATLANT AGRO LLC, Krasnodar region, Russian Federation

# Effect of Thermal, Microwave, and Baro-Hydrothermal Treatment on Alkaloid Content in Lupin Grain

Valery N. Krasilnikov<sup>1</sup>, Vadim S. Mekhtiev<sup>1</sup>, Elena V. Afonina<sup>2</sup>, Elena S. Timoshenko<sup>2</sup>, Mariya E. Toropova<sup>3</sup>, Tatyana I. Rodionova<sup>4</sup>

## CORRESPONDENCE:

Vadim S. Mekhtiev

E-mail: VadimMekhtiev@lecithin.ru

## FOR CITATIONS:

Krasilnikov, V.N., Mekhtiev, V.S., Afonina, E.V., Timoshenko, E.S., Toropova, M.E., & Rodionova, T.I. (2025). Effect of thermal, microwave, and baro-hydrothermal treatment on alkaloid content in lupin grain. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(3), 107-133. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.646>

RECEIVED: 10.06.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

## DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



## ABSTRACT

**Background:** Lupin is considered a promising high-protein crop, comparable to soybean in its amino acid composition and free from protease inhibitors, which makes it a potentially valuable raw material for the food industry. However, its widespread application is limited by the high content of quinolizidine alkaloids, which impart a bitter taste and pose toxicological concerns. Conventional alkaloid-reduction methods, predominantly based on liquid extraction, are associated with significant nutrient losses and limited technological scalability. Therefore, the development of alternative approaches for reducing alkaloid content in lupin grain without the use of liquid extraction represents a relevant and timely research objective, which determined the focus of the present study.

**Purpose:** To provide a comparative assessment of the efficiency of three technological approaches (thermal treatment, microwave treatment, and baro-hydrothermal treatment) for reducing alkaloid content in lupin grain while preserving its sensory properties.

**Materials and Methods:** The study used seeds of narrow-leaved lupin (*Lupinus angustifolius* L., cultivars 'Belozerny 110' and 'Raduzhny') and white lupin (*Lupinus albus* L., cultivar 'Dega'). Thermal treatment was carried out at 120–180 °C for 10–20 min, microwave treatment at 2450 MHz for 5–25 min, and BHT included preliminary heating at 90–100 °C followed by exposure to steam at 10 atm for up to 28 s. Alkaloid content was determined by a photocolometric method (VNII Lupin modification). All experiments were performed in triplicate; statistical processing included calculation of mean values and standard deviations.

**Results:** All methods provided a substantial reduction in alkaloid content, although efficiency and sensory acceptability depended on cultivar and processing conditions. The maximum reduction reached 69.5 % under BHT, 66 % under microwave treatment, and 64.5 % under thermal treatment. Thermal processing above 150 °C and microwave exposure longer than 20 min led to deterioration of sensory properties. For BHT, the optimal treatment time was 28 s; longer exposure also resulted in kernel darkening and the appearance of off-flavours.

**Conclusion:** The comparative analysis confirmed the effectiveness of all three methods for reducing alkaloid content, with BHT showing the greatest potential for practical implementation due to a favourable balance between the reduction of toxic compounds and the preservation of product quality. The findings can be used in the development of lupin processing technologies for the production of high-protein plant-based foods.

## KEYWORDS

lupine; quinolizidine alkaloids; thermal; microwave treatment of lupine grain; barohydrothermal treatment of lupine grain

## ВВЕДЕНИЕ

Люпин рассматривается как перспективная некрахмалистая зернобобовая культура с высоким содержанием сырого протеина и пищевых волокон, пригодная для включения в состав продуктов питания и комбикормов. Аминокислотный состав белков зерна люпина характеризуется высоким уровнем незаменимых аминокислот; по данным сравнительных оценок, их количественное содержание в люпине находится на уровне или выше рекомендуемого ФАО/ВОЗ, что позволяет рассматривать люпиновый белок как практически полноценный источник растительного белка (Николаев и соавт., 2024). При этом по содержанию лимитирующих аминокислот люпин сопоставим с традиционными высокобелковыми культурами, что делает его привлекательным компонентом в технологиях здорового питания и альтернативных белковых продуктов.

Сравнение с соей подчеркивает дополнительное технологическое преимущество люпина. Соя и продукты её переработки перед использованием в пищевых или кормовых целях требуют обязательной тепловой обработки для инактивации ингибиторов трипсина и других антипитательных факторов. В отличие от этих продуктов, люпин практически не содержит ингибиторов протеаз, что теоретически позволяет использовать его зерно без предварительной высокотемпературной обработки и упрощает технологические схемы переработки (Доморощенкова и соавт., 2009). Однако реализация этого потенциала напрямую ограничивается содержанием хинолизидиновых алкалоидов, которые придают горечь и обуславливают токсичность, что влияет на допустимость использования зерна люпина в пищевых продуктах.

В качестве источника пищевого белка допустимо использовать только зерно люпина с низким содержанием алкалоидов. Согласно действующим регламентам, в России для «пищевого люпина» установлено предельное содержание алкалоидов не более 0,04 % к массе семян, тогда как в ряде зарубежных стандартов порог ещё более жесткий — не более 0,02 % (Купцов & Такунов, 2006; Красильников и соавт., 2015; Красильников и соавт., 2016; Frick et al., 2017). Имеются сообщения о создании отечественных сортов с очень низким содержанием алкалоидов, приближающимся к этим требованиям, однако объемы их возделывания пока невелики и не обе-

спечивают устойчивое сырьё для пищевой промышленности (Хрулёв и соавт., 2015; Красильников и соавт., 2015).

В области пищевого и кормового использования люпина существует значительное число разработок, а международная литература содержит обширные данные о технологиях снижения содержания антипитательных веществ (Зверев, 2020; Aguilar-Acosta et al., 2020; Samtiya et al., 2020; Потаракина, 2022; Estivi et al., 2023; Rababah et al., 2023). Однако в российских условиях высокая исходная концентрация хинолизидиновых алкалоидов в большинстве промышленно возделываемых сортов остается ключевым ограничивающим фактором. Удаление алкалоидов может осуществляться как селекционными методами (отбор генотипов с низким содержанием хинолизидиновых алкалоидов), так и за счет применения различных технологических подходов, основанных на термическом, микроволновом, жидкостном, биологическом или комбинированном воздействии на зерно люпина (Доморощенкова и соавт., 2009; Ващекин, 2009; Афолина & Костюченко, 2015; Зверев & Размочаев, 2023; Руцкая & Тимошенко, 2023).

Наиболее изученные на сегодня жидкостные и биологические методы позволяют существенно снижать концентрацию алкалоидов, вплоть до получения безалкалоидного сырья, однако они связаны с рядом серьезных технологических ограничений. К их числу относятся необходимость работы с большими объемами экстрагирующих растворов, сложность утилизации отработанной жидкости, потери пищевых веществ, переходящих в жидкую фазу, а также значительная продолжительность многостадийных процессов, что негативно сказывается на общей производительности и экономике производства (Доморощенкова и соавт., 2009; Ващекин, 2009; Зверев & Размочаев, 2023). Высокая капиталоемкость современного оборудования для глубокой жидкостной переработки люпина дополнительно ограничивает его применение, особенно для малых и средних предприятий (Frick et al., 2017; Красильников и соавт., 2015). В результате конкурентоспособность люпина как высокобелкового растительного сырья в форме муки, крупы и концентратов в значительной степени определяется доступностью более простых, энерго- и ресурсосберегающих способов снижения содержания алкалоидов.

В этих условиях особый интерес представляют «сухие» или маловодные методы обработки, которые могут быть реализованы на уже существующем оборудовании и обеспечивают достаточное снижение содержания хинолизидиновых алкалоидов при сохранении потребительских свойств продукта. К таким подходам относятся высокотемпературная (конвективная) обработка, микроволновая обработка и барогидротермическая обработка, позволяющие варьировать температурно-временные параметры и давление без введения жидкой фазы (Зверев, 2020; Aguilar-Acosta et al., 2020; Samtiya et al., 2020). С учетом изложенного цель настоящей работы заключается в сравнительной оценке эффективности термической, микроволновой и барогидротермической обработки зерна люпина различных видов и сортов по снижению содержания хинолизидиновых алкалоидов при сохранении органолептических и потребительских характеристик продукта.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### Алкалоиды люпина как ключевой объект технологического воздействия

Алкалоиды представляют собой группу азотсодержащих органических соединений основного (щелочного) характера, преимущественно гетероциклического строения. В растениях они, как правило, находятся в виде солей органических и минеральных кислот и присутствуют в форме сложных смесей нескольких индивидуальных соединений (Frick et al., 2017). Классическим примером алкалоида растительного происхождения является кофеин, содержащийся в чайных листьях и кофейных зернах и оказывающий выраженное стимулирующее воздействие на центральную нервную систему, что проявляется в усилении бодрствования и повышении концентрации внимания.

В растениях люпина алкалоиды играют важную физиологическую роль, обеспечивая устойчивость к абиотическим стрессам (засуха, низкие температуры), снижая повреждаемость вредителями и ограничивая развитие отдельных грибковых и вирусных заболеваний, тем самым улучшая фитосанитарное состояние посевов и почвы (Романчук & Анохина, 2018; Руцкая & Тимошенко, 2023). Алкалоиды люпина относятся к группе произво-

дных хинолизидина; для большинства из них характерен общий каркас с формулой  $C_{15}H_xNO_2$ , где «х» может принимать значения 20, 22, 24 или 26. Наиболее распространенными хинолизидиновыми алкалоидами у различных видов люпина являются люпинин, люпанин, спартеин, 13-гидроксилюпанин и ангустифолин; в целом описано более 150 хинолизидиновых алкалоидов, значительная часть которых видоспецифична (Романчук & Анохина, 2018; Mancinotti, Frick & Geu-Flores, 2022). При этом абсолютно безалкалоидных генотипов люпина к настоящему времени не выявлено (Руцкая & Тимошенко, 2023).

Различия между видами и сортами люпина касаются не только суммарного содержания алкалоидов, но и их фракционного состава. Наиболее широко в России возделываются три вида люпина: узколистный (*L. angustifolius*), желтый (*L. luteus*) и белый (*L. albus*). Для семян узколистного люпина основными алкалоидами являются люпанин (50–80% от суммы алкалоидов), 13-гидроксилюпанин (10–20%) и ангустифолин (5–20%); в семенах желтого люпина доминируют люпинин (40–70%) и спартеин (30–50%); в семенах белого люпина преобладают люпанин (50–80%), мультифлорин (3–10%) и 13-гидроксилюпанин (5–15%), при этом в незначительных количествах присутствует до 30 сопутствующих алкалоидов (Pereira et al., 2022; Руцкая & Тимошенко, 2023). По мере возрастания токсичности индивидуальные алкалоиды обычно располагают таким образом: люпанин, люпинин, спартеин, гидроксилюпанин (Pereira et al., 2022; Руцкая & Тимошенко, 2023).

С точки зрения питания человека хинолизидиновые алкалоиды выполняют двойственную функцию. С одной стороны, в малых дозах они могут рассматриваться как физиологически активные компоненты, обладающие определенным функциональным потенциалом. С другой стороны, повышенное поступление алкалоидов с пищей сопровождается горечью и ухудшением органолептических показателей продуктов, а также риском отрицательного воздействия на нервную и сердечно-сосудистую системы, поскольку алкалоиды относятся к сильнодействующим соединениям с нейро- и кардиотоксическими эффектами (Ruiz-López, 2019; Domuta et al., 2022). Поэтому возможность использования люпина в пищевых технологиях прямо определяется уровнем и профилем его алкалоидности.

Содержанием алкалоидов во многом обусловлено целевое назначение сортов люпина. По этому признаку люпин делят на пять групп, из которых для пищевых целей пригодны лишь генотипы с очень низкой алкалоидностью (первая группа) (Купцов & Такунов, 2006). В качестве источника пищевого белка в России допускается использование зерна люпина с содержанием алкалоидов не более 0,04% к массе семян<sup>1</sup> (Купцов & Такунов, 2006; Красильников и др., 2015). В зарубежной практике требования ещё более жесткие: в нормативных документах Австралии и Новой Зеландии фигурирует порог не более 0,02% к массе семян (Красильников и др., 2016; Frick et al., 2017), а для отдельных рынков указывается верхний предел 0,035% (Arnoldi & Greco, 2011). В ряде источников подчеркивается, что к пищевым относятся сорта с содержанием алкалоидов ниже 0,05%, однако даже этот уровень достигается ограниченным числом отечественных сортов (Хрулев и др., 2015).

Сопоставление отечественной сырьевой базы с международными требованиями показывает дефицит промышленно возделываемых сортов люпина, полностью соответствующих зарубежным нормативам по алкалоидности (Frick et al., 2017; Купцов & Такунов, 2006; Красильников и др., 2015). При этом на глобальном уровне люпин рассматривается как значимый источник растительного белка: по данным Nabtemariam et al. (2019), около 60% мирового производства люпина приходится на Австралию, где выращиваются пищевые сорта с контролируемо низким содержанием алкалоидов, что подтверждается также статистикой правительства Западной Австралии<sup>2</sup>. На этом фоне для России проблема адаптации люпина к пищевому использованию приобретает не только технологическое, но и стратегическое значение.

Таким образом, в условиях ограниченной доступности безалкалоидных и низкоалкалоидных сортов люпина обеспечение безопасности и приемлемых органолептических характеристик продуктов на его основе требует либо длительной селекционной работы, либо разработки эффективных технологий снижения содержания хинолизидиновых алкалоидов в уже существующем сорimente (Купцов & Такунов, 2006; Руцкая & Тимошенко, 2023).

## Критика и классификация существующих методов снижения алкалоидов

Удаление хинолизидиновых алкалоидов из зерна люпина может осуществляться как путем отбора и возделывания генотипов с низкой алкалоидностью, так и с помощью различных технологических методов, основанных на физических, химических и биологических воздействиях (Зверев, 2020; Aguilar-Acosta et al., 2020; Samtiya et al., 2020; Потакина, 2022; Estivi et al., 2023; Rababah et al., 2023; Руцкая & Тимошенко, 2023). В обзорах подчеркивается, что, несмотря на широкий спектр подходов, значительная часть предложенных схем отличается высокой ресурсозатратностью и сложностью масштабирования, что ограничивает их использование в промышленной практике (Aguilar-Acosta et al., 2020; Domuta et al., 2022).

С точки зрения температурного фактора известно, что хинолизидиновые алкалоиды устойчивы при нагревании до 50 °С (Pereira et al., 2022). При более высоких температурах они частично разрушаются: в работах Ващекина (2009) показано, что повышение температуры обработки до 150 °С при экспозиции 10 мин обеспечивает снижение содержания алкалоидов примерно на 29,5%, а дальнейшее увеличение времени обработки до 30 и 60 мин приводит к уменьшению алкалоидов на 30,3 и 34,0% соответственно. Однако в этих исследованиях отсутствует детализация режимов (тип оборудования, характер теплообмена, вид и сорт люпина, исходная и конечная алкалоидность, органолептическая оценка), что затрудняет их прямое использование для проектирования пищевых технологий.

Альтернативный подход к термической обработке описан в работе Кадырова и соавт. (2001), где использовали сушилку барабанного типа с последующим гранулированием. Термообработка при 130–150 °С в сочетании с гранулированием позволила снизить содержание алкалоидов в зерне люпина на 32–41% (Кадыров и соавт., 2001). Эти результаты подтверждают принципиальную возможность термической детоксикации, но также не содержат подробной характеристики исходного сырья и органолептических изменений продукта.

<sup>1</sup> ТУ 01.11.49-005-22531666-2021. Люпин пищевой. Технические условия.

<sup>2</sup> Интернет-сайт правительства Западной Австралии: <https://www.dpird.wa.gov.au/businesses/plant-and-crop-farming/grains/lupins/>

Для пищевого применения в зарубежных источниках подчеркивается, что исходное зерно люпина должно иметь содержание алкалоидов не более 0,02 % (для Австралии — не более 0,035 %), а для достижения этих значений чаще всего используют комбинацию замачивания, термообработки и/или длительной выдержки в воде (Arnoldi & Greco, 2011; Habtemariam et al., 2019). В частности, Adiss et al. (2025) показали, что сочетание обжаривания при 150 °С и шестидневного вымачивания обеспечивает наименьшее содержание белка и алкалоидов в люпиновой муке, что указывает на значительные потери пищевых веществ при экстремально длительных жидкостных режимах.

Высокоэффективным по снижению алкалоидов методом зарекомендовала себя обработка в поле микроволнового излучения. По данным Панкиной и Борисовой (2015), при последовательной замочке зерна люпина, последующем нагреве в бытовой СВЧ-печи до 150 мин и периодическом контроле алкалоидности снижение содержания алкалоидов достигало 60,5–66 % по отношению к исходному уровню. Однако авторы не приводят характеристик конкретного устройства и частоты микроволновой обработки, что ограничивает возможность репликации и сопоставления с промышленными установками (Панкина & Борисова, 2015).

Инфракрасная обработка (микронизация) традиционно рассматривается как способ не только детоксикации, но и модификации белкового и углеводного комплекса зерна люпина. Головченко и соавт. разработали способ получения полуфабриката из белого низкоалкалоидного люпина, включающий обработку инфракрасным излучением при температуре 400–500 °С в течение 35–40 с с последующим освобождением ядра от оболочки и размолотом; при этом температура зерна на выходе не превышала 150 °С, а высокомолекулярные белки частично расщеплялись до более растворимых фракций (Головченко и соавт., 1996). В указанной работе, однако, не приводятся данные о содержании алкалоидов до и после микронизации. Более поздние эксперименты с высокотемпературной микронизацией (ВТМ-нагрев в потоке инфракрасного излучения) показали снижение содержания алкалоидов примерно на 20 %, что подтверждает лишь умеренную эффективность данного подхода в отношении хинолизидиновых алкалоидов (Зверев & Размочаев, 2023).

Экструдирование, широко используемое в технологии экструзионных продуктов, не приводит к существенному снижению алкалоидов, что подробно показано Зверевым и Размочаевым (2023). Биологические методы — проращивание, автолиз и ферментализация — позволяют уменьшить алкалоидность в среднем на 5–45 %, причем максимальные значения (около 90 % от исходного уровня) достигаются только при комбинировании многостадийного замачивания и двойной ферментативной обработки (Зверев & Размочаев, 2023). Эти схемы характеризуются высокой длительностью и сложностью, что серьезно ограничивает их промышленную применимость.

Жидкостная обработка (водные и щелочные экстракции) остается одним из наиболее изученных инструментов обезгорчивания, однако требует работы с большими объемами экстрагентов и последующей сушки. В работах Ващекина (2009), Афонинной & Костюченко (2012), Панкиной & Борисовой (2015), Singh et al. (2023) обезгорчивание проводили в несколько этапов с обязательной жидкостной фазой (вымачивание, использование различных растворов), что действительно приводило к заметному снижению алкалоидов даже в высокоалкалоидном сырье, но сопровождалось потерями растворимых питательных веществ и необходимостью утилизации отработанной жидкости. Аналогичные ограничения отмечаются и для ультразвуковых технологий переработки люпина (Потаракина, 2022; Aguilar-Acosta et al., 2020).

Барогидротермическая обработка (БГТО), широко используемая в переработке сои, традиционно применяется для инактивации ингибиторов протеаз и уреазы до безопасного уровня. В исследованиях по БГТО соевых бобов показано, что данный процесс позволяет снижать активность уреазы до pH 0,14, что ниже безопасного порога 0,2 %, а также устранять специфический «бобовый» привкус и формировать ореховые нотки вкуса, расширяя спектр применения соевой муки в рецептурах кондитерских изделий (Красильников и соавт., 2016). В отношении люпина ранее отсутствовали данные о целенаправленном применении БГТО для снижения алкалоидов, что сформировало основание для разработки и патентной защиты соответствующей технологии (Красильников, Мехтиев & Родионова, 2019).

В сумме литературные данные показывают, что большинство существующих методов снижения алкалоидов либо требуют сложной многостадийной жидкостной обработки, либо недостаточно эффективно снижают алкалоидность при сухих режимах, либо не описаны достаточно подробно для прямого внедрения в пищевые технологии. Это обосновывает необходимость систематического сравнения термической, микроволновой и барогидротермической обработки в сопоставимых условиях на конкретных сортах люпина.

### Обоснование выбора исследуемых методов (способов)

Выбор методов, положенных в основу настоящего исследования, обусловлен одновременно технологическими, экономическими и органолептически-ми соображениями. Как показывают обзоры по переработке и использованию люпина (Зверев, 2020; Зверев & Размочаев, 2023; Руцкая & Тимошенко, 2023; Domuta et al., 2022), именно «сухие» или подходы с минимальным расходом воды представляют наибольший интерес для пищевой промышленности, ориентированной на небольшие и средние предприятия.

Термическая обработка (сухой нагрев) относится к наиболее технологичным и доступным способам, поскольку может быть реализована на стандартном жарочном или конвекционном оборудовании. Литературные данные (Ващекин, 2009; Кадыров и соавт., 2001; Adiss et al., 2025) свидетельствуют о том, что в диапазоне температур 130–150 °С возможно частичное снижение алкалоидности при сохранении приемлемой структуры продукта, однако отсутствуют данные о влиянии термических режимов на различные виды и сорта люпина и о достижимости нормативных уровней алкалоидов для пищевого применения.

Микроволновая обработка аккумулирует преимущества интенсивного объемного нагрева и потенциальной энергоэффективности. Работы Панкиной & Борисовой (2015) показывают, что при сочетании предварительной замочки и длительного СВЧ-нагрева снижение алкалоидов может достигать 60,5–66 % от исходных значений. Однако эти исследования проводились в бытовой печи и не учитывали особенности промышлен-

ного оборудования. Включение микроволнового метода в сравнительный анализ позволяет оценить, в какой мере промышленная установка (например, типа «Арабис») может воспроизвести или превзойти лабораторные результаты при ограничении времени обработки и сохранении органолептических характеристик.

Барогидротермическая обработка (БГТО), успешно используемая для детоксикации сои (Красильников и соавт., 2016), представляет собой перспективное направление и для люпина, поскольку сочетает сухой подогрев с кратковременным высокотемпературным воздействием пара под давлением. Разработанный и защищенный патентом РФ № 2698899 способ снижения алкалоидов в зерне люпина определяет конкретные параметры давления (10 атм.) и времени выдержки (28 с) в барокамере, обеспечивающие существенное снижение алкалоидности при сохранении приемлемых органолептических свойств (Красильников, Мехтиев & Родионова, 2019). Воспроизводимость результатов привязана к промышленной линии на базе ООО «Центр Соя», что создает предпосылки для практического внедрения.

Кроме технологичности, важным критерием выбора методов являлось минимальное вмешательство в белковую и углеводную фракции зерна люпина и сохранение потенциала для создания продуктов функционального и специализированного назначения (Красильников и соавт., 2010; Зайцева и соавт., 2020; Domuta et al., 2022; Chamone et al., 2023). В отличие от многостадийных жидкостных и биологических схем, «сухие» режимы термической, микроволновой и барогидротермической обработки потенциально позволяют снизить алкалоиды при меньших потерях растворимых белков и углеводов и без существенного увеличения водно- и энергопотребления.

Таким образом, выбор трех методов (термической обработки, микроволнового нагрева и БГТО) обусловлен их высокой технологичностью, потенциальной ресурсо- и энергосберегающей направленностью, а также наличием предварительных данных об их эффективности в отношении хинолизиновых алкалоидов.

## Ограничения теоретической и методической базы

Анализ литературы показывает, что для термической и микроволновой обработки люпина отсутствуют унифицированные, апробированные протоколы, сопоставимые по условиям с промышленными технологическими линиями (Панкина & Борисова, 2015; Adiss et al., 2025; Зверев & Размочаев, 2023). В частности, режимы СВЧ-нагрева в бытовых печах и лабораторных установках редко детализируются по мощности, частоте и характеристикам камеры, что затрудняет перенос полученных результатов в промышленную практику. Аналогичная ситуация отмечается для БГТО: при наличии успешных решений для сои практически отсутствуют опубликованные данные по люпину, за исключением запатентованного способа, описанного на конкретной производственной линии (Красильников, Мехтиев & Родионова, 2019).

Недостаточно изучено влияние различных режимов обработки на фракционный состав алкалоидов и их возможные продукты преобразования. Учитывая, что оценка алкалоидности в большинстве работ выполняется фотоколориметрическими методами<sup>3</sup>, не исключается риск ложноположительной реакции на продукты деградации алкалоидов при высоких температурах, что может приводить к неконсистентным результатам при обработке выше 150 °С. В литературе указываются более точные методы — хроматографические и СО<sub>2</sub>-экстракционные (Tei & Wink, 1999; Овчинников и соавт., 2015), однако их применение в исследованиях технологической обработки люпина пока эпизодично.

Кроме того, в имеющихся работах практически отсутствуют сопоставимые по дизайну исследования, в которых влияние термической, микроволновой и барогидротермической обработки оценивалось бы: (1) на разных видах и сортах люпина при одинаковых режимах; (2) одновременно по показателям алкалоидности и органолептической приемлемости; (3) с учетом нормативных требований к содержанию алкалоидов для пищевого использования (Купцов & Такунов, 2006; Frick et al., 2017; Руцкая & Тимошенко, 2023).

Обзорные работы (Руцкая & Тимошенко, 2023; Зверев & Размочаев, 2023; Domuta et al., 2022) фиксируют наличие широкого набора методов снижения алкалоидов, но одновременно подчеркивают фрагментарность данных о влиянии этих методов на пищевую ценность и функциональные свойства продуктов. Особенно мало сведений о том, в какой степени термическая, СВЧ- и БГТО-обработка сохраняют нативную структуру белковых фракций люпина, что имеет принципиальное значение для оценки его перспектив как ингредиента в системах безглютеновых и высокобелковых продуктов (Конарев, 2000; Красильников и соавт., 2010; Зайцева и соавт., 2020). Таким образом, сформировавшийся в литературе пробел связан с отсутствием комплексной, сопоставимой оценки трех перспективных «сухих» методов обработки зерна люпина (термической, микроволновой и барогидротермической) с одновременным учетом динамики содержания хинолизидиновых алкалоидов, органолептических свойств и требований действующих нормативов. Именно ликвидации этого пробела и посвящено настоящее исследование.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Дизайн исследования

Исследование носит экспериментальный характер и направлено на сравнительную оценку эффективности трех различных методов обработки зерна люпина: термической, микроволновой и барогидротермической. Для анализа были выбраны сорта двух видов люпина: узколистный (*Lupinus angustifolius* L., сорта Белозерный 110 и Радужный) и белый (*Lupinus albus* L., сорт Дега). Каждый метод обрабатывался в различных температурно-временных режимах (см. ниже), после чего содержание алкалоидов в образцах определялось фотоколориметрическим методом (Артюхов и соавт., 2012). Все процедуры выполнялись в трех повторностях.

<sup>3</sup> Артюхов, А.И., Яговенко, Т.В., Афонина, Е.В. & Трошина, Л.В. (2012). Количественное определение алкалоидов в люпине. *Методические рекомендации — Брянск, издательство «Читай-город».*

## Объекты исследования

Объектами исследований были два вида люпина: узколистный (*Lupinus angustifolius L.*), сорт Белозерный 110 и Радужный и белый (*Lupinus albus L.*), сорт Дега.

ООО «Протеин Плюс» (ИНН 7802083100) выполняло функции организатора и координатора исследований.

## Методика термической обработки

Термическую обработку проводили при температуре от 120 до 180 °С (с шагом 10 градусов), время обработки варьировалось от 10 мин до 20 мин (с шагом 5 мин) с ограничением по органолептическим свойствам зерна люпина: обработку прекращали при появлении привкуса горелого и/или изменении цвета ядра зерна люпина до коричневого.

Нагрев зерна люпина осуществлялся в воздушной среде в камере пароконвектомата, в которой через электронную панель управления задается точное значение температуры и времени, режим нагрева (обжарки). Обжарку зерна производили монослоем на металлической поверхности с перфорационными отверстиями, которые способствуют лучшему улетучиванию влаги и других летучих веществ. Для своих исследований мы использовали пароконвектомат Electrolux Professional AOS061ETA1 на базе кафедры технологии и организации общественного питания СПбТЭУ (Высшая школа биотехнологий и пищевых производств Института биомедицинских систем и биотехнологий при СПбПУ им. Петра Великого).

## Методика микроволновой обработки

Микроволновую обработку проводили в камере микроволновой установки («Арабис» на базе производственных мощностей ООО «Гамма-Маркет» (ИНН 7841361657)) от 5 до 25 мин с шагом 5 мин. Частота электромагнитных колебаний 2450 МГц. На блоке управления регулируются: количество работающих генераторов, скорость движения ленты в камере, время нахождения материала в камере. Выбрав необходимые параметры, загружают зерно люпина (в мешках по 10 кг) в камеру на транспортерную ленту микроволновой уста-

новки. Через половину от выбранного времени мешок с люпином переворачивают на другую сторону. На процесс обработки (кроме вышеуказанных параметров) также влияет количество загруженного материала.

## Методика барогидротермической обработки (БГТО)

Обработку зерна люпина методом БГТО осуществлялась на базе производственных мощностей ООО «Центр Соя» (ИНН 2351010523) в Краснодарском крае. Подвергали процессу БГТО зерно белого люпина сорта Дега.

Методика БГТО заключается в последовательном воздействии на зерно сухого нагрева (после механической обработки оно поступает в жаровню, где греется в течение 90 мин при температуре 90–100 °С), затем зерно подвергается воздействию пара при давлении 10 атм в барокамере в течение нескольких секунд. Нами экспериментально установлено, что для люпина белого сорта Дега рекомендуемое время нахождения зерна в барокамере составляет 28 с.

Подробная структурная технологическая схема БГТО зерна люпина приведена на Рисунке 1. Зерно люпина автотранспортом подается в приемный бункер (поз. 1), откуда винтовым конвейером (поз. 2) и ленточной норией (поз. 3) транспортируется на два мульти-крекера МС — 7 параллельно (поз. 4а), где люпин измельчается, после чего происходит отделение оболочки. Затем поступает на сортировочную машину (поз. 5), где происходит разделение на фракции: частицы люпина диаметром менее 5 мм поступают далее на жаровню, диаметром более 5 мм возвращаются на мульти-крекер на повторное измельчение. В конце сортировочного сита установлена аспирационная колонка, через которую по аспирационной сети удаляется люпиновая оболочка в бункер аспирационных отсосов (поз. 23). Измельченный и освобожденный от оболочки люпин винтовым конвейером (поз. 6) и ленточной норией (поз. 7) подается в пятичанную жаровню (поз. 8), где нагревается до 90–100 °С в течение 90 мин. Нагретое зерно ленточной норией (поз. 9) и винтовым конвейером (поз. 10) подается в реактор БГТО (поз. 11).



### Принцип действия реактора БГТО

Зерно через шиберный дозатор поступает в барокамеру (туда же подается пар давлением 10 атм), где происходит нагрев до 150–160 °С и насыщение продукта паром. Через установленное время производится открывание выпускного клапана, при этом происходит выброс продукта из барокамеры в приемный бункер и выгрузка его через лоток. Процесс барогидротермического нагрева — циклический. За один цикл происходит обработка порции зерна весом 8–10 кг. Время обработки паром зависит от параметров исходного сырья.

Из реактора БГТО обработанный люпин через циклоны-осадители (поз. 12), где происходит удаление излишней влаги посредством вытяжных вентиляторов, винтовыми конвейерами (поз. 13 и поз. 14) подается на плющильный станок с магнитным сепаратором (поз. 15). После этого продукт подается в охладитель (поз. 16). Охлажденный готовый продукт посредством винтового конвейера (поз. 17), ленточной норрии (поз. 18), винтового конвейера (поз. 19) подается в бункер готовой продукции (поз. 20) для отгрузки в автотранспорт.

Аспирационные относы (оболочка люпина) от системы аспирации оборудования участка БГТО подаются в бункер (поз. 23), откуда отгружаются в автотранспорт.

**Таблица 1**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке в диапазоне температур 120–180 °С (белый люпин сорта Дега)

**Table 1**

Change in Alkaloid Content during Heat Treatment in the Temperature Range of 120–180 °С (White Lupine, Variety “Dega”)

Температура (сухой нагрев, без воды), °С	Время нагрева 10 мин		Время нагрева 15 мин		Время нагрева 20 мин	
	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
25 (комнатная температура)	0,093	0,00	0,093	0,00	0,093	0,00
120	0,091	2,15	0,086	7,53	0,083	10,75
130	0,089	4,30	0,082	11,83	0,082	11,83
140	0,057	38,71	0,05	46,24	0,033	64,52
150	0,039	58,06	0,044	52,69	0,045	51,61
160	0,09	3,23	0,045	51,61	0,049	47,31
170	0,037	60,22	0,08	13,98	0,071	23,66
180				—		

### Метод анализа содержания алкалоидов

Определение содержания алкалоидов в образцах проводили во ВНИИ люпина в соответствии фотокolorиметрическим методом по Терехову Ф. К. в модификации ВНИИ люпина (Артюхов, др., 2012).

Есть и другие методы измерения содержания алкалоидов, такие как методы хроматографии (Tei & Wink, 1999) или CO<sub>2</sub>-экстракции (Овчинников и соавт., 2015), которые считаются наиболее точными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Термическая обработка

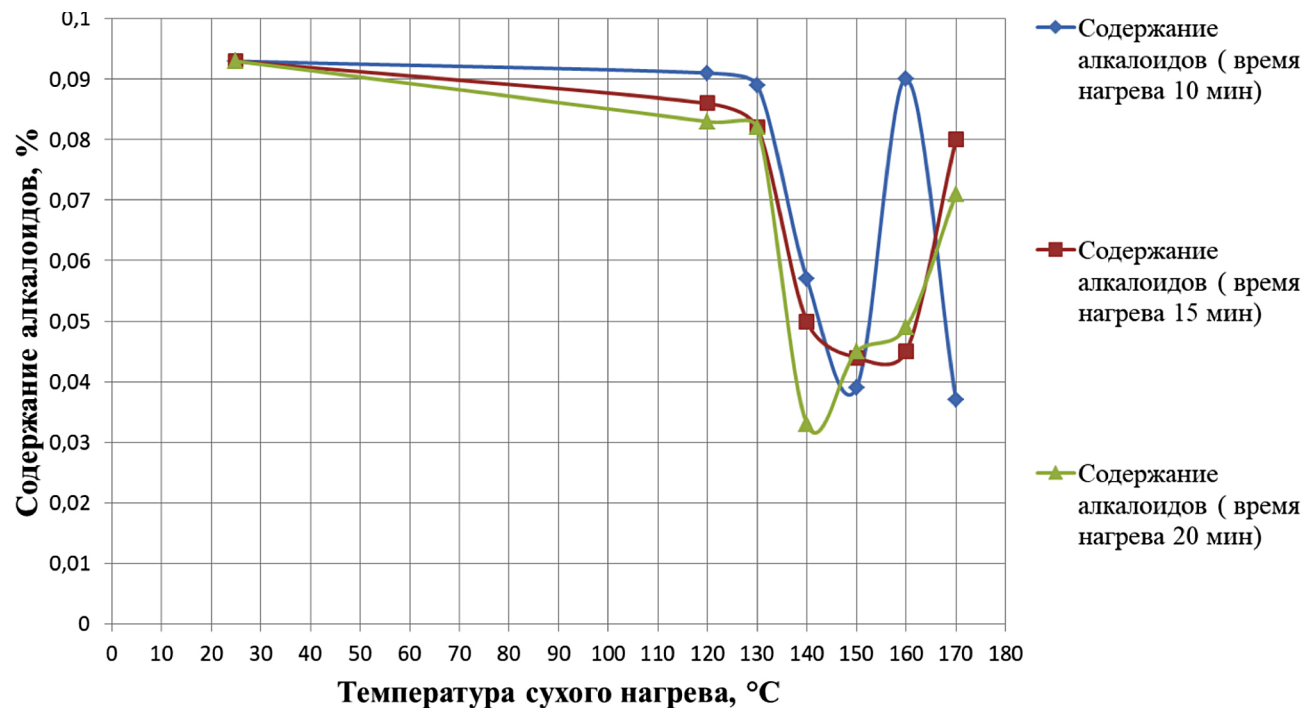
Результаты влияния термической обработки на содержание алкалоидов в зерне люпина при температуре 120–180 °С (белый люпин сорта Дега) представлены в Таблицах 1 и 2 и на Рисунках 2 и 3. Максимальное снижение содержания алкалоидов (на 64,5 %) наблюдалось при обжарке зерна при температуре 140 °С в течение 20 мин. Также существенное снижение содержания данных соединений (на 58,1 %) произошло при 150 °С после 10 мин термической обработки. В диапазоне температур 140–150 °С происходит максимальное снижение алкалоидов в зерне люпина белого сорта Дега.

**Рисунок 2**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке (белый люпин сорта Дегя)

**Figure 2**

Changes in Alkaloid Content during Heat Treatment (White Lupine Variety "Dega")

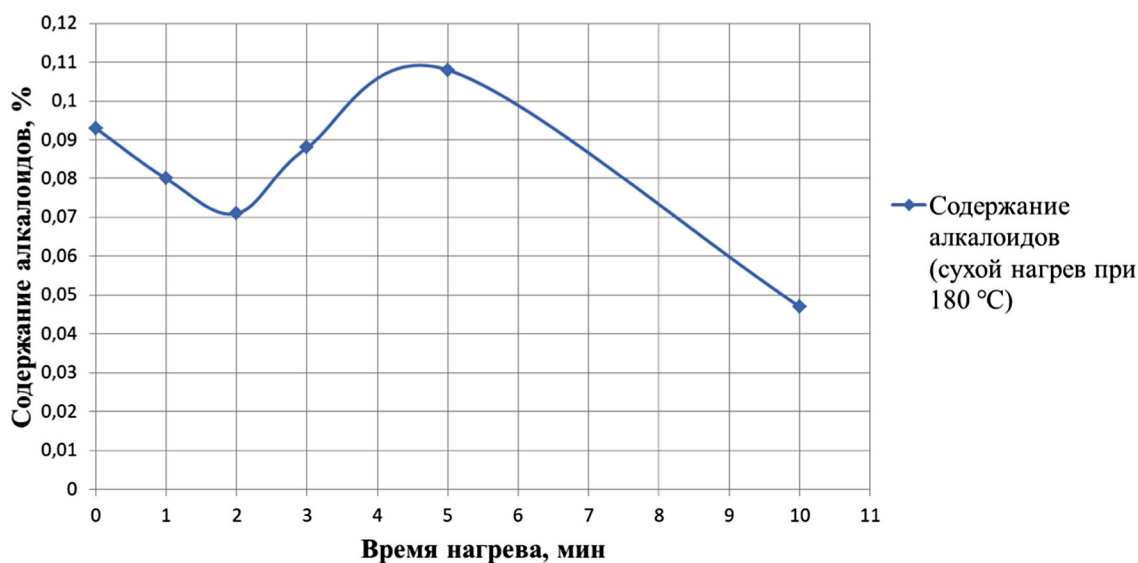


**Рисунок 3**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке (белый люпин сорта Дегя при 180 °C)

**Figure 3**

Changes in Alkaloid Content during Heat Treatment (White Lupine Variety "Dega" at 180°C)



**Таблица 2**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке (белый люпин сорта Дега, при 180 °С)

**Table 2**

Changes in Alkaloid Content during Heat Treatment (White Lupine Variety "Dega", at 180°C)

Время сухого нагрева (обжарка), мин	Содержание алкалоидов, % (сухой нагрев при 180 °С)	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
0 (исходное зерно)	0,093	0,00
1	0,08	13,98
2	0,071	23,66
3	0,088	5,38
5	0,108	-16,13
10 (зерно люпина приобрело темно-коричневый цвет и явный привкус горелого)	0,047	49,46

При температуре 180 °С зерно во всех временных промежутках (от 10 до 20 мин) приобретало темно-коричневый цвет, присутствовал привкус горелого, что не соответствовало органолептическим показателям. Содержание алкалоидов в таком образце не определяли. Поэтому при температуре 180 °С пришлось уменьшить время обработки от 1 до 10 мин с шагом 1–5 мин (Таблица 3).

Результаты влияния термической обработки на содержание алкалоидов в зерне люпина при температуре 140–170 °С (люпин узколистный сорта Белозерный 110) представлены в Таблице 3 и на Рисунке 4. При температуре 170 °С зерно люпина узколистного приобретало темно-коричневый цвет и привкус горелого. Содержание алкалоидов в таком образце не определяли. При 150 °С в течение 20 мин произошло максимальное снижение содержания алкалоидов (на 10,34%) от исходного значения.

**Таблица 3**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке в диапазоне температур 140–170 °С (люпин узколистный сорта Белозерный 110)

**Table 3**

Changes in Alkaloid Content during Heat Treatment in the Temperature Range of 140–170°C (Narrow-Leaved Lupine, Variety "Belozerny 110")

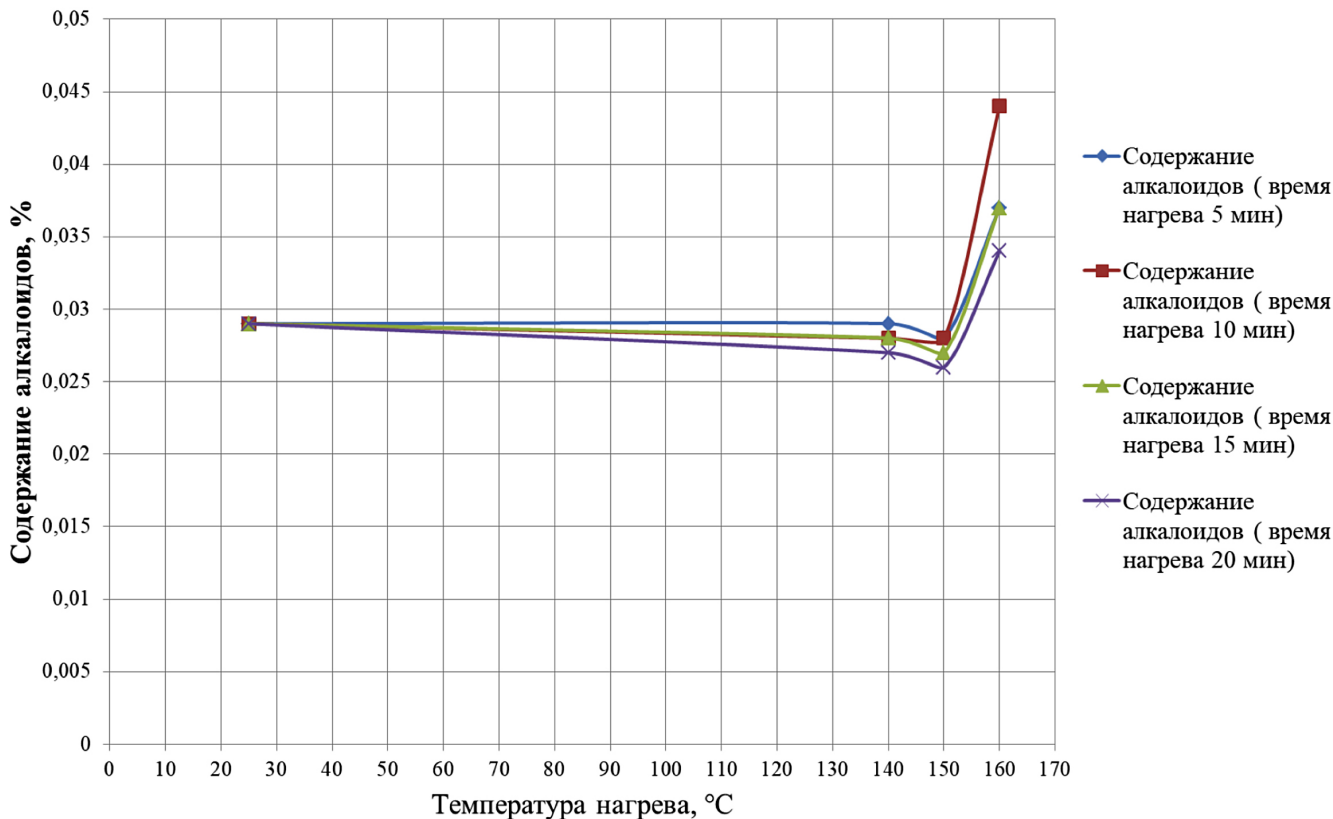
Температура (сухой нагрев, без воды), °С	Время нагрева 5 мин		Время нагрева 10 мин		Время нагрева 15 мин		Время нагрева 20 мин	
	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
25 (исходное зерно)	0,029	0,00	0,029	0,00	0,029	0,00	0,029	0,00
140	0,029	0,00	0,028	3,45	0,028	3,45	0,027	6,90
150	0,028	3,45	0,028	3,57	0,027	6,90	0,026	10,34
160	0,037	-27,59	0,044	-40,54	0,037	-27,59	0,034	-17,24
170	—							

**Рисунок 4**

Изменение содержания алкалоидов при термической обработке (люпин узколистный сорта Белозерный 110)

**Figure 4**

Changes in Alkaloid Content during Heat Treatment (Narrow-Leaved Lupine, Variety "Belozerny 110")



### Микроволновая обработка

Результаты влияния времени микроволновой обработки на содержание алкалоидов в зерне люпина белого сорта Дега представлены в Таблице 4 и на Рисунке 5. Максимальное снижение содержания алкалоидов для белого люпина составило 66,67% (от 0,093% до 0,031%) от исходного содержания в зерне. Время микроволновой обработки — 20 мин.

Результаты влияния времени микроволновой обработки на содержание алкалоидов в зерне люпина узколистного сорта Радужный представлены в Таблице 5 и на Рисунке 5. Максимальное снижение содержания алкалоидов для узколистного люпина (сорта Радужный) составило 38,46% (от 0,026% до 0,016%) по отношению к их исходному содержанию в зерне. Время микроволновой обработки — 20 мин.

**Таблица 4**

Изменение содержания алкалоидов в белом люпине сорта Дега в зависимости от времени микроволновой обработки

**Table 4**

Changes in Alkaloid Content in White Lupine of the 'Dega' Variety Depending on the Duration of Microwave Treatment

Время микроволновой обработки, мин	Содержание алкалоидов, %	Снижение содержания алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
0 (исходное зерно)	0,093	0,00
5	0,083	10,75
10	0,068	26,88
15	0,033	64,52
20	0,031	66,67
25	—	—

**Таблица 5**

Изменение содержания алкалоидов в узколистном люпине сорта Радужный в зависимости от времени микроволновой обработки

**Table 5**

Changes in Alkaloid Content in Narrow-Leaf Lupine of the 'Raduzhny' Variety Depending on the Duration of Microwave Treatment

Время микроволновой обработки, мин	Содержание алкалоидов, %	Снижение содержания алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
0 (исходное зерно)	0,026	0,00
5	0,023	11,54
10	0,020	23,08
15	0,018	30,77
20	0,016	38,46
25		–

## Барогидротермическая обработка (БГТО)

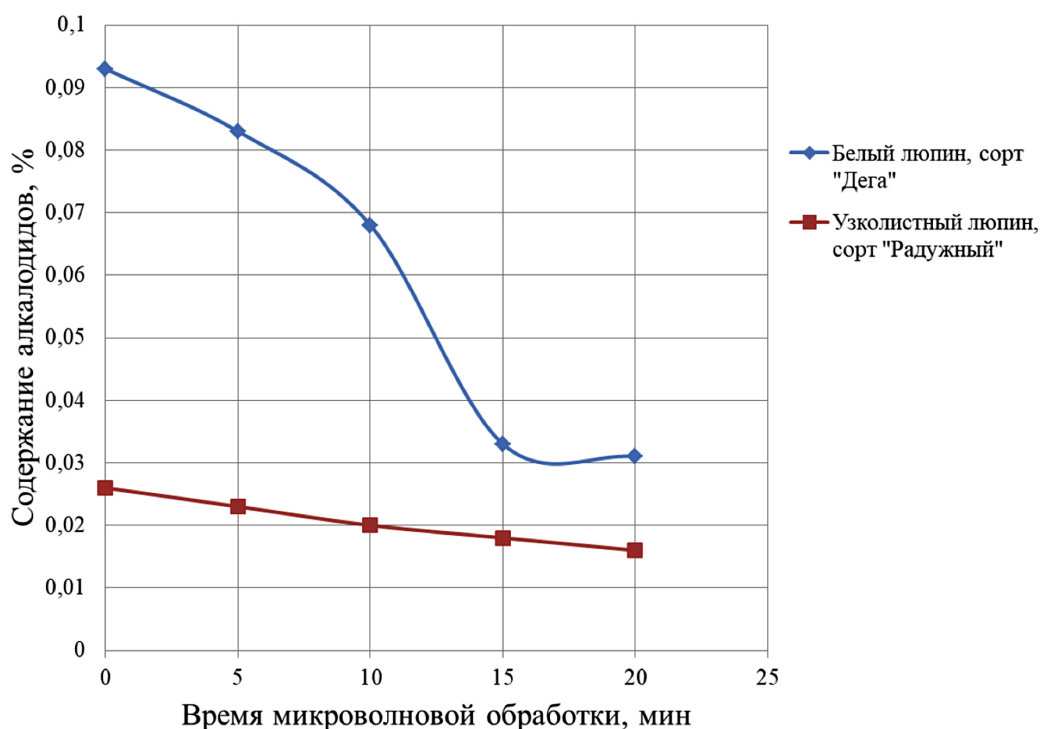
Результаты влияния барогидротермической обработки (БГТО) на содержание алкалоидов в зерне белого люпина сорта Дега представлены в Таблице 6 и на Рисунке 6. После жаровни и БГТО в течение 28 с суммарное снижение алкалоидов относительно исходного их содержания в зерне люпина составило 69,51 %. Исходное содержание алкалоидов в зерне было 0,082 %, после жаровни — 0,042 %, а после проведения БГТО в течение 28 с содержание алкалоидов стало 0,025 %. При обработке в течение 32 с цвет ядра зерна люпина становилось темно-коричневым. Алкалоиды в таких образцах не определяли, дальнейшая обработка зерна в камере нецелесообразна.

**Рисунок 5**

Зависимость изменения содержания алкалоидов в зерне люпина под воздействием микроволновой обработки и времени

**Figure 5**

Dependence of Changes in Alkaloid Content in Lupine Grain under the Influence of Microwave Treatment and Time



**Таблица 6**

Содержание алкалоидов в белом люпине сорта Дега до и после БГТО

**Table 6**

Alkaloid Content in White Lupine Cultivar 'Dega' before and after Biogas Treatment

Стадии технологической обработки с временными значениями	Содержание алкалоидов, %	Снижение алкалоидов в сравнении с исходным зерном, %
Люпин (исходное зерно)	0,082	—
Люпин (обрушенное зерно) после жаровни до барокамеры	0,042	48,78
Люпин БГТО, 12 секунд (обрушенное зерно)	0,039	52,44
Люпин БГТО, 18 секунд (обрушенное зерно)	0,031	62,20
Люпин БГТО, 24 секунды (обрушенное зерно)	0,028	65,85
Люпин БГТО, 28 секунд (обрушенное зерно)	0,025	69,51
Люпин БГТО, 32 секунды (обрушенное зерно)	—	—

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Термическая обработка

Полученные результаты по термической обработке подтверждают принципиальную возможность существенного снижения содержания хинолизидиновых алкалоидов только за счет сухого нагрева. Наиболее эффективным режимом для белого люпина сорта Дега оказалась обжарка при 140 °C в течение 20 мин: суммарное содержание алкалоидов уменьшалось с 0,093% до 0,033%, что соответствует снижению на 64,5% по отношению к исходному уровню. Для узколистного люпина сорта Белозерный 110 максимальный эффект (10,3%) достигался при 150 °C и 20 мин. Таким образом, при одинаковых температурно-временных параметрах степень снижения алкалоидов существенно зависит как от вида люпина, так и от исходной алкалоидности сырья.

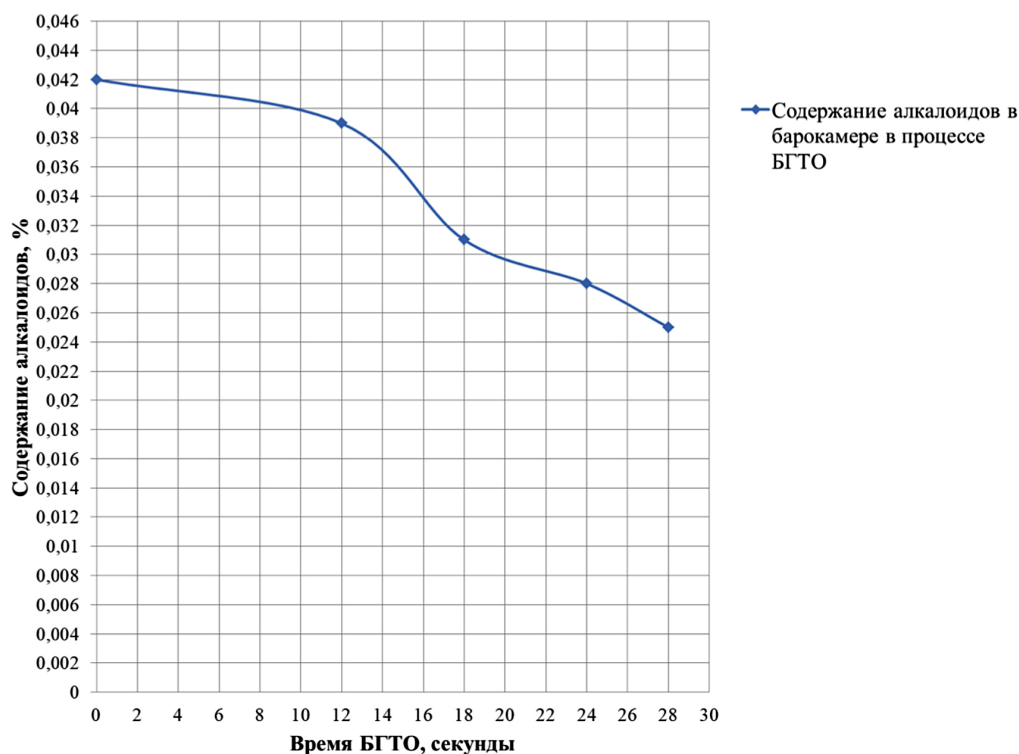
Сопоставление с литературными данными показывает, что выявленный диапазон эффективных температур (130–150 °C) согласуется с результа-

**Рисунок 6**

Изменение содержания алкалоидов в зерне белого люпина сорта Дега в барокамере в процессе БГТО

**Figure 6**

Changes in Alkaloid Content in White Lupine Grain (variety "Dega") in a Pressure Chamber during Barohydrothermal Processing



тами Кадырова и соавт. (2001) и Ващекина (2009), где аналогичный температурный интервал обеспечивал снижение алкалоидов на 30–41 %. Вместе с тем в настоящем исследовании для белого люпина получен более высокий относительный эффект, что, по-видимому, связано с более высокой исходной алкалоидностью зерна и отличиями фракционного состава алкалоидов у белого и узколистного люпина. Как показано в литературе, в семенах белого люпина доминируют люпанин, мультифлорин и 13-гидроксилюпанин, тогда как для узколистного характерно иное соотношение люпанина и ангиштифолина; различная термостабильность этих соединений может определять видоспецифическую чувствительность к нагреву.

Важно подчеркнуть, что при повышении температуры выше 150 °С (160–180 °С) во всех исследованных интервалах времени (10–20 мин) отмечалось формирование выраженного привкуса горелого и потемнение ядра, что делает подобные режимы технологически неприемлемыми. Дополнительно при этих температурах были зафиксированы неконсистентные значения алкалоидности, вероятно обусловленные ограничениями примененного фотокolorиметрического метода (Артюхов и др., 2012) при наличии продуктов термического распада алкалоидов, что указывает на необходимость дальнейшей верификации данных методом хроматографического анализа, особенно для режимов выше 150 °С.

## Микроволновая обработка

Микроволновая обработка показала сопоставимую или более высокую эффективность по снижению алкалоидов по сравнению с термической обжаркой. Для белого люпина сорта Дега при обработке в промышленной СВЧ-установке «Арабис» в течение 20 мин содержание алкалоидов уменьшалось с 0,093 % до 0,031 % (снижение на 66,7 %). Для узколистного люпина сорта Радужный при тех же условиях алкалоидность снижалась с 0,026 % до 0,016 % (38,46 %). Как и в случае конвективного нагрева, относительная степень снижения была выше у вида с большей исходной концентрацией алкалоидов, что подтверждает зависимость эффективности детоксикации от начального уровня алкалоидности.

Полученные значения хорошо согласуются с данными Панкиной и Борисовой (2015), показавших

снижение алкалоидности на 60,5–66 % при микроволновой обработке люпина с предварительной замочкой. В отличие от их работы, настоящее исследование выполнено на промышленной установке в условиях сухого СВЧ-нагрева без жидкостной стадии, что делает результаты ближе к реальным производственным сценариям. Привязка режимов обработки к конкретной установке («Арабис») одновременно является и преимуществом (высокая воспроизводимость), и ограничением, поскольку масштабирование на иное оборудование потребует валидации режимов с учетом геометрии камеры, распределения поля и мощности генераторов.

Увеличение времени микроволновой обработки более 20 мин приводило к недопустимому ухудшению органолептических показателей: усиливался привкус горелого, ядро приобретало темно-коричневую, переходящую в черную окраску. Этот результат указывает на наличие достаточно узкого «окна» технологически приемлемых режимов, при которых достигается существенное снижение алкалоидов при сохранении приемлемого цвета и вкуса.

## Барогидротермическая обработка (БГТО)

Среди исследованных подходов наибольшую эффективность продемонстрировала барогидротермическая обработка, сочетающая предварительную обжарку и кратковременное воздействие водяного пара под давлением. Для белого люпина исходное содержание алкалоидов составляло 0,082 %; после обжаривания в жаровне оно снижалось до 0,042 %, а последующая выдержка в барокамере при давлении 10 атм в течение 28 с дополнительно уменьшала алкалоидность до 0,025 %. В сумме это соответствует снижению на 69,5 % относительно исходного уровня. При увеличении времени пребывания в барокамере сверх 28 с наблюдалось интенсивное потемнение ядра и ухудшение органолептических характеристик, что позволяет рассматривать выбранный режим как компромисс между эффективностью детоксикации и сохранением потребительских свойств.

Ранее барогидротермическая обработка была детально изучена на сое, где она используется для инактивации уреазы и снижения «бобового» привкуса, формируя ореховые ноты вкуса (Красильников и соавт., 2016). В отношении люпина опубликованные данные об использовании БГТО для снижения

алкалоидов отсутствовали; предложенный в настоящей работе подход был оформлен как изобретение (патент РФ № 2698899 «Способ снижения алкалоидов в зерне люпина») (Красильников, Мехтиев & Родионова, 2019). Научная новизна данного решения заключается в определении конкретного сочетания параметров (давление 10 атм и время выдержки 28 с), обеспечивающего существенное снижение содержания алкалоидов при сохранении приемлемых органолептических показателей и технологической реализуемости на промышленной линии.

### Сопоставительный анализ методов

В совокупности результаты показывают, что все три исследованных метода (термическая обжарка, микроволновая обработка и БГТО) обеспечивают сопоставимый порядок снижения алкалоидности (примерно 60–70 % от исходного уровня для белого люпина), но различаются по чувствительности к виду сырья, ширине диапазона рабочих режимов и влиянию на органолептические свойства.

Для белого люпина наибольшую относительную эффективность показала БГТО (69,5%), за которой следуют микроволновая обработка (66,7%) и термическая обжарка (64,5%). При этом БГТО позволяет достигать конечных значений 0,025%, что соответствует российским требованиям к пищевому люпину ( $\leq 0,04\%$ ) и приближается к более жестким зарубежным нормативам, тогда как для узколистного люпина в рамках исследованных режимов снижение алкалоидов было менее выраженным. Эти результаты ещё раз подчеркивают необходимость учета видовых и сортовых особенностей, а также исходного уровня алкалоидности при проектировании технологических схем.

Важно отметить, что микроволновая и термическая обработка реализуется на относительно доступном оборудовании (жарочные шкафы, пароконвектоматы, СВЧ-установки), тогда как линия БГТО требует более серьезных капитальных вложений. С практической точки зрения это означает, что для малых и средних предприятий термическая и микроволновая обработка могут выступать как базовые решения, тогда как БГТО целесообразно рассматривать в качестве технологически более сложной, но более эффективной опции для специализированных производств.

### Ограничения исследования и направления дальнейших исследований

Одним из методических ограничений исследования является использование фотоколориметрического метода определения суммарного содержания алкалоидов (Артюхов и соавт., 2012). При высоких температурах возможно образование продуктов термического распада, потенциально способных вступать в реакции с реактивами, что может приводить к завышению или нестабильности оценок при  $t > 150^\circ\text{C}$ . В связи с этим перспективным направлением дальнейшей работы является верификация полученных данных с помощью хроматографических методов анализа, позволяющих отдельно оценивать динамику основных индивидуальных алкалоидов.

Кроме того, в настоящем исследовании основное внимание уделялось снижению алкалоидности и органолептическим характеристикам, тогда как влияние различных режимов обработки на структуру белковых фракций люпина не рассматривалось. Известно, что интенсивные тепловые воздействия могут приводить к денатурации, агрегации и фрагментации белков, что, в свою очередь, влияет на функционально-технологические свойства (растворимость, пено- и эмульгирующую способность) и пищевую ценность. Для оценки степени сохранности нативной структуры белков целесообразно использовать электрофорез в полиакриламидном геле по Конареву (2000) до и после технологической обработки. При сопоставимой эффективности по снижению алкалоидов приоритетным с точки зрения практики будет тот метод, который минимально нарушает нативную структуру белковых фракций.

Наконец, результаты исследования получены на ограниченном наборе сортов белого и узколистного люпина. Расширение спектра изучаемых генотипов с различной исходной алкалоидностью и фракционным составом алкалоидов позволит уточнить видоспецифические закономерности детоксикации и сформировать более универсальные рекомендации по выбору режимов обработки.

### Практические рекомендации

С учетом полученных данных можно предложить ориентировочные режимы технологической обработки зерна люпина, которые обеспечивают суще-

ственное снижение содержания хинолизидиновых алкалоидов при сохранении приемлемых органолептических характеристик и могут быть использованы в качестве основы для проектирования производственных схем.

Во-первых, для белого люпина сорта Дега оптимальным по соотношению «эффективность детоксикации / сохранность потребительских свойств» показал себя режим сухой термической обработки при температуре 140 °С в течение 20 мин. При этих параметрах достигается снижение содержания алкалоидов на 64,5 % относительно исходного уровня, при этом ядро сохраняет светлую окраску и отсутствуют признаки выраженного привкуса горелого. Реализация данного режима может быть обеспечена на стандартном жарочном или конвекционном оборудовании (жарочные шкафы, пароконвектоматы) при обязательном наличии точной системы контроля и поддержания температуры, а также режима конвекции воздушного потока, обеспечивающего равномерный нагрев слоя зерна.

Для узколистного люпина целесообразно ориентироваться на несколько более высокий температурный режим. Для сорта Белозерный 110 приемлемое снижение алкалоидности (10,3 % от исходного уровня) достигалось при обжарке при 150 °С в течение 20 мин. При меньших температурах относительный эффект был ниже, тогда как при дальнейшем повышении температуры (160–180 °С) происходило заметное ухудшение органолептических показателей (потемнение ядра, горелый вкус). Таким образом, для узколистного люпина диапазон 140–150 °С с экспозицией 20 мин можно рассматривать как рабочую область, внутри которой конкретные параметры требуют уточнения (вид и сорт сырья, толщина слоя, конструкция теплового оборудования) для достижения оптимального результата.

Во-вторых, для микроволновой обработки зерна люпина, по результатам испытаний на промышленной установке типа Арабис, оптимальным оказался режим выдержки в СВЧ-поле в течение 20 мин. Для белого люпина сорта Дега это обеспечивало снижение содержания алкалоидов на 66,7 %, для узколистного сорта Радужный — на 38,46 %. Более длительная обработка сопровождалась формированием привкуса горелого и потемнением ядра, что делает увеличение времени технологически нецелесообразным. На практике данный режим

может использоваться как базовый ориентир для промышленных микроволновых установок с сопоставимой удельной мощностью и конфигурацией камеры. Однако при смене типа оборудования требуется этап настройки: необходимо подобрать время обработки и при возможности — мощность излучения; контроль осуществляют по остаточному содержанию алкалоидов и органолептических показателей продукта.

В-третьих, для барогидротермической обработки (БГТО) белого люпина рекомендуется двухстадийная схема, включающая предварительный сухой нагрев и последующую кратковременную обработку паром под давлением. В условиях промышленной линии на базе переработки бобовых культур наиболее эффективным оказался следующий режим: нагрев зерна в жаровне при 90–100 °С в течение 90 мин до достижения равномерной внутренней температуры, затем перенаправление нагретого зерна в барокамеру и выдержка при давлении 10 атм в течение 28 секунд. Такое сочетание параметров обеспечивало снижение суммарного содержания алкалоидов на 69,5 % относительно исходного уровня (до 0,025 %), при этом сохранялись удовлетворительные органолептические характеристики. Увеличение времени нахождения в барокамере сверх 28 с сопровождалось интенсивным потемнением ядра и ухудшением вкуса, поэтому данный режим следует рассматривать как верхнюю границу технологически допустимой экспозиции.

Предлагаемые режимы не являются жесткими нормативами и должны рассматриваться как первоначальные ориентиры для проектирования и оптимизации технологических процессов на конкретных предприятиях. При масштабировании необходимо учитывать: сортовой и видовой состав сырья (белый, узколистный, желтый люпин; различия по исходной алкалоидности и фракционному составу алкалоидов); конструктивные особенности оборудования (тип и объем жарочных камер, схема конвекции, мощность и конфигурация микроволновых генераторов, объем и геометрия барокамеры); толщину слоя зерна, скорость его перемещения, степень заполнения рабочей камеры.

Отдельного внимания заслуживает внедрение БГТО. Учитывая высокую капиталоемкость специализированного оборудования и необходимость интеграции в существующие технологические ли-

нии, представляется целесообразным проведение пилотных (опытно-промышленных) испытаний на базе демонстрационных участков или действующих предприятий. На этапе таких испытаний рекомендуется: параллельно контролировать содержание алкалоидов фотоколориметрическим методом и по возможности хроматографическими методами для верификации данных в критических температурно-временных режимах; оценивать не только снижение алкалоидности, но и изменение белкового профиля (например, методом электрофореза в ПААГ, разработанным Конаревым (2000)), а также функционально-технологические свойства получаемой муки и крупки (растворимость, водопоглотительную способность, пено- и эмульгирующую способность); документировать органолептические характеристики продукта (цвет, вкус, запах, текстуру) в соответствии со стандартизированными сенсорными протоколами.

В совокупности результаты таких пилотных исследований позволят адаптировать предложенные режимы к конкретным условиям производства, определить экономически и технологически оправданные диапазоны температур и времени обработки для каждого вида и сорта люпина, и на этой основе сформировать научно обоснованные регламенты переработки. Это, в свою очередь, создаст предпосылки для разработки продуктовых линеек на основе люпина с гарантированно низким содержанием алкалоидов и предсказуемыми потребительскими свойствами, соответствующими действующим нормативным требованиям к пищевому сырью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что сухие способы обработки зерна люпина (термическая обжарка, микроволновая обработка и барогидротермическая обработка) позволяют существенно снижать содержание хинолизидиновых алкалоидов без введения жидкостной стадии и с сохранением приемлемых органолептических свойств продукта. Наиболее высокая степень детоксикации была получена для белого люпина, что подчеркивает важность учета видовой принадлежности и исход-

ного уровня алкалоидности при проектировании технологических режимов.

Термическая и микроволновая обработка обеспечили снижение содержания алкалоидов у белого люпина сорта Дега на 64,5 и 66,7% соответственно, тогда как для узколистных сортов эффект был менее выраженным. Барогидротермическая обработка, объединяющая предварительный сухой нагрев и кратковременное воздействие паром под давлением, продемонстрировала наибольшую эффективность: суммарное снижение алкалоидности достигло 69,5% относительно исходного уровня. Тем самым показано, что в рамках изученных режимов все три подхода обеспечивают сопоставимый порядок снижения алкалоидов, а различия между ними связаны прежде всего с чувствительностью конкретных видов и сортов, а также с требованиями к оборудованию и инвестиционным затратам.

Существенным научным результатом работы стало экспериментальное обоснование параметров БГТО для зерна люпина и их закрепление в виде запатентованного способа<sup>4</sup>, что подтверждает оригинальность предложенного решения и его технологическую состоятельность. Вклад исследования заключается не только в демонстрации эффективности отдельных методов, но и в сравнении трех технологических подходов в сопоставимых условиях, что создает основу для осознанного выбора режимов обработки в зависимости от вида сырья, целевого продукта и оснащенности производства.

Практическая значимость работы определяется тем, что микроволновая обработка и БГТО были испытаны на действующем промышленном оборудовании, а термическая обжарка реализуема на распространенных типах жарочных и конвекционных установок. Полученные режимы могут служить отправной точкой для разработки технологических регламентов переработки зерна люпина в муку, крупу и белковые концентраты с пониженным содержанием алкалоидов и использоваться при проектировании новых продуктов функционального и специализированного назначения. При этом применимость конкретных

<sup>4</sup> Красильников, В. Н., Мехтиев, В. С., & Родионова, Т. И. (2019). Способ снижения алкалоидов в зерне люпина [Патент РФ № 2698899]. Российская Федерация.

режимов должна уточняться с учетом сортового состава сырья, характеристик оборудования и целевых органолептических требований.

Вместе с тем результаты следует рассматривать с учетом ряда ограничений. Оценка содержания алкалоидов проводилась фотоколориметрическим методом, чувствительным к возможным продуктам термического распада при высоких температурах, что требует верификации данных с использованием хроматографических методов, особенно для режимов выше 150 °С. Кроме того, в рамках данной работы не анализировалось влияние обработки на структуру белковых фракций и функционально-технологические свойства белковых продуктов из люпина, хотя именно эти параметры во многом определяют пригодность сырья для глубокой переработки. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется комплексная оценка изменений белкового профиля (в том числе методами электрофореза) и свойств готовой продукции при различных режимах термической, микроволновой и барогидротермической обработки, а также расширение спектра изучаемых сортов и видов люпина. Это позволит сформировать более универсальные и технологически выверенные решения для промышленного использования люпина в пищевой промышленности.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Красильников Валерий Николаевич:** методология; формальный анализ; разработка концепции; научное руководство; валидация результатов; визуализация.

**Мехтиев Вадим Сейдулаевич:** концептуализация; формулирование исследовательских целей и задач; проведение исследования; контроль; создание рукописи и ее редактирование.

**Афони́на Елена Викторовна:** предоставление ресурсов; отбор проб; пробоподготовка; проведение исследований; разработка методологии исследования; проведения исследований.

**Тимошенко Елена Сергеевна:** визуализация; формальный анализ; редактирование рукописи.

**Торопова Мария Евгеньевна:** административное руководство исследовательским проектом; создание черновика рукописи, ресурсы.

**Родионова Татьяна Ивановна:** валидация результатов; формальный анализ; ресурсы.

## AUTHOR'S CONTRIBUTION

**Krasilnikov Valery:** methodology; formal analysis; conceptualization; supervision; validation; visualization.

**Mekhtiev Vadim:** conceptualization; formulation of research goals and objectives; investigation; monitoring; writing-review & editing.

**Afonina Elena:** resources; sample collection; sample preparation; investigation; development of research methodology; investigation.

**Timoshenko Elena:** visualization; formal analysis; writing — review & editing

**Toropova Mariya:** project administration; writing — original draft, resources.

**Rodionova Tatyana:** validation investigation; formal analysis; resources.

## ЛИТЕРАТУРА

- Агафонова, С. В., Рыков, А. И. & Мезенова, О. Я. (2019). Оценка биологической ценности белков люпина и перспектив его использования в пищевой промышленности. *Вестник Международной академии холода*, (2), 79–85.
- Афонина, Е. В. & Костюченко, В. И. (2012). Изменение содержания алкалоидов в крупе люпина после экстракции. *Кормопроизводство*, 5, 47–48.
- Ващекин, Е.П. (2009). Повышение полноценности крупного рогатого скота. *Вестник Брянской ГСХА*, (6), 10–16.
- Головченко, В. И., Кучеренко, В. Г., Кучеренко, Н. М., Головченко, О. В., & Седлецкий, М. А. (1996). *Способ получения полуфабриката из люпина для продуктов питания* (Патент Российской Федерации № RU 2059388 С1). Роспатент.
- Доморощенкова, М. Л., Егги, Э. Э., Мехтиев, В. С. & Демьяненко, Т. Ф. (2009). Люпин узколистный — перспективный источник пищевого белка. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (10), 53–56.
- Зайцева, Л. В., Юдина, Т. А., Рубан, Н. В., Бессонов, В. В., & Мехтиев, В.С. (2020). Современные подходы к разработке рецептур безглютеновых хлебобулочных изделий. *Вопросы питания*, 89(1), 77–85. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10009>
- Зверев, С. В., Косолапов, В. М., Зайцев, В. Б., Ставцев, А. Э., & Цыгуткин, А. С. (2020). Использование метода спектрофотометрии для идентификации высокоалкалоидных семян белого люпина. *Кормопроизводство*, 10, 25–28.
- Зверев, С.В., & Размочаев, Е.А. (2023). *Люпин белый. Переработка и использование в народном хозяйстве*. Тверь: АО «ГК МЕЛКОМ».
- Кадыров, Ф. Г., & Кадырова, Н. В. (2001). Зерно люпина в кормлении крупного рогатого скота и молодняка свиней. *Кормопроизводство*, 1, 26–28.
- Конарев, В.Г. (2000). *Идентификация сортов и регистрация генофонда культурных растений по белкам семян*. СПб: «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова».
- Красильников, В. Н., Мехтиев, В. С., Доморощенкова, М. Л., Демьяненко, Т. Ф., Гаврилюк И.П., & Кузнецова, Л.И. (2010). Перспективы использования белков из семян люпина узколистного отечественной селекции в безглютеновых мучных кондитерских изделиях. *Пищевая промышленность*, (2), 40–43.
- Красильников, В. Н., Мехтиев, В. С., & Родионова, Т. И. (2019). *Способ снижения алкалоидов в зерне люпина* [Патент РФ № 2698899]. Российская Федерация.
- Красильников, В.Н., Мехтиев, В.С., Тимошенко, Ю.А., & Маркина, В.Ю. (2015). Люпин: создание продуктов питания функционального назначения, вклад в обеспечение продовольственной безопасности страны. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (10), 43–49.
- Красильников, В.Н., Севастьянова, Ю.Д., Мехтиев, В.С., & Родионова, Т.И. (2016). Переработка сои перспективными методами для пищевых целей. *Материалы научной конференции* (с. 71–74). СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет.
- Кублин, И. М., Прущак, О. В. & Санинский, С. А. (2024). Люпин: переворот в производстве белковых кормов для сельскохозяйственной отрасли. *Аграрный научный журнал*, (6), 32–39. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp32-39>
- Купцов, Н. С., & Такунов, И. П. (2006). *Люпин — генетика, селекция, гетерогенные посевы*. Клинцы: ГУП «КГТ».
- Мехтиев, В.С. (2017). Зерно люпина как перспективный источник пищевых ингредиентов функционального назначения. *Бизнес пищевых ингредиентов*, (2), 50–51.
- Николаев, С. И., Даниленко, И. Ю., Карапетян, А. К., & Бубуёк, А. В. (2024). Сравнительная оценка химического и аминокислотного состава полножирной сои и зерна люпина. *Известия НВ АУК*, 5(77), 196–201. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-05-21>

- Панкина, И. А. & Борисова, Л. М. (2015). Исследование алкалоидности семян люпина. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, (4), 80–87.
- Потаракина, О. В. (2022). Ультразвук в технологии переработки люпина кормового. *Научный журнал молодых ученых*, (1), 18–23.
- Романчук, И. Ю. & Анохина, В. С. (2018). Алкалоиды люпина: строение, биосинтез, генетика (обзорная статья). *Молекулярная и прикладная генетика*, 25, 109–123.
- Руцкая, В. И. & Тимошенко, Е. С. (2023). Алкалоиды люпина и способы снижения их содержания (Обзор). *Известия НВ АУК*, 3(71), 573–584. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-56>
- Тимошенко, Е. С., Лукашевич, М. И., Яговенко, Г. Л., Агеева, П. А. & Зайцева, Н. М. (2022). Характеристика перспективных сортов люпина Мичуринский и Белорозовый 144 для пищевого использования». *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 219–232. <https://doi.org/10.36107/10.36107/spfp.2022.310>
- Хрулев, А.А. & Бесчетникова, Н.А. (2015). Белок из люпина: технологии, применение, перспективы. *Пищевая промышленность*, (12), 63–65.
- Aguilar-Acosta, L. A., Serna-Saldivar, S. O., Rodríguez-Rodríguez, J., Es-calante-Aburto, A., & Chuck-Hernández, C. (2020). Effect of ultrasound application on protein yield and fate of alkaloids during lupin alkaline extraction process. *Biomolecules*, 10(2), 292. <https://doi.org/10.3390/biom10020292>
- Adiss, Y. L., Ayalew, D. B., & Abera, B. D. (2025). Effects of roasting temperature and soaking time on the physico-chemical quality of white lupine (*Lupinus albus L.*) flour. *Journal of Composition and Analysis*, 148, 108183 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108183>
- Arnoldi, A., & Greco, S. (2011). Nutritional and nutraceutical characteristics of lupin protein. *NUTRA Foods*, 10(4), 23–29. <https://doi.org/10.1007/BF03223356>
- Chamone, M.E.R., Ascheri, J.L.R., Vargas-Solórzano, J.W., Stephan, M.P., & Carvalho, C.W. (2023). Chemical characterization of White Lupin (*Lupinus albus*) flour treated by extrusion cooking and aqueous debittering processes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, 292–298. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01050-0>
- Domuta, C L.C., Man, S., Chis, S., Pop, A., Muste, S., & Paucean A. (2022). Lupin – A review of the chemical composition, health benefits and its uses in bakery and pastry products. *Journal of Functional Foods*, 18, 550–563. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.08.012>
- Dourmap, C., Fustec, J., Naudin. Ch., & Carton, N. (2025). White lupin: Improving legume-based protein production via intercropping. *Journal of Experimental Botany*, 76(10). <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf127>
- Estivi, L., Buratti, S., Fusi, D., Benedetti, S., Rodríguez, G., Brandolini, A., & Hidalgo, A. (2022). Alkaloid content and taste profile assessed by electronic tongue of lupinus albus seeds debittered by different methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 114, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104810>
- Frick, K. M., Kamphuis, L. G., Siddique, K. H., Karen M., Singh, K. B., & Foley, R. C. (2017). Quinolizidine alkaloid biosynthesis in lupins and prospects for grain quality improvement. *Frontiers in Plant Science*, 8(87), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00087>
- Habtemariam, A., Woldetsadik, A., & Belay, A. (2019) Analyze production, utilization and its future trends of lupin in Ethiopia. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 1797–1812. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2019.1010127>
- Mancinotti, D., Frick, K.M., & Geu-Flores, F. (2022). Biosynthesis of quinolizidine alkaloids in lupins: mechanistic considerations and prospects for pathway elucidation. *The Royal Society of Chemistry*, 39, 1423–1437 <https://doi.org/10.1039/d1np00069a>
- Pereira, A., Ramos, F., & Silva, A. S. (2022). Lupin (*Lupinus albus L.*) seeds: Balancing the Good and the bad and addressing future challenges. *Molecules*, 27(23). <https://doi.org/10.3390/molecules27238557>
- Rababah, T., Al Udatt, M., & Angor, M. (2023) Nutraceutical and functional properties of lupin protein extracts obtained via a combined ultrasonication and microwave-assisted. *Process*, 11, 2858. <https://doi.org/10.3390/pr11102858>

- Ruiz-López, M.A., Barrientos-Ramírez, L., García-López, P.M., Valdés-Miramontes E.H., & Zamora-Natera J.F. (2019). Nutritional and bioactive compounds in mexican lupin beans species: A mini-review. *Nutrients*, 11(8), 1785; <https://doi.org/10.3390/nu11081785>
- Samtiya, M., Aluko, R.E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Tei, A., & Wink, M. (1999). Isolation and identification of quinolizidine alkaloids in lupins by GLC-MS. In *Lupin, an Ancient Crop for the New Millennium: Proceedings of the 9th International Lupin Conference, Klink/Muritz, Germany, 20–24 June*. International Lupin Association.
- Vollmannova, A., Lidikova, J., Musilova, J., Snirc, M., Bojnanska, T., Urminska, D., Tirdilova, I., & Zetochova, E. (2021). White lupin as a promising source of antioxidant phenolics for functional food production. *Journal of Food Quality*, Article 5512236. <https://doi.org/10.1155/2021/5512236>

## REFERENCES

- Agafonova, S. V., Rykov, A. I., & Mezenova, O. Ya. (2019). Evaluation of biological value of lupine proteins and prospects for its use in the food industry. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, (2), 79–85. (In Russ.)
- Afonina E. V., & Kostyuchenko V. I. Changes in the content of alkaloids in lupine cereals after extraction. *Kormoproizvodstvo*, 5, 47–48. (In Russ.)
- Vaschekin E.P. (2009). Improving the usefulness of cattle. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*, 6, 10–16. (In Russ.)
- Golovchenko, V. I., Kucherenko, V. G., Kucherenko, N. M., Golovchenko, O. V., & Sedleckij, M. A. (1996). *Method for obtaining a semi-finished product from lupine for food products* (Russian Federation Patent No. RU 2059388 C1). Rospatent. (In Russ.)
- Domoroschenkova, M. L., Eggi, E. E., Mekhtiev, V. S., & Demyanenko, T. F. (2009). Narrow-leaved lupine – a promising source of food protein. *Storage and Processing of Farm Products*, (10), 53–56. (In Russ.)
- Zajceva, L. V., Yudina, T. A., Ruban, N. V., Bessonov, V. V., & Mekhtiev, V.S. (2020). Modern approaches to developing recipes for gluten-free bakery products. *Voprosy Pitaniya [Problems of Nutrition]*, 89(1), 77–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10009>
- Zverev, S. V., Kosolapov, V. M., Zajcev, V. B., Stavcev, A. E., & Cygutkin, A. S. (2020). Using spectrophotometry to identify highly alkaloid white lupine seeds. *Kormoproizvodstvo*, (10), 25–28. (In Russ.)
- Zverev, S.V., & Razmochaev, E.A. (2023). *White lupine. Processing and use in the national economy*. Tver: JSC «GK MELKOM». (In Russ.)
- Kadyrov, F. G., & Kadyrova, N. V. (2001). Lupine grain in feeding cattle and young pigs. *Kormoproizvodstvo*, (1), 26–28. (In Russ.)
- Konarev, V. G. (2000). *Identification of varieties and registration of the gene pool of cultivated plants by seed proteins*. St. Petersburg: N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. (In Russ.)
- Krasilnikov, V. N., Mekhtiev, V. S., Domoroschenkova, M. L., Demyanenko, T. F., Gavrilyuk, I. P., & Kuznetsova L. I. (2010). Prospects for the use of proteins from the seeds of narrow-leaved lupine of domestic selection in gluten-free flour confectionery products. *Food Industry*, (2), 40–43. (In Russ.)
- Krasilnikov, V. N., Mekhtiev, V. S., & Rodionova, T. I. (2019). *Method for reducing alkaloids in lupine grain* (Russian Federation Patent No. RU 2698899). Rospatent. (In Russ.)
- Krasilnikov, V.N., Mekhtiev, V.S., Timoshenko, Yu.A., & Markina, V.Yu. (2015). Lupine: creation of functional food products, contribution to ensuring food security of the country. *Storage and Processing of Farm Products*, (10), 43–49. (In Russ.)

- Krasil'nikov, V.N., Sevast'yanova YU.D., Mekhtiev V.S., & Rodionova, T.I. (2016). Processing of soybeans by promising methods for food purposes. *Proceedings of the scientific conference with international participation at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University* (pp. 71–74). St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University. (In Russ.)
- Kublin, I. M., Prushchak, O. V., & Saninskij, S. A. (2024). Lupine: A revolution in protein feed production for the agricultural sector. *Agrarian Scientific Journal*, (6), 32–39. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp32-39>
- Kupcov, N. S., & Takunov, I. P. (2006). *Lupin — genetics, breeding and heterogeneous crops*. Klintcy: GUP «KGT». (In Russ.)
- Mekhtiev, V.S. (2017). Lupine grain as a promising source of functional food ingredients. *BFood Ingredients Business*, (2), 50–51. (In Russ.)
- Nikolaev, S. I., Danilenko, I. Yu., Karapetyan, A. K., & Bubuèk, A. V. (2024). Comparative assessment of chemical and amino acid composition of full-fat soybeans and lupine grain. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*, 5(77), 196–201. (In Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-05-21>
- Pankina, I. A., & Borisova, L. M. (2015). Study of alkaloid content of lupine seeds. *Scientific journal of NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*, (4), 80–87. (In Russ.)
- Potarakina, O. V. (2022). Ultrasound in forage lupine processing technology. *Scientific Journal of Young Scientists*, (1), 18–23. (In Russ.)
- Romanchuk, I. Yu., & Anohina, V. S. (2018). Lupine alkaloids: Structure, biosynthesis, genetics (review article). *Molecular and Applied Genetics*, 25, 109–123. (In Russ.)
- Rutskaya, V. I., & Timoshenko, E. S. (2023). Lupine alkaloids and methods for reducing their content (Review). *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*, 3(71), 573–584. (In Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-56>
- Timoshenko, E. S., Lukashevich, M. I., Yagovenko, G. L., Ageeva, P. A., & Zaitseva N. M. (2022). Characteristics of promising lupine varieties Michurinsky and Belorozovy 144 for food use. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 219–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/10.36107/spfp.2022.310>
- Khrulev, A.A., & Beschetskova, N.A. (2015). Lupine protein: Technologies, application, prospects. *Food Industry*, (12), 63–65. (In Russ.)
- Aguilar-Acosta, L. A., Serna-Saldivar, S. O., Rodríguez-Rodríguez, J., Es-calante-Aburto, A., & Chuck-Hernández, C. (2020). Effect of ultrasound application on protein yield and fate of alkaloids during lupin alkaline extraction process. *Biomolecules*, 10(2), 292. <https://doi.org/10.3390/biom10020292>
- Adiss, Y. L., Ayalew, D. B., & Abera, B. D. (2025). Effects of roasting temperature and soaking time on the physico-chemical quality of white lupine (*Lupinus albus L.*) flour. *Journal of Composition and Analysis*, 148, 108183 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108183>
- Arnoldi, A., & Greco, S. (2011). Nutritional and nutraceutical characteristics of lupin protein. *NUTRA Foods*, 10(4), 23–29. <https://doi.org/10.1007/BF03223356>
- Chamone, M.E.R., Ascheri, J.L.R., Vargas-Solórzano, J.W., Stephan, M.P., & Carvalho, C.W. (2023). Chemical characterization of White Lupin (*Lupinus albus*) flour treated by extrusion cooking and aqueous debittering processes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, 292–298. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01050-0>
- Domuta, C L.C., Man, S., Chis, S., Pop, A., Muste, S., & Paucean A. (2022). Lupin — A review of the chemical composition, health benefits and its uses in bakery and pastry products. *Journal of Functional Foods*, 18, 550–563. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.08.012>
- Dourmap, C., Fustec, J., Naudin. Ch., & Carton, N. (2025). White lupin: Improving legume-based protein production via intercropping. *Journal of Experimental Botany*, 76(10). <https://doi.org/10.1093/jxb/erf127>
- Estivi, L., Buratti, S., Fusi, D., Benedetti, S., Rodríguez, G., Brandolini, A., & Hidalgo, A. (2022). Alkaloid content and taste profile assessed by electronic tongue of lupinus albus seeds debittered by different methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 114, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104810>

- Frick, K. M., Kamphuis, L. G., Siddique, K. H., Karen M., Singh, K. B., & Foley, R. C. (2017). Quinolizidine alkaloid biosynthesis in lupins and prospects for grain quality improvement. *Frontiers in Plant Science*, 8(87), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00087>
- Habtemariam, A., Woldetsadik, A., & Belay, A. (2019) Analyze production, utilization and its future trends of lupin in Ethiopia. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 1797–1812. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2019.1010127>
- Mancinotti, D., Frick, K.M., & Geu-Flores, F. (2022). Biosynthesis of quinolizidine alkaloids in lupins: mechanistic considerations and prospects for pathway elucidation. *The Royal Society of Chemistry*, 39, 1423–1437 <https://doi.org/10.1039/d1np00069a>
- Pereira, A., Ramos, F., & Silva, A. S. (2022). Lupin (*Lupinus albus L.*) seeds: Balancing the Good and the bad and addressing future challenges. *Molecules*, 27(23). <https://doi.org/10.3390/molecules27238557>
- Rababah, T., Al Udatt, M., & Angor, M. (2023) Nutraceutical and functional properties of lupin protein extracts obtained via a combined ultrasonication and microwave-assisted. *Process*, 11, 2858. <https://doi.org/10.3390/pr11102858>
- Ruiz-López, M.A., Barrientos-Ramírez, L., García-López, P.M., Valdés-Miramontes E.H., & Zamora-Natera J.F. (2019). Nutritional and bioactive compounds in mexican lupin beans species: A mini-review. *Nutrients*, 11(8), 1785; <https://doi.org/10.3390/nu11081785>
- Samtiya, M., Aluko, R.E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: An overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Tei, A., & Wink, M. (1999). Isolation and identification of quinolizidine alkaloids in lupins by GLC-MS. In *Lupin, an Ancient Crop for the New Millennium: Proceedings of the 9th International Lupin Conference, Klink/Muritz, Germany, 20–24 June*. International Lupin Association.
- Vollmannova, A., Lidikova, J., Musilova, J., Snirc, M., Bojnanska, T., Urminska, D., Tirdilova, I., & Zetochova, E. (2021). White lupin as a promising source of antioxidant phenolics for functional food production. *Journal of Food Quality*, Article 5512236. <https://doi.org/10.1155/2021/5512236>

## ОБ АВТОРАХ

**Красильников Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, академик Международной Академии холода (МАХ), директор по научной деятельности ООО «ПРОТЕИН ПЛЮС» (199004, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 5-я линия В.О., д.54, литер А, пом. 10Н), SPIN-код:1074-3601, [ValeryKrasilnikov@lecithin.ru](mailto:ValeryKrasilnikov@lecithin.ru).

**Мехтиев Вадим Сейдуллаевич**, кандидат технических наук, специалист по информационно-коммуникационным технологиям (ИКТ), менеджер по проектам ООО «ПРОТЕИН ПЛЮС», (199004, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 5-я линия В.О., д.54, литер А, пом. 10Н), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2133-6024>, SPIN-код: 7028-5185, [vadim.dag@mail.ru](mailto:vadim.dag@mail.ru), [VadimMekhhtiev@lecithin.ru](mailto:VadimMekhhtiev@lecithin.ru)

**Афони́на Елена Викторовна**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ВНИИ люпина – филиала ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса», (241524, Российская Федерация, Брянская область, Брянский район, п. Мичуринский, ул. Березовая 2) SPIN-код: 7403-1724, [af0804@yandex.ru](mailto:af0804@yandex.ru).

**Тимошенко Елена Сергеевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ВНИИ люпина – филиала ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса», (241524, Российская Федерация, Брянская область, Брянский район, п. Мичуринский, ул. Березовая 2) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0283-8785>, SPIN-код: 3260-2533, [el.timo32@mail.ru](mailto:el.timo32@mail.ru).

**Торопова Мария Евгеньевна**, Главный Технолог ООО «Гамма Маркет» (192102 Россия, Санкт-Петербург пр. Обуховской обороны, д. 45), [Toropova71@mail.ru](mailto:Toropova71@mail.ru)

**Родионова Татьяна Ивановна**, директор филиала в Краснодарском крае ООО «АТЛАНТ АГРО», (352360, Краснодарский край, Тбилисский район. ст. Тбилисская, ул. Западная, 15, офис 10), [t.rodionova@agroprod.ru](mailto:t.rodionova@agroprod.ru)

## ABOUT THE AUTHORS

**Krasilnikov Valery Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences (Food Biotechnology), Professor, Academician of the International Academy of Refrigeration (IAR), Director of Research, PROTEIN PLUS Co. LTd (199004, Russian Federation, St. Petersburg, 5th Line V.I., Building 54, Letter A, Room 10N), SPIN-код:1074-3601, ValeryKrasilnikov@lecithin.ru

**Mekhtiev Vadim Seydullaevich**, Candidate (PhD) in Technical Sciences (Food Biotechnology), Information and Communications Technology (ICT) Specialist, Project Manager, PROTEIN PLUS Co. LTd (199004, Russian Federation, St. Petersburg, 5th Line V.I., Building 54, Letter A, Room 10N), 7028-5185, vadim.dag@mail.ru, VadimMekhtiev@lecithin.ru.

**Afonina Elena Viktorovna**, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher The All-Russian Research Institute of Lupin – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (241524, Russian Federation, Bryansk District, Bryansk Region, p/o Michurinsky, Berezovaj street, 2), SPIN-код: 7403-1724, af0804@yandex.ru.

**Timoshenko Elena Sergeevna**, Cand. Sc. (Agriculture), Leading Researcher The All-Russian Research Institute of Lupin – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (241524, Russian Federation, Bryansk District, Bryansk Region, p/o Michurinsky, Berezovaj street, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0283-8785>, SPIN-код: 3260-2533, eI.timo32@mail.ru.

**Toropova Mariya Evgenievna**, Chief Technolodgist of Gamma Market LLC (192102, Russian Federation, St. Petersburg, pr. Obukhovskaya Oborona Ave., 45), Toropova71@mail.ru

**Rodionova Tatyana Ivanovna**, director of the branch in the Krasnodar region of ATLANT AGRO LLC, (352360, Krasnodar region, Tbilisi district. Tbilisskaya station, Zapadnaya st., 15, office 10), t.rodionova@agroprod.ru