

УДК 664.641.2:577.152.3

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-179-187>

EDN NEFNGT



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Ферментативное дегликозилирование соевых белков как способ повышения эффективности их гидролиза

В.Н. Леонтьев[✉], О.И. Лазовская

Белорусский государственный технологический университет, Минск, 220006 Республика Беларусь

[✉] Автор для переписки, e-mail: leontiev@belstu.by

Аннотация

Цели. В настоящее время гидролизаты соевых белков находят широкое применение в пищевой промышленности, медицине, рыбоводстве, птицеводстве и животноводстве. Наиболее эффективным способом их получения является ферментативный гидролиз. Однако даже при оптимальных параметрах протеолиза не всегда возможно достичь требуемой степени гидролиза, поэтому для более интенсивного расщепления соевых белков используют различные технологические подходы: внесение нескольких ферментных препаратов и предварительную обработку белкового субстрата. β -Конглицинин — один из основных белков сои — представляет собой гликопротеин, углеводная часть которого состоит преимущественно из маннозных остатков. Предполагаем, что дегликозилирование β -конглицинина ферментным препаратом с маннаназной активностью в качестве предварительной обработки соевого субстрата приведет к изменению структуры его белковой части за счет разрушения углеводного компонента и позволит повысить доступность пептидных связей к действию протеолитических ферментов. Таким образом, целью работы является изучение влияния ферментативного дегликозилирования на эффективность гидролиза соевых белков.

Методы. Дегликозилирование β -конглицинина, гидролиз полисахаридов и липидов проводили ферментным препаратом «Комплекс-концентрат» (ООО «Фермент», Республика Беларусь). Гидролиз белков осуществляли ферментным препаратом «Протозим С330» (ООО «Фермент», Республика Беларусь). Образование редуцирующих сахаров подтверждали методом Миллера. Степень гидролиза белков определяли рН-статическим методом. Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций анализировали методом жидкостной гель-хроматографии низкого давления на колонке с гелем Sephadex® G-50 Medium. Компьютерную обработку профиля элюирования пептидных фракций выполняли в программе OriginPro 8.5.1 с помощью функции Гаусса.

Результаты. Установлено, что обработка соевой муки ферментным препаратом «Комплекс-концентрат» (фермент-субстратное соотношение 1 : 40, гидромодуль 1 : 10) способствует расщеплению как свободных олиго- и полисахаридов, так и углеводного компонента β -конглицинина. Протеолиз ферментным препаратом «Протозим С330» (фермент-субстратное соотношение 1 : 20, рН 7.5, 50°C, 3.5 ч) после 20-часового дегликозилирования приводит к получению продукта со степенью гидролиза 56.3%. При этом содержание низкомолекулярных пептидов в соевом гидролизате составляет 83.9%. Показано, что протеолиз без ферментативного разрушения углеводной части β -конглицинина характеризуется степенью гидролиза 9.2%.

Выводы. Применение ферментативного дегликозилирования β -конглицинина в качестве предварительной обработки позволяет существенно повысить степень гидролиза соевых белков.

Ключевые слова

соевая мука, ферментный препарат с маннаназной активностью, дегликозилирование β -конглицинина, протеолиз, степень гидролиза, низкомолекулярные пептиды, гель-хроматография

Поступила: 22.05.2025

Доработана: 03.12.2025

Принята в печать: 13.02.2026

Для цитирования

Леонтьев В.Н., Лазовская О.И. Ферментативное дегликозилирование соевых белков как способ повышения эффективности их гидролиза. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(2):179–187. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-179-187>

RESEARCH ARTICLE

Enzymatic deglycosylation of soy proteins as a method to increase the efficiency of their hydrolysis

Viktor N. Leontiev✉, Olesya I. Lazovskaya

Belarusian State Technological University, Minsk, 220006 Republic of Belarus

✉ Corresponding author, e-mail: leontiev@belstu.by

Abstract

Objectives. Soy protein hydrolysates are now widely used in the food industry, fish farming, poultry farming, livestock farming, as well as in medical preparations. The most effective method for their production is enzymatic hydrolysis. However, even with optimal proteolysis parameters, it is not always possible to achieve the required degree of hydrolysis. For this reason, various technological approaches are used to more intensively break down soy proteins, including the addition of enzyme preparations and pretreatment of the protein substrate. β -Conglycinin, one of the main soy proteins, is a glycoprotein whose carbohydrate portion consists primarily of mannose residues. We hypothesize that deglycosylation of β -conglycinin by an enzyme preparation with mannanase activity as a pretreatment of the soy substrate will lead to change in the structure of its protein portion due to the destruction of the carbohydrate component to increase the accessibility of peptide bonds to proteolytic enzymes. Thus, the work sets out to study the effect of enzymatic deglycosylation on the efficiency of soy protein hydrolysis.

Methods. Deglycosylation of β -conglycinin, hydrolysis of polysaccharides and lipids were performed by the Complex-concentrate enzyme preparation (*Ferment*, Republic of Belarus). Protein hydrolysis was carried out by the Protozyme C330 enzyme preparation (*Ferment*, Republic of Belarus). The formation of reducing sugars was confirmed by the Miller method. The degree of protein hydrolysis was determined by the pH-stat method. The molecular weight distribution of peptide fractions was analyzed by low-pressure liquid gel chromatography on a column with Sephadex[®] G-50 Medium. Computer processing of the elution profile of peptide fractions was performed in the OriginPro 8.5.1 program using the Gauss function.

Results. It is established that the treatment of soy flour by the Complex-concentrate enzyme preparation (enzyme-substrate ratio 1 : 40, hydromodule 1 : 10) promotes the breakdown of both free oligo- and polysaccharides, as well as the carbohydrate component β -conglycinin. Proteolysis by the Protozyme C330 enzyme preparation (enzyme-substrate ratio 1 : 20, pH 7.5, 50°C, 3.5 h) carried out following 20 h of deglycosylation results in a product with a degree of hydrolysis of 56.3%. The content of low-molecular-weight peptides in soy hydrolysate is 83.9%. Proteolysis without enzymatic destruction of the carbohydrate part of β -conglycinin is shown to be characterized by a degree of hydrolysis of 9.2%.

Conclusions. A pretreatment approach involving deglycosylation of enzymatic β -conglycinin can be used to significantly increase the degree of hydrolysis of soy proteins.

Keywords

soy flour, enzyme preparation with mannanase activity, deglycosylation of β -conglycinin, proteolysis, degree of hydrolysis, low-molecular-weight peptides, gel chromatography

Submitted: 22.05.2025

Revised: 03.12.2025

Accepted: 13.02.2026

For citation

Leontiev V.N., Lazovskaya O.I. Enzymatic deglycosylation of soy proteins as a method to increase the efficiency of their hydrolysis. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(2):179–187. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-179-187>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время гидролизаты соевых белков, обладающие антиоксидантными, гипотензивными, иммуномодулирующими, антимикробными, противовоспалительными и другими свойствами, находят

широкое применение в пищевой промышленности [1], медицине [2], рыбоводстве [3], птицеводстве [4] и животноводстве [5]. Белки сои по биологической ценности близки к белкам мяса и молока и богаты незаменимыми аминокислотами, особенно лизином, лимитированным в других растительных

белках. Около 70% соевых белков представлены запасными белками глицинином и β -конглицинином. Глицинин состоит из основного полипептида В с молекулярной массой около 20 кДа и кислого полипептида А с молекулярной массой около 38 кДа, соединенных дисульфидной связью и образующих индивидуальную субъединицу АВ. Четвертичная структура глицинина зависит от рН и ионной силы растворов. При умеренных температурах и нейтральных значениях рН глицинин образует гексамерные комплексы с молекулярной массой от 320 до 375 кДа, состоящие из гетерогенных субъединиц. Каждый гексамер содержит около 2 свободных SH-групп и 18–20 дисульфидных связей. β -Конглицинин с молекулярной массой 150–180 кДа является тримерным гликопротеином, состоящим из 3 субъединиц: α (72–76 кДа), α' (68–72 кДа) и β (52–53 кДа), которые образуют 7 изомеров. Субъединицы связаны преимущественно гидрофобными взаимодействиями или водородными связями и не содержат свободных SH-групп [6]. Углеводная часть одной молекулы β -конглицинина состоит из 38 маннозных и 12 глюкозаминных остатков [7].

Наиболее эффективным способом получения белковых гидролизатов является ферментативный

гидролиз, который позволяет избирательно разрывать пептидные связи благодаря специфичности протеолитических ферментов. В табл. 1 приведены параметры гидролиза соевых белков с применением некоторых ферментных препаратов [8–13]. Для более интенсивного расщепления белков используют двухстадийный процесс гидролиза. Так, в работе [9] показано, что последовательное применение алкалазы и флавозима позволяет в два раза увеличить степень гидролиза белков соевого изолята по сравнению с одностадийным процессом протеолиза под действием алкалазы. Кроме того, существенному повышению эффективности ферментативного гидролиза способствует предварительная обработка белкового субстрата [14–16] (табл. 2).

Авторами работы [17] показано, что углеводный компонент β -конглицинина обладает выраженной IgE-реактивностью и обуславливает аллергенные свойства соевых белков. При этом установлено [18], что дегликозилирование β -конглицинина пептид-N-гликозидазой F не только снижает его антигенность по сравнению с нативным гликопротеином, но и приводит к значительным изменениям вторичной и третичной структуры белковой части.

Таблица 1. Параметры ферментативного гидролиза соевых белков

Table 1. Parameters of enzymatic hydrolysis of soy proteins

Субстрат Substrate	Ферментный препарат Enzyme preparation	Условия гидролиза Hydrolysis conditions				Степень гидролиза Degree of hydrolysis		Источник Reference
		ФСС** E : S ratio**	рН	t , °С	τ , ч τ , h	%	Метод определения Method for determining	
Одностадийный процесс / One-step process								
Соевый изолят* Soy protein isolate*	Пепсин Pepsin	1 : 20	1.6	39	5	60.5	Метод формального титрования	[8]
	Трипсин Trypsin	1 : 30	7.8	39	5	55.7	Formol titration method	
Соевый концентрат* Soy protein concentrate*	Алкалаза Alcalase	4%	8.0	55	3	14.5	рН-статический метод и метод с 2,4,6-тринитробензол-сульфоновой кислотой pH-stat method and 2,4,6-trinitrobenzenesulfonic acid method	[9]
	Папаин Papain	4%	8.0	50	1.5	14.5		
	Нейтраза Neutrase	4%	7.0	45	1.25	7.2		
Соевый изолят Soy protein isolate	Алкалаза Alcalase	1%	8.0	50	3	8.0	Метод с <i>o</i> -фталевым альдегидом <i>o</i> -Phthalaldehyde method	[10]
	Флавозим Flavourzyme	1%	7.0	50	3	10.0		
Соевый изолят Soy protein isolate	Флавозим Flavourzyme	8%	7.0	55	4	57.0	Биуретовый метод Biuret method	[11]

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

Субстрат Substrate	Ферментный препарат Enzyme preparation	Условия гидролиза Hydrolysis conditions				Степень гидролиза Degree of hydrolysis		Источник Reference
		ФСС** E : S ratio**	pH	t, °C	τ, ч τ, h	%	Метод определения Method for determining	
Соевая мука* Soy flour*	Алкалаза Alcalase	–	8.0	40	8	35.1	Нингидриновый метод Ninhydrin method	[12]
	Флавозим Flavourzyme	–	8.0	40	8	39.5		
	Новозим Novozym	–	8.0	40	8	33.3		
Двухстадийный процесс / Two-step process								
Соевый изолят Soy protein isolate	Пепсин Pepsin	1 : 20	1.6	39	8	88.2	Метод формольного титрования Formol titration method	[8]
	Трипсин Trypsin	1 : 20	7.8					
Соевый концентрат Soy protein concentrate	Алкалаза Alcalase	4%	7.0	50	2.5	30.0	pH-статический метод и метод с 2,4,6-тринитробензол-сульфоновой кислотой pH-stat method and 2,4,6-trinitrobenzenesulfonic acid method	[9]
	Флавозим Flavourzyme	4%						
	Нейтраза Neutrase	4%	7.0	50	2.75	14.0		
	Флавозим Flavourzyme	4%						

* Соевая мука содержит 50% белка в пересчете на сухое вещество, соевый концентрат — более 65% белка, соевый изолят — более 90% белка / Soy flour contains 50% protein on a dry matter basis, soy protein concentrate contains more than 65% protein, soy protein isolate contains more than 90% protein [13].

** ФСС — фермент-субстратное соотношение / E : S ratio is the enzyme-substrate ratio.

Таблица 2. Влияние предварительной обработки соевого изолята на степень гидролиза

Table 2. Effect of pretreatment of soy protein isolate on the degree of hydrolysis

Предварительная обработка Pretreatment	Ферментный препарат Enzyme preparation	Условия гидролиза Hydrolysis conditions				Степень гидролиза Degree of hydrolysis		Источник Reference
		ФСС E : S ratio	pH	t, °C	τ, ч τ, h	%	Метод определения Method for determining	
–	Папаин Papain	0.5%	7.0	55	3	0.9	pH-статический метод pH-stat method	[14]
Ультразвуковая обработка 600 Вт Ultrasound pretreatment 600 W						1.86		
–	Панкреатин Pancreatin	2%	7.0	55	3	9.6	pH-статический метод pH-stat method	[15]
Экструзионная обработка Extrusion pretreatment						16.4		
–	Бромелаин Bromelain	1 : 20	7.0	55	3	13.7	Метод формольного титрования Formol titration method	[16]
Термическая обработка 90°C, 10 мин Thermal pretreatment 90°C, 10 min						16.9		
Гомогенизация высоким давлением 30 МПа High-pressure homogenization 30 MPa						23.5		

Исходя из этого, предполагаем, что использование ферментативного дегликозилирования в качестве предварительной обработки соевого субстрата позволит разрушить углеводную часть β -конглицинина и повысить доступность пептидных связей к действию протеолитических ферментов. Следует отметить, что предлагаемый подход предварительного дегликозилирования соевых белков для увеличения выхода низкомолекулярных пептидов в литературе не описан.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния ферментативного дегликозилирования на эффективность гидролиза соевых белков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали обезжиренную соевую муку (содержание белка — 48%, жира — 1%, углеводов — 35%; ООО «Иркутский масложиркомбинат», Россия), ферментный препарат «Протозим С330» на основе нейтральной протеазы (≥ 250 ед/г, 30–50°C, pH 6.0–7.5; ООО «Фермент», Республика Беларусь), ферментный препарат на основе щелочной протеазы (204324 ед/г, 40–50°C, pH 9.0–11.0; Beijing Donghua Qiangsheng Biotechnology Co., Китай) и ферментный препарат «Комплекс-концентрат», обладающий целлюлазной (1452 ед/г), ксиланазной (21256 ед/г), β -глюканазной (16415 ед/г), пектиназной (2152 ед/г), фитазной (1550 ед/г), маннаназной (10586 ед/г) и липазной (1080 ед/г) активностью (ООО «Фермент», Республика Беларусь).

Дегликозилирование β -конглицинина, гидролиз полисахаридов и липидов проводили ферментным препаратом «Комплекс-концентрат» при ФСС 1 : 40 и гидромодуле соевая мука : очищенная вода = 1 : 10 в течение 20 ч. Гидролиз белков осуществляли протеолитическим ферментным препаратом при ФСС 1 : 20 и pH 7.5. По окончании протеолиза фермент инактивировали при температуре 100°C в течение 10 мин.

Степень гидролиза белков определяли pH-статическим методом [19]. Значение pH реакционной среды контролировали с помощью pH-метра HI 83141 (Hanna, Германия). Постоянство pH поддерживали путем добавления 1 М раствора гидроксида натрия.

Степень гидролиза (CG, %) белков рассчитывали по формуле:

$$CG = V \cdot N \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{h} \cdot 100, \quad (1)$$

где V — объем раствора гидроксида натрия, добавленного в ходе гидролиза, мл; N — молярная концентрация гидроксида натрия, моль/л; m — масса белка, г;

h — количество пептидных связей в 1 г соевых белков, $h = 7.8$ ммоль/г; α — степень диссоциации α -аминогрупп при pH гидролиза:

$$\alpha = \frac{10^{(pH-pK)}}{1 + 10^{(pH-pK)}}. \quad (2)$$

При этом pK образующихся α -аминогрупп зависит от температуры гидролиза T в градусах Кельвина следующим образом:

$$pK = 7.8 + \frac{(298 - T)}{(298 \cdot T)} \cdot 2400. \quad (3)$$

Определение редуцирующих сахаров проводили по методу Миллера [20] с некоторыми изменениями. Суть метода заключается в том, что при взаимодействии редуцирующих сахаров с 3,5-динитросалициловой кислотой последняя восстанавливается в 3-амино-5-нитросалициловую кислоту, имеющую желто-оранжевую окраску.

В пробирку к 0.5 мл гидролизата углеводов добавляли 1.5 мл динитросалицилового реактива и 1.0 мл дистиллированной воды. Пробирку закрывали ватной пробкой и помещали в кипящую водяную баню на 15 мин. Затем пробирку охлаждали до 20°C и для стабилизации окраски приливали 0.5 мл 40%-ного раствора сегнетовой соли. Оптическую плотность раствора измеряли при 582 нм на спектрофотометре Specord 200 Plus (Analytik Jena, Германия) против контрольной пробы. Согласно закону Бугера–Ламберта–Бера оптическая плотность пропорциональна концентрации редуцирующих сахаров. Для приготовления динитросалицилового реактива взвешивали 1 г 3,5-динитросалициловой кислоты, 1 г гидроксида натрия, 0.05 г сульфата натрия, 0.2 г фенола и растворяли в дистиллированной воде при непрерывном перемешивании, доводя объем раствора до 100 мл.

Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций анализировали методом жидкостной гель-хроматографии низкого давления в стеклянной колонке 1.8 × 35 см с гелем Sephadex® G-50 Medium (область разделения 1.5–30 кДа; Pharmacia Fine Chemicals, Швеция), предварительно откалиброванной по стандартным веществам (рис. 1): трипсину (24 кДа; Sigma-Aldrich, США), цитохрому С (12.3 кДа; Serva Fein Biochemica, Германия), витамину В₁₂ (1.36 кДа; Sigma-Aldrich, США). Свободный объем колонки, который составил 32.5 ± 0.1 мл, определяли по объему элюирования голубого декстрана 2000 (2000 кДа; Sigma-Aldrich, США). Перед нанесением на колонку раствор гидролизата фильтровали через мембранный фильтр (размер пор 0.2 мкм; Agilent Technologies, США). В качестве элюента использовали 0.025 М трис-НСl буферный раствор (pH 8.0). Детектирование осуществляли при 280 нм.

Построение графиков выполняли в программе Microsoft Office Excel 2010. Компьютерную обработку профиля элюирования пептидных фракций осуществляли в программе OriginPro 8.5.1 с помощью функции Гаусса.

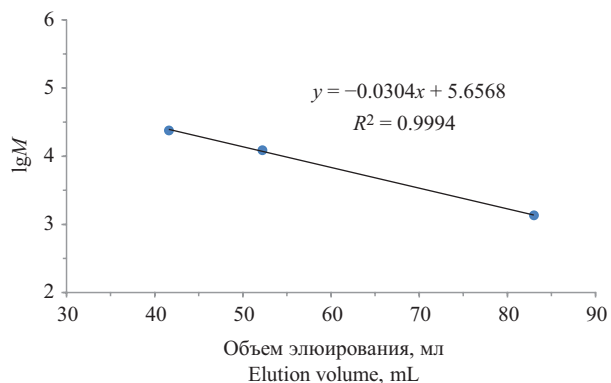


Рис. 1. Калибровочный график для колонки с гелем Sephadex® G-50 Medium. *M* — молекулярная масса

Fig. 1. Calibration curve for a column with Sephadex® G-50 Medium. *M* is a molecular weight

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор протеолитического ферментного препарата. Гидролиз белков проводили протеолитическим ферментным препаратом при 40°C после предварительного дегликозилирования β-конглицинина при той же температуре. Из рис. 2 видно, что при использовании ферментного препарата «Протозим С330» значительное образование продуктов протеолиза (*СГ* = 55.5%) происходит в течение 5.5 ч, а при внесении ферментного препарата на основе щелочной протеазы наибольшая степень гидролиза (*СГ* = 43.3%) достигается за 5 ч. Для дальнейших исследований выбрали ферментный препарат «Протозим С330».

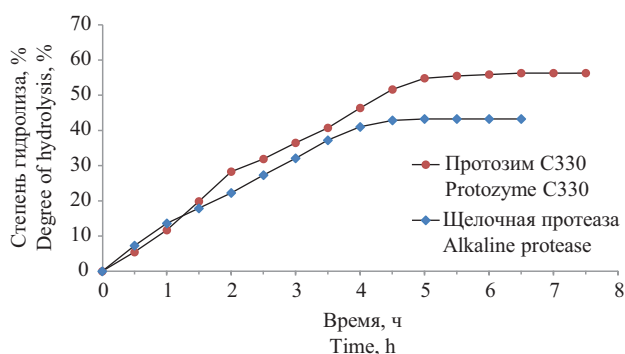


Рис. 2. Влияние протеолитических ферментов на степень гидролиза белков

Fig. 2. Effect of proteolytic enzymes on the degree of protein hydrolysis

Влияние температуры. Гидролиз белков проводили ферментным препаратом «Протозим С330» при 40 и 50°C (диапазон температур наибольшей каталитической активности нейтральной протеазы) после предварительного расщепления углеводного компонента гликопротеина при тех же температурах. Как видно из рис. 3, протеолиз при 40°C позволяет получить продукт со степенью гидролиза 55.5% в течение 5.5 ч, а протеолиз при 50°C — продукт с такой же степенью гидролиза (*СГ* = 56.3%) за 3.5 ч. Из полученных результатов следует, что предпочтительной температурой гидролиза белков является 50°C.

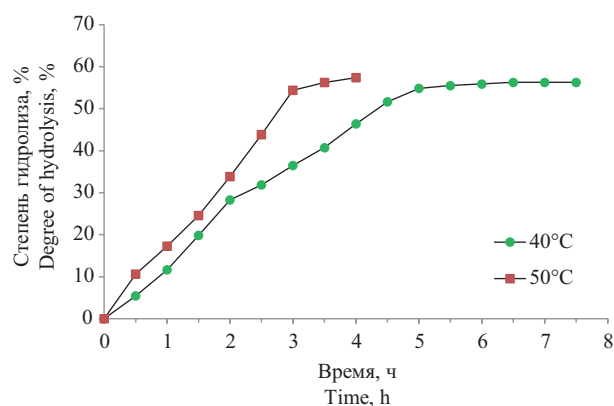


Рис. 3. Влияние температуры на степень гидролиза белков ферментным препаратом «Протозим С330»

Fig. 3. Effect of temperature on the degree of protein hydrolysis by the Protozyme C330 enzyme preparation

Влияние предварительного расщепления углеводного компонента гликопротеина. Ферментативное дегликозилирование β-конглицинина и гидролиз полисахаридов проводили при температуре 50°C. Кинетическая кривая образования редуцирующих сахаров представлена на рис. 4. Поскольку соевая мука изначально содержит редуцирующие сахара (глюкозу, фруктозу) [21], то на кинетической кривой в начальный момент времени их концентрация отлична от нуля. Через 15 мин после внесения ферментного препарата «Комплекс-концентрат» в суспензию соевой муки наблюдается 2.5-кратное увеличение концентрации редуцирующих сахаров за счет гидролиза свободных олиго- и полисахаридов. Дальнейшее возрастание концентрации редуцирующих сахаров обусловлено медленным расщеплением углеводной части гликопротеина.

Гидролиз белков проводили ферментным препаратом «Протозим С330» при 50°C с применением предварительного дегликозилирования β-конглицинина при той же температуре и без него. Установлено, что разрушение углеводного компонента гликопротеина способствует 6-кратному увеличению степени гидролиза белков (*СГ* = 56.3% за 3.5 ч) по сравнению с протеолизом в отсутствие предобработки (*СГ* = 9.2% за 3.5 ч) (рис. 5).

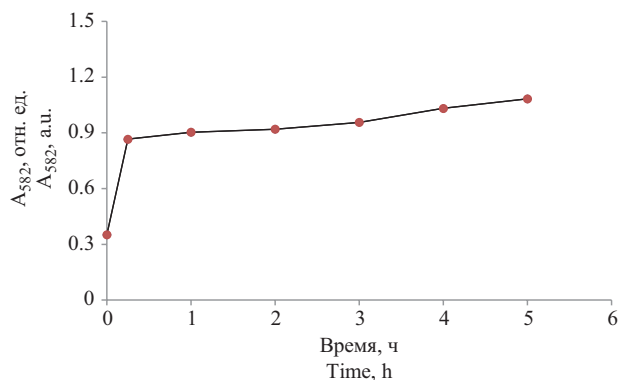


Рис. 4. Кинетическая кривая образования редуцирующих сахаров

Fig. 4. Kinetic curve of reducing sugars formation

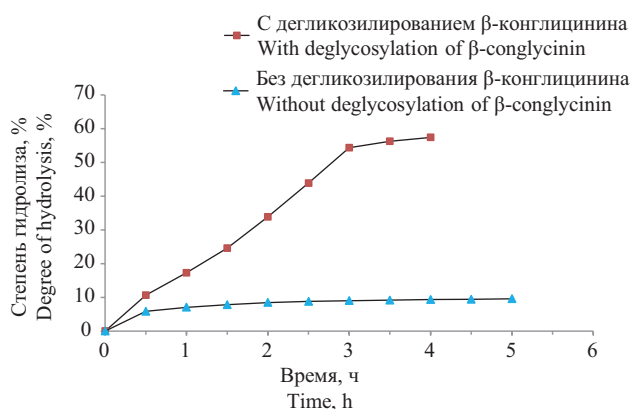


Рис. 5. Влияние предварительного расщепления углеводной части β -конглицинина на степень гидролиза белков ферментным препаратом «Протозим С330»

Fig. 5. Effect of preliminary cleavage of the carbohydrate part of β -conglycinin on the degree of protein hydrolysis by the Protozyme C330 enzyme preparation

Анализ молекулярно-массового распределения пептидных фракций после протеолиза с предварительным дегликозилированием β -конглицинина. Анализ профиля элюирования пептидных фракций (рис. 6) показал, что в соевом гидролизате содержится 83.9% пептидов с молекулярной массой ≤ 6 кДа, которые потенциально могут обладать биологической активностью [22, 23]. При этом пептидная фракция с молекулярной массой ≤ 1.0 кДа является преобладающей (58.6%), что вполне согласуется со степенью гидролиза ($CI = 56.3\%$). Полипептиды с молекулярной массой >32 кДа и не подвергшиеся гидролизу белки выходят в свободном объеме колонки (табл. 3).

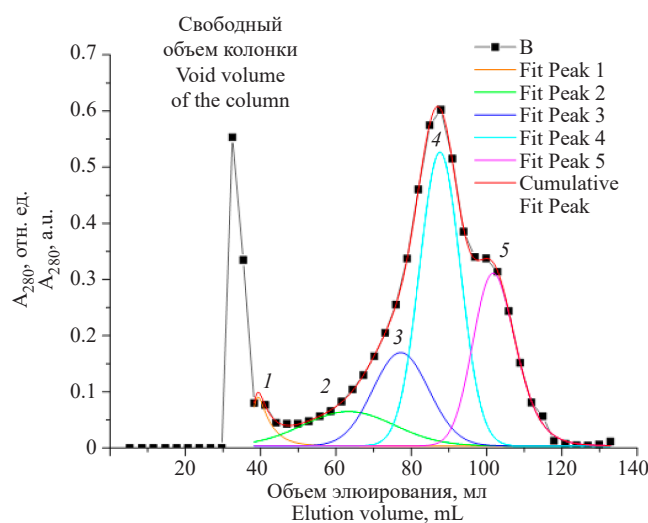


Рис. 6. Разложение пиков гауссовыми кривыми в профиле элюирования пептидных фракций

Fig. 6. Decomposition of peaks by Gaussian curves in the elution profile of peptide fractions

Таблица 3. Характеристика фракций в соевом гидролизате

Table 3. Characterization of fractions in soy hydrolysate

Наименование пика Name of peak	Площадь пика Peak area	Объем элюирования, мл Elution volume, mL	Молекулярная масса фракции, кДа Molecular weight of fraction, kDa	Содержание фракции, % Fraction content, %
Свободный объем колонки Void volume of the column	2.7	32.5	>32.0	13.6
1	0.5	38.0	31.7	2.5
2	1.9	61.5	6.1	9.6
3	3.1	75.6	2.3	15.7
4	7.1	87.5	1.0	35.9
5	4.5	98.8	0.5	22.7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что применение ферментативного дегликозилирования в качестве предварительной обработки соевой муки значительно увеличивает степень гидролиза белков. Вероятно, что расщепление углеводной части β -конглицинина приводит к потере белковой молекулой конформационной стабильности и повышает доступность пептидных связей к действию протеолитического фермента. Подобраны условия гидролиза соевых белков ферментным препаратом на основе нейтральной протеазы. Разработанный подход предварительного дегликозилирования β -конглицинина может быть использован для увеличения выхода низкомолекулярных пептидов при производстве соевых гидролизатов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке ЗАО «БелАсептика» (Республика Беларусь).

Acknowledgments

The research was financially supported by the BelAseptika CJSC (Republic of Belarus).

Вклад авторов

В.Н. Леонтьев — планирование экспериментов, обсуждение результатов, написание текста статьи.

О.И. Лазовская — проведение экспериментов, обработка и обсуждение результатов, написание текста статьи.

Authors' contributions

V.N. Leontiev — planning experiments, discussing results, writing the text of the manuscript.

O.I. Lazovskaya — carrying out experiments, processing and discussing results, writing the text of the manuscript.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Brumă M., Banu I., Vasilean I., Grigore-Gurgu L., Dumitrașcu L., Aprodu I. Influence of soy protein hydrolysates on thermo-mechanical properties of gluten-free flour and muffin quality. *Appl. Sci.* 2024;14(9):3640. <https://doi.org/10.3390/app14093640>
2. Daliri E.B.-M., Ofosu F.K., Chelliah R., Park M.H., Kim J.-H., Oh D.-H. Development of a soy protein hydrolysate with an antihypertensive effect. *Int. J. Mol. Sci.* 2019;20(6):1496. <https://doi.org/10.3390/ijms20061496>
3. Муранова Т.А., Зинченко Д.В., Мирошников А.И. Гидролизаты соевых белков для стартовых кормов аквакультуры: поведение белков при ферментации, композиционный анализ гидролизатов. *Биоорганическая химия.* 2019;45(4):380–390. <https://doi.org/10.1134/S0132342319030035> [Original Russian Text: Muranova T.A., Zinchenko D.V., Miroshnikov A.I. Hydrolysates of soybean proteins for start feeds of aquaculture: behavior of proteins at fermentolysis, compositional analysis of hydrolysates. *Bioorganicheskaya khimiya.* 2019;45(4):380–390. <https://doi.org/10.1134/S0132342319030035>] [Muranova T.A., Zinchenko D.V., Miroshnikov A.I. Hydrolysates of soybean proteins for starter feeds of aquaculture: the behavior of proteins upon fermentolysis and the compositional analysis of hydrolysates. *Russ. J. Bioorg. Chem.* 2019;45(3):195–203. <https://doi.org/10.1134/S1068162019030038>]
4. Peng H., Song X., Chen J., Xiong X., Yang L., Yu C., Qiu M., Zhang Z., Hu C., Zhu S., Xia B., Wang J., Xiong Z., Du L., Yang C. Soybean bioactive peptide supplementation improves gut health and metabolism in broiler chickens. *Poult. Sci.* 2025;104(2):104727. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104727>
5. Ruckman L.A., Petry A.L., Gould S.A., Kerr B.J., Patience J.F. The effects of enzymatically treated soybean meal on growth performance and intestinal structure, barrier integrity, inflammation, oxidative status, and volatile fatty acid production of nursery pigs. *Transl. Anim. Sci.* 2020;4(3):txaa170. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa170>
6. Костылева Е.В., Середа А.С., Великорецкая И.А., Курбатова Е.И., Цурикова Н.В. Использование протеолитических ферментов для получения белковых гидролизатов пищевого назначения из вторичного сырья. *Вопросы питания.* 2023;92(1):116–132. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132> [Kostyleva E.V., Sereda A.S., Velikoretskaya I.A., Kurbatova E.I., Tsurikova N.V. Proteases for obtaining of food protein hydrolysates from proteinaceous by-products. *Voprosy pitaniia = Problems of Nutrition.* 2023;92(1):116–132 (in Russ.). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132>]
7. Barać M.B., Stanojević S.P., Jovanović S.T., Pešić M.B. Soy protein modification: a review. *Acta Period. Technol.* 2004;2004(35):3–16. <https://doi.org/10.2298/APT0435003B>
8. Соколов Д.В., Болхонов Б.А., Жамсаранова С.Д., Лебедева С.Н., Баженова Б.А. Ферментативный гидролиз соевого белка. *Техника и технология пищевых производств.* 2023;53(1):86–96. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418> [Sokolov D.V., Bolkhonov B.A., Zhamsaranova S.D., Lebedeva S.N., Bazhenova B.A. Enzymatic hydrolysis of soy protein. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv (Food Processing: Techniques and Technology).* 2023;53(1):86–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418>]
9. Knežević-Jugović Z., Culetu A., Mijalković J., Duta D., Stefanović A., Šekuljica N., Đorđević V., Antov M. Impact of different enzymatic processes on antioxidant, nutritional and functional properties of soy protein hydrolysates incorporated into novel cookies. *Foods.* 2023;12(1):24. <https://doi.org/10.3390/foods12010024>
10. Dent T., Campanella O., Maleky F. Enzymatic hydrolysis of soy and chickpea protein with Alcalase and Flavourzyme and formation of hydrogen bond mediated insoluble aggregates. *Curr. Res. Food Sci.* 2023;6:100487. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2023.100487>
11. Kempka A.P., Honaizer T.C., Fagundes E., Prestes R.C. Functional properties of soy protein isolate of crude and enzymatically hydrolysed at different times. *Int. Food Res. J.* 2014;21(6):2229–2236.

12. Hrkčková M., Rusňáková M., Zemanovič J. Enzymatic hydrolysis of defatted soy flour by three different proteases and their effect on the functional properties of resulting protein hydrolysates. *Czech J. Food Sci.* 2002;20(1):7–14. <https://doi.org/10.17221/3503-CJFS>
13. Agrawal R.M., Miller M.J., Singh V., Stein H.H., Takhar P.S. Enzymatic hydrolysis and fermentation of soy flour to produce ethanol and soy protein concentrate with increased polyphenols. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2022;99(5):379–391. <https://doi.org/10.1002/aocs.12573>
14. Chen L., Chen J., Ren J., Zhao M. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of soy protein isolates and on the emulsifying properties of hydrolysates. *J. Agric. Food Chem.* 2011;59(6):2600–2609. <https://doi.org/10.1021/jf103771x>
15. Chen L., Chen J., Ren J., Zhao M. Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties. *Food Hydrocoll.* 2011;25(5):887–897. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.013>
16. Zhao F., Zhang D., Li X., Dong H. High-pressure homogenization pretreatment before enzymolysis of soy protein isolate: the effect of pressure level on aggregation and structural conformations of the protein. *Molecules.* 2018;23(7):1775. <https://doi.org/10.3390/molecules23071775>
17. Li C., Tian Y., Han J., Lu Y., Zou M., Jia Y., Wang C., Huang L., Wang Z. An innovative method used for the identification of N-glycans on soybean allergen β -conglycinin. *Food Sci. Hum. Wellness.* 2023;12(3):842–850. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.09.025>
18. Yang A., Deng H., Zu Q., Lu J., Wu Z., Li X., Tong P., Chen H. Structure characterization and IgE-binding of soybean 7S globulin after enzymatic deglycosylation. *Int. J. Food Prop.* 2018;21(1):171–182. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1437628>
19. Yolandani, Ma H., Li Y., Liu D., Zhou H., Liu X., Wan Y., Zhao X. Ultrasound-assisted limited enzymatic hydrolysis of high concentrated soy protein isolate: alterations on the functional properties and its relation with hydrophobicity and molecular weight. *Ultrason. Sonochem.* 2023;95:106414. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106414>
20. Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.* 1959;31(3):426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
21. Hou A., Chen P., Shi A., Zhang B., Wang Y.-J. Sugar variation in soybean seed assessed with a rapid extraction and quantification method. *Int. J. Agron.* 2009;2009:484571. <https://doi.org/10.1155/2009/484571>
22. Yang C., Liu B., Pan L., Xia D., Sun C., Zheng X., Chen P., Hu H., Zhou Q. Impact of soybean bioactive peptides on growth, lipid metabolism, antioxidant ability, molecular responses, and gut microbiota of oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*) fed with a low-fishmeal diet. *Biology.* 2025;14(1):11. <https://doi.org/10.3390/biology14010011>
23. Liu C., Wen C., Olatunji O.J., Suttikhana I., Ashaolu T.J. Biologically active peptides from soy: updates on antihypertensive action and gut microbiota modulation. *J. Funct. Foods.* 2024;123:106592. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106592>

Об авторах

Леонтьев Виктор Николаевич, к.х.н., заведующий кафедрой биотехнологии, учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» (220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, д. 13а). E-mail: leontiev@belstu.by. Scopus Author ID 14052100400, SPIN-код РИНЦ 8653-8538, <https://orcid.org/0000-0001-5348-4350>

Лазовская Олеся Илгамовна, ассистент, кафедра биотехнологии, учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» (220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, д. 13а). E-mail: lazovskaya@belstu.by. Scopus Author ID 57205667523, SPIN-код РИНЦ 9802-5904, <https://orcid.org/0009-0006-0919-3736>

About the Authors

Viktor N. Leontiev, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Department of Biotechnology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova ul., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: leontiev@belstu.by. Scopus Author ID 14052100400, RSCI SPIN-code 8653-8538, <https://orcid.org/0000-0001-5348-4350>

Olesya I. Lazovskaya, Assistant, Department of Biotechnology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova ul., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: lazovskaya@belstu.by. Scopus Author ID 57205667523, RSCI SPIN-code 9802-5904, <https://orcid.org/0009-0006-0919-3736>