

DOI: 10.7868/S3034574X26050136

Оригинальная статья

УДК 577.15

ВЛИЯНИЕ ПРОТЕАЗ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА СПОСОБНОСТЬ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОГО КЕРАТИНА ШЕРСТИ СТИМУЛИРОВАТЬ РОСТ РЕДИСА

И.В. Кравченко^{1*}, В.А. Фуралев¹, Е.С. Пшенникова¹, Т.В. Федорова¹, В.О. Попов¹

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация

*E-mail: ink71@yandex.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние протеолиза с использованием шести ферментных препаратов: пенициллопепсин, протосубтилин, кератиназа, протозим, протозим Н и протозим С (Россия), на способность гидротермически обработанного кератина (ГОК) стимулировать рост корней и стеблей редиса, а также повышать содержание в листьях этих растений фотосинтетических пигментов: хлорофиллов а и b, а также каротиноидов. Показано, что, в то время как негидролизированный ГОК не стимулирует рост корней, обработка ферментами позволяет повысить их вес на 57%–68%. Аналогично, было показано, что негидролизированный ГОК не стимулирует рост стеблей, при этом обработка ферментами позволяет повысить длину стеблей на 30%–70%, а вес стеблей – на 45%–83%. Также было показано, что если негидролизированный ГОК повышает содержание хлорофиллов а и b на 25% и 30%, соответственно, и при этом не повышает содержание каротиноидов, то обработка ферментами позволяет повысить содержание обоих хлорофиллов в 1.9–2.1 раза, а каротиноидов – в 3–4.2 раза. Полученные результаты позволили подобрать ферментный препарат (протозим С) для обработки ГОК, дающий возможность использовать этот кератин в качестве ценного стимулятора роста растений.

Ключевые слова: кератин, щелочные протеазы, нейтральные протеазы, кислая протеаза, проростки редиса

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2025-579 от 23.06.2025 о предоставлении субсидии на реализацию мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Высокотехнологичная биоэкономика».

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка цитирования: Кравченко И.В., Фуралев В.А., Пшенникова Е.С., Федорова Т.В., Попов В.О. Влияние протеаз различных типов на способность гидротермически обработанного кератина шерсти стимулировать рост редиса. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 5. С. 840–849. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26050136>

© И.В. Кравченко, В.А. Фуралев, Е.С. Пшенникова, Т.В. Федорова, В.О. Попов, 2026

Сокращения: ГОК – гидротермически обработанный кератин, БНПМ – бактериальная нейтральная протеаза модифицированная, ГКП – кислая грибная аспартазная протеаза, БЩП – бактериальная щелочная сериновой протеаза, ГЩП – грибная щелочная сериновая протеаза, БНП – бактериальная нейтральная протеаза

EFFECT OF PROTEASES OF DIFFERENT TYPES ON THE ABILITY OF HYDROTHERMALLY TREATED WOOL KERATIN TO STIMULATE RADISH GROWTH

I.V. Kravchenko^{1, *}, V.A. Furalev¹, E.S. Pshennikova¹, T.V. Fedorova¹, V.O. Popov¹

¹ *Institute of Biochemistry named after A.N. Bach, Federal Research Center
“Fundamental Foundations of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*E-mail: ink71@yandex.ru

Abstract. The study investigated the effect of proteolysis using six enzyme preparations: penicilllopepsin, protosubtilin, keratinase, protozyme, protozyme H, and protozyme C (Russia). This study affected the ability of hydrothermally treated keratin (HTK) to stimulate the growth of radish roots and stems, as well as to increase the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a and b, as well as carotenoids) in the leaves of these plants. It was shown that, while non-hydrolyzed HTK does not stimulate root growth, enzyme treatment increases their weight by 57%–68%. Similarly, non-hydrolyzed HTK does not stimulate stem growth, while enzyme treatment increases stem length by 30%–70% and stem weight by 45%–83%. It was also shown that while unhydrolyzed keratin increases chlorophyll a and b content by 25% and 30%, respectively, without increasing carotenoid content, enzyme treatment increases both chlorophyll content by 1.9–2.1 times and carotenoid content by 3–4.2 times. These results allowed the selection of an enzyme preparation (Protozyme C) for keratin treatment, enabling the use of this keratin as a valuable plant growth stimulant.

Keywords: keratin, alkaline proteases, neutral proteases, acid protease, radish seedlings

Funding. The work was carried out within the framework of the implementation of the NCMU Program “High-tech Bioeconomy” (agreement 075-15-2025-579 dated 06/23/2025).

Ethics declarations. This article does not contain any studies involving humans or animals as subjects.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

Authors contribution. All authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the study, and preparation of the article.

For Citation: Kravchenko I.V., Furalev V.A., Pshennikova E.S., Fedorova T.V., Popov V.O. Effect of Proteases of Different Types on the Ability of Hydrothermally Treated Wool Keratin to Stimulate Radish Growth. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(5):840–849. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26050136>

ВВЕДЕНИЕ

Кератин представляет собой глобулярный белок, формирующий промежуточные филаменты эпителиальных клеток [1]. Кератин является основным белком перьев и шерсти позвоночных животных. Большое количество этих источников кератина (перо и очесы шерсти) образуется в качестве отходов деятельности птицефабрик и прядильных комбинатов, утилизация этих отходов представляет собой значительную экономическую и экологическую проблему [2]. Потенциально кератины могут быть использованы во множестве различных областей: в качестве содержащей незаменимые аминокислоты ценной кормовой добавки [3]; в качестве азотной подкормки и стимулятора роста растений [4]; в качестве улучшающего состояние кожного покрова компонента различных косметических средств [5]; в качестве стимулирующего заживление и эпителизацию ран [6], компонента лекарственных средств [7].

Разработано множество различных методов утилизации источников кератина [8,9], одним из наиболее распространенных является гидротермическая обработка [10,11]. Данный метод весьма экономичен, и при этом он обеспечивает как денатурацию кератина, так и его частичный гидролиз, что делает продукт, получаемый в результате такой обработки, пригодным для использования в качестве кормовой добавки. Необходимо отметить, что такой продукт демонстрирует лишь небольшую степень гидролиза, и это существенно ограничивает его сферы применения: в частности, для подкормки растений и стимуляции роста растений необходимы продукты расщепления белков с небольшой молекулярной массой. Для того, чтобы продукт гидротермальной обработки кератинового сырья мог быть использован в данной области, необходимо осуществить его дальнейшее расщепление, и оптимальным решением данной проблемы является использование различных протеолитических ферментов. Весьма целесообразным представляется сравнить эффекты нескольких ферментов с различными механизмами действия чтобы выбрать наиболее подходящий при решении конкретной биотехнологической задачи.

В последнее время в различных странах, в том числе в Российской Федерации, стремительно растет рынок микрозелени редиса [12]. Она содержит провитамины А, витамины В1, В2, В3, В9 и С, ионы К, Mg, Fe и Zn, а также различные антиоксиданты [13]. Семена редиса прорастают достаточно быстро, что делает хорошей экспериментальной моделью для изучения биологических эффектов различных испытываемых соединений.

Целью данной работы было изучить влияние протеолиза несколькими ферментами отечественного производства продукта гидротермической обработки шерсти на его способность стимулировать

рост корней и листьев редиса, а также на содержание в них хлорофиллов и каротиноидов.

МЕТОДИКА

Для получения ГОК 25 г предварительно отмытой и измельченной овечьей шерсти заливали 200 мл дистиллированной воды (гидромодуль 1:8). Термогидролиз проводили при температуре 180°C и давлении 1,0–1,2 Мпа в течение 1 часа в лабораторном реакторе. Полученную взвесь центрифугировали 20 минут 4200 g. Супернатант лиофилизировали и хранили при –20°C.

Анализ пептидного профиля проводили методом гельпроникающей хроматографии на колонке Superdex peptide 10/300 GL, уравновешенной 20 mM KH_2PO_4 + 0,25 M NaCl. Образец суспендировали в 20 mM KH_2PO_4 + 0,25 M NaCl в концентрации 10 мг/мл, встряхивали 1 час при комнатной температуре, затем центрифугировали 10 000 g 10 минут, наносили на колонку по 100 мкл. Профиль элюции регистрировали при длине волны 280 нм.

Для проведения ферментативной обработки были использованы следующие ферментные препараты: бактериальной нейтральной протеазы модифицированной (КФ 3.4.24.28, БНПМ) – бациллолизин (лабораторный образец предоставлен ВНИИПБТ)[14]; кислой грибной аспартатной протеазы (КФ 3.4.23.20, ГКП) – пенициллопепсин (ФП Агропрот, ООО «Агрофермент», Россия); бактериальной щелочной сериновой протеазы (КФ 3.4.21.62, БЩП) – субтилизин бактериальный (ФП Протозим, ТД «Биопрепарат», Россия); грибной щелочной сериновой протеазы (КФ 3.4.21.62, ГЩП) – субтилизин грибной (ФП Протозим С, ТД «Биопрепарат», Россия); кератиназы (КФ 3.4)(ТД «Биопрепарат», Россия); бактериальной нейтральной протеазы (КФ 3.4.24.28, БНП) (ФП Протозим Н, ТД «Биопрепарат», Россия). Гидротермически обработанный кератин суспендировали в дистиллированной воде в концентрации 50 мг/мл, инкубировали 30 мин. при встряхивании на шейкере ИКА МТС 2/4 при 300 об./мин. Затем pH суспензии доводили до требуемого значения для обработки БЩП и ГЩП – до 9,0, БНП – до 7,0, ГКП до 5,0 и прогревали на водяной бане до 55°C. Далее добавляли к суспензии фермент и инкубировали в термостате при перемешивании 6 ч. Выбранная рабочая активность БЩП, ГЩП и составила 5 ед./мл, ГКП – 7 ед./мл, БНПМ – 0,74 ед./мл., БНП – 1 ед./мл., а КЗ – 27 ед./мл. Ферменты инактивировали нагреванием на водяной бане 10 минут при 85°C, полнота инактивации была доказана инкубацией инактивированных ферментов с ГОК с последующим электрофорезом с додецилсульфатом натрия.

Для измерения ростовых параметров и содержания хлорофиллов в побегах редиса проводили проращивание семян редиса в 10 см чашках Петри на 2 слоях фильтровальной бумаги, смоченной 10 мл

дистиллированной воды или 10 мл раствора ГОК с концентрацией 1 мг/мл. На каждую чашку добавляли 25 семян. Влажность составляла около 75%, освещение – 12 часов в сутки, ростовые параметры определяли на 7 день. Каждый опыт проводили в трех повторностях.

Определение содержания хлорофиллов и каротиноидов проводили по методу [15]. Измерения хлорофилла и общих каротиноидов проводили на 10 день. Пигменты из высушенных и измельченных листьев экстрагировали метанолом. Измерение содержания проводили спектрофотометрически по формулам:

$$C_a = 15.65 A_{666} - 7.34 A_{653},$$

$$C_b = 27.05 A_{653} - 11.21 A_{666},$$

$$C_{x+c} = (1000 A_{470} - 2.86 C_a - 129.2 C_b) / 221,$$

где C_a – концентрация хлорофилла а, C_b – концентрация хлорофилла b и C_{x+c} – концентрация тотальных каротиноидов (все в мкг/мл), A – оптическая плотность.

Полученные данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение. Статистическая значимость различий между каждой экспериментальной группой и контрольной была определена с использованием двустороннего t-критерия Стьюдента. Статистическая значимость различий между отдельными экспериментальными группами была определена с использованием F-критерия Фишера (ANOVA). Разница была определена как значимая при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пептидный профиль продуктов ферментативного протеолиза ГОК

Исходный ГОК содержал множество различных пептидов, небольшие отличия их по молекулярной массе не позволяли провести четкое хроматографическое разделение (рис. 1а). Его профиль элюции продемонстрировал относительно равномерное распределение пептидов, он не содержал отдельных четких пиков, при этом можно отметить, что исходный препарат ГОК содержал относительно большое количество крупных пептидов.

После обработки всеми исследованными протеолитическими ферментами наблюдалось некоторое смещение пептидного профиля в сторону увеличения небольших пептидов и уменьшения относительно крупных. Гидролизаты, полученные в результате обработки ГОК разными ферментами, демонстрировали немного отличающиеся друг от друга пептидные профили. Так, пептидные профили ГОК после обработки ГКП (рис. 1б) и

БНПМ (рис. 1в) были весьма схожи с исходным, наблюдался лишь небольшой сдвиг в сторону мелких пептидов. На пептидном профиле ГОК после обработки БНП (рис. 1г) более заметно уменьшение содержания крупных пептидов, профиль выглядит менее полого. В случае ГЩП (рис. 1д) на пептидном профиле видны отдельные пики пептидов с очень низкой молекулярной массой. Эти пики также видны на профиле ГОК после обработки БЩП (рис. 1е), причем замечен ещё больший сдвиг максимума в сторону более мелких пептидов. Наиболее отличным от других является профиль ГОК после обработки кератиназой (рис. 1ж), он демонстрирует два мощных пика пептидов с очень низкой молекулярной массой.

На диаграмме количественного распределения пептидов по фракциям с определенной молекулярной массой эти закономерности также видны (рис. 2).

Обработка ГКП и БНПМ заметно понижает содержание крупных пептидов с молекулярной массой >10 кДа и несколько увеличивает содержание самых мелких пептидов и аминокислот (<1 кДа), понижается также содержание пептидов с молекулярной массой 3-10 кДа. Обработка БНП приводит к еще большему снижению содержания более крупных пептидов (>10 кДа и 3-10 кДа), дальнейшему росту содержания самых мелких (<1 кДа) и небольшому увеличению содержания пептидов с молекулярной массой 1-3 кДа. Обработка ГЩП и БЩП позволяет добиться ещё более заметного снижения содержания относительно крупных пептидов и ещё большего увеличения содержания самых мелких пептидов и аминокислот. Наконец, после обработки кератиназой наблюдалось наибольшее количество более мелких пептидов (как <1 кДа, так и 1-3 кДа).

Влияние продуктов ферментативного протеолиза ГОК на рост корней редиса

ГОК не обладал способностью увеличивать длину корней редиса (рис. 3). Обработка исследованными ферментами также не приводила к появлению статистически достоверного стимулирующего эффекта у гидролизатов, стимуляция проявлялась лишь на уровне тенденции.

ГОК также не стимулировал увеличение веса корней редиса статистически достоверно, эффект тоже был выражен лишь на уровне тенденции. В отличие от длины корней, вес корней удалось увеличить при обработке редиса гидролизатами ГОК, полученными с помощью двух ферментов: БЩП и ГЩП. Наибольший эффект наблюдался при использовании ГЩП: гидролизат ГОК, полученный в результате обработки этим ферментом, повышал вес корней почти на 68% по отношению к контролю. Обработка БЩП позволяла увеличить вес корней почти на 57%. Эффекты остальных ферментов были статистически недостоверны.

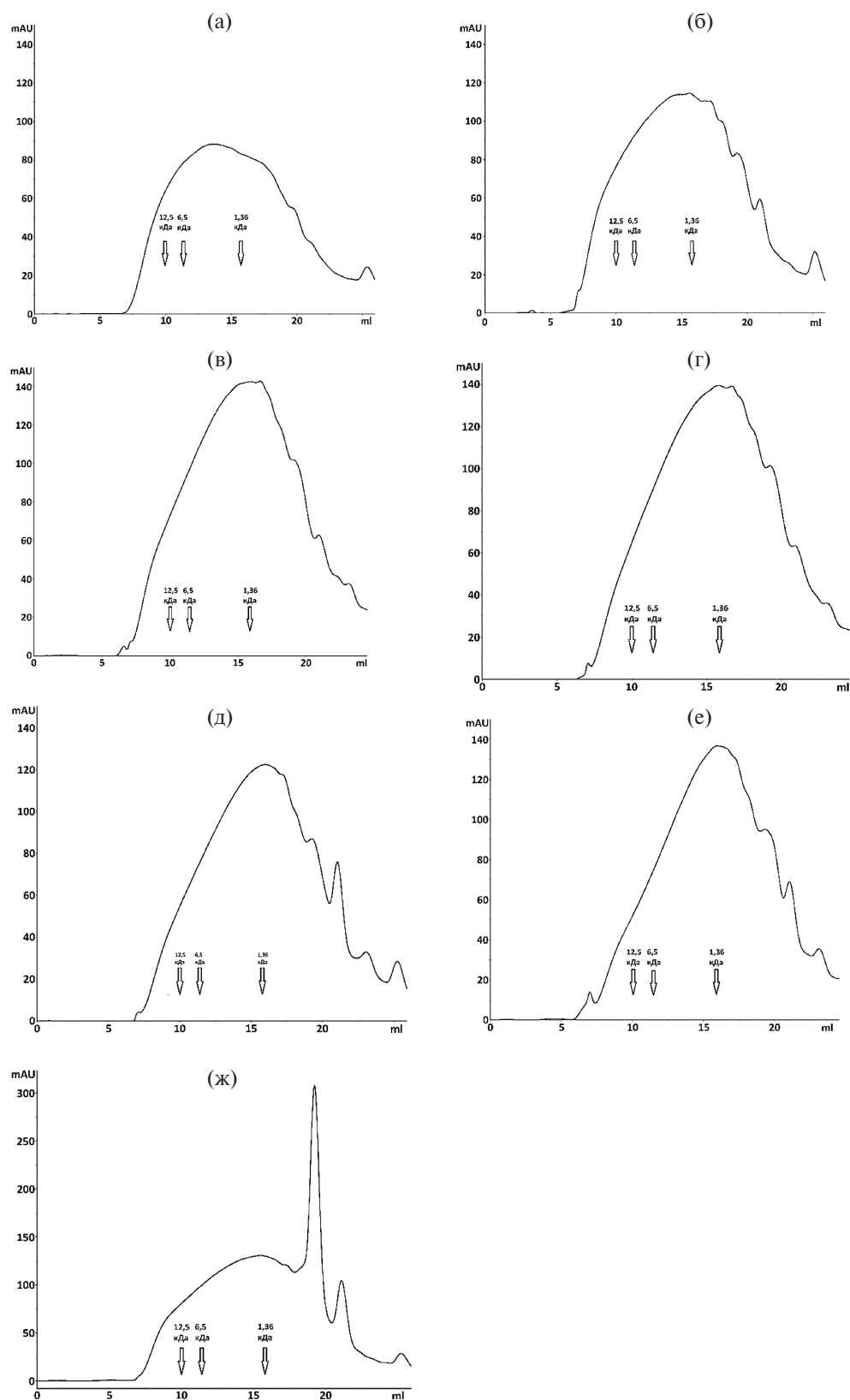


Рис. 1. Хроматография необработанного ГОК (а), а также ГОК, обработанного препаратами ГКП (б), БНПМ (в), БНП (г), ГШП(д), БШП (е) и кератиназы (ж), на колонке Superdex peptide 10/300 GL

Fig. 1. Chromatography of untreated GOK (a) and GOK treated with GKP (b), BPNM (c), BNP (d), GSP (e), BSCP (e), and keratinase (g) on a Superdex peptide 10/300 GL column

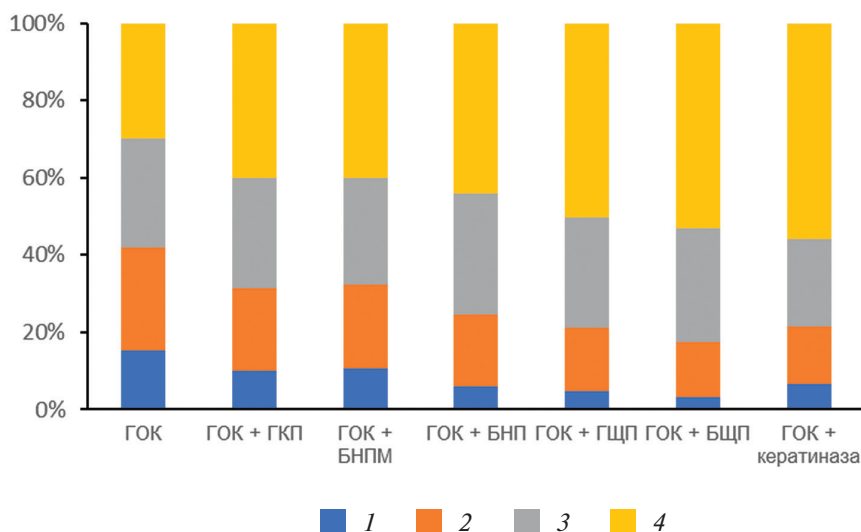


Рис. 2. Распределение по молекулярной массе белков и пептидов необработанного ГОК, а также ГОК, обработанного различными протеолитическими ферментами. 1 – более 10 кДа, 2 – 10-3 кДа, 3-1 кДа, 4 – менее 1 кДа
Fig. 2. Molecular weight distribution of proteins and peptides in untreated GOK and GOK treated with various proteolytic enzymes. 1 – greater than 10 kDa, 2 – 10-3 kDa, 3 – 1 kDa, 4 – less than 1 kDa

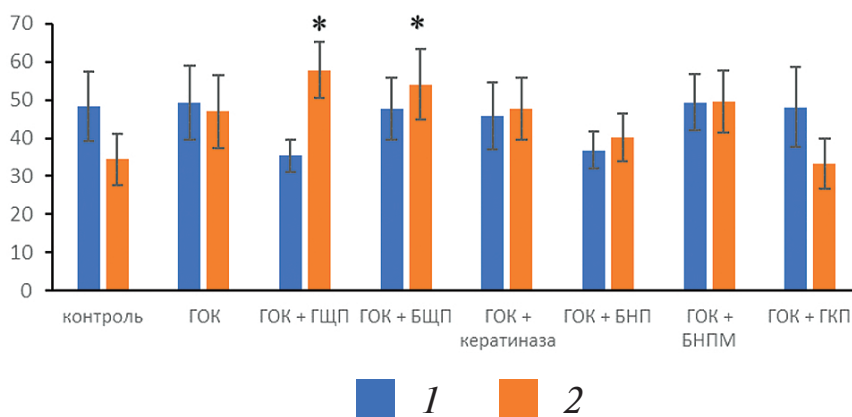


Рис. 3. Влияние необработанного ГОК, а также ГОК, обработанного различными протеолитическими ферментами, на длину (1, мм) и вес (2, мг) корней редиса. Полученные данные представлены в виде среднего значения ± стандартное отклонение. Статистически достоверно отличаются от контроля: * $p < 0,05$
Fig. 3. Effect of untreated GOK and GOK treated with various proteolytic enzymes on the length (1, mm) and weight (2, mg) of radish roots. The obtained data are presented as the mean ± standard deviation. Statistically significantly different from the control: * $p < 0.05$

Влияние продуктов ферментативного протеолиза ГОК на рост стеблей редиса

ГОК не обладал способностью увеличивать длину стеблей редиса (рис. 4).

В отличие от корней, длину стеблей удалось увеличить при обработке редиса гидролизатами ГОК, полученными с помощью трех ферментов: БЩП,

ГЩП и кератиназы. Наибольший эффект наблюдался при использовании ГЩП: гидролизат ГОК, полученный в результате обработки этим ферментом, повышал длину стеблей более чем на 70% по отношению к контролю. Обработка кератиназой позволяла увеличить длину стеблей почти на 31%, а обработка БЩП – почти на 30%.

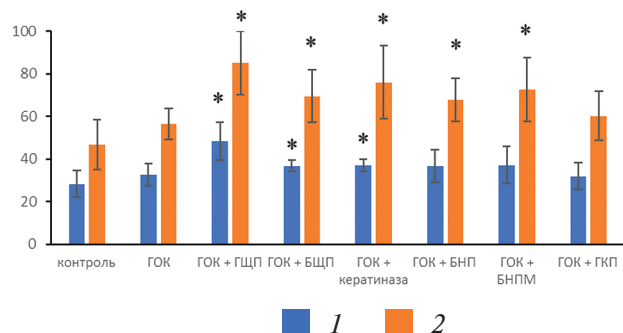


Рис. 4. Влияние необработанного ГОК, а также ГОК, обработанного различными протеолитическими ферментами, на длину (1, мм) и вес (2, мг) стеблей редиса. Полученные данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение. Статистически достоверно отличаются от контроля: * $p < 0,05$

Fig. 4. Effect of untreated GOK and GOK treated with various proteolytic enzymes on the length (1, mm) and weight (2, mg) of radish stems. The obtained data are presented as the mean $\pm$ standard deviation. Statistically significantly different from the control: * $p < 0.05$

ГОК также не стимулировал увеличение веса стеблей редиса статистически достоверно, эффект тоже был выражен лишь на уровне тенденции. Пять ферментов позволяли получить гидролизаты ГОК, стимулирующие увеличение веса стеблей редиса. Наибольший эффект наблюдался при использовании ГЩП: гидролизат ГОК, полученный в результате обработки этим ферментом, повышал вес стеблей почти на 83% по отношению к контролю. Обработка кератиназой позволяла увеличить вес стеблей более чем на 62%, обработка БНПМ — более чем на 55%, обработка БЩП — на 49%, и обработка БНП — более чем на 45%.

Влияние продуктов ферментативного протеолиза ГОК на содержание фотосинтетических пигментов в листьях редиса

ГОК обладал способностью статистически достоверно увеличивать содержание хлорофилла *a* в листьях проростков редиса: после обработки его содержание увеличилось на 25% (рис. 5).

Все шесть изученных протеолитических ферментов позволили значительно улучшить наблюдаемый рост содержания данного пигмента. Наибольший эффект наблюдался при использовании БЩП, ГЩП и кератиназы: гидролизаты ГОК, полученные в результате обработки этими ферментами, повышали содержание хлорофилла *a* по отношению к контролю более чем в 2,1 раза, в 2 раза и почти в 1,9 раза, соответственно. Обработки БНП, ГКП и БНПМ продемонстрировали меньшую стимуляцию: содержание данного пигмента возрастало более чем на 48%, на 40% и почти на 36%, соответственно. Важно отметить, что эффек-

ты всех гидролизатов ГОК, полученных в результате обработки вышеописанными ферментами, демонстрировали статистически достоверные отличия от эффекта необработанного ГОК. Так, гидролизат, полученный с помощью БЩП, позволял добиться повышения содержания хлорофилла *a* на 70% больше, чем при использовании исходного ГОК, ГЩП — на 60%, кератиназы — на 51%, БНП — почти на 19%, ГКП — более чем на 12% и БНПМ — почти на 9%.

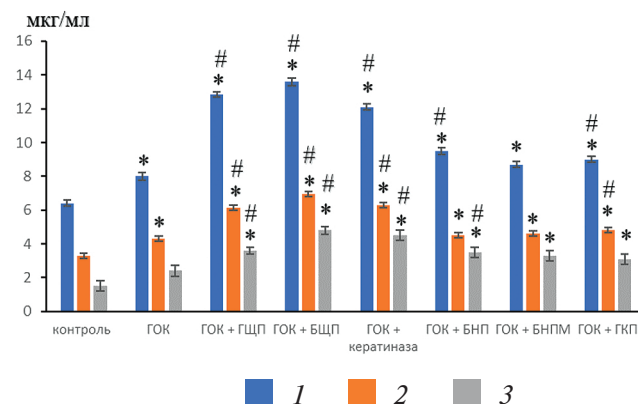


Рис. 5. Влияние необработанного ГОК, а также ГОК, обработанного различными протеолитическими ферментами, на содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов, в листьях редиса. 1 — хлорофилл *a*, мкг/мг; 2 — хлорофилл *b*, мкг/мг; 3 — каротиноиды, мкг/мг. Полученные данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение. Статистически достоверно отличаются от контроля: * $p < 0,05$; статистически достоверно отличаются от ГОК: # $p < 0,05$

Fig. 5. Effect of untreated GO and GO treated with various proteolytic enzymes on the content of chlorophylls *a* and *b*, as well as carotenoids, in radish leaves. 1 — chlorophyll *a*, µg/mg; 2 — chlorophyll *b*, µg/mg; 3 — carotenoids, µg/mg.

The obtained data are presented as the mean $\pm$ standard deviation. Statistically significantly different from the control: * $p < 0.05$, from the GOK # $p < 0.05$

Обработка ГОК также статистически достоверно увеличивала содержание хлорофилла *b* в листьях: его содержание увеличилось более чем на 30%. Гидролизаты, полученные при использовании всех шести изученных ферментов, также достоверно повышали содержание данного пигмента. Наибольший эффект и в этом случае наблюдался при использовании БЩП, кератиназы и ГЩП: гидролизаты ГОК, полученные в результате обработки этими ферментами, повышали содержание хлорофилла *b* по отношению к контролю более чем в 2,1 раза, более чем в 1,9 раза и почти в 1,9 раза, соответственно. Обработки ГКП, БНПМ и БНП продемонстрировали меньшую стимуляцию: содержание данного пигмента возрастало более

чем на 45%, более чем на 39% и более чем на 36%, соответственно. Только четыре ферментативных гидролизата продемонстрировали статистически достоверные отличия от необработанного ГОК. Так, гидролизат, полученный с помощью БЩП, позволял добиться повышения содержания хлорофилла в почти на 62% больше, чем при использовании исходного ГОК, кератиназы — почти на 47%, ГЩП — на 43% и БНП — почти на 12%.

В отличие от хлорофиллов, обработка ГОК не увеличивала содержание каротиноидов в листьях статистически достоверно: эффект проявлялся только на уровне тенденции. При этом гидролизаты, полученные при использовании всех шести изученных ферментов, достоверно повышали содержание данных пигментов. Наибольший эффект и в этом случае наблюдался при использовании БЩП и кератиназы: гидролизаты ГОК, полученные в результате обработки этими ферментами, повышали содержание каротиноидов по отношению к контролю в 4,2 раза и в 3 раза, соответственно. Обработки ГЩП, БНП, БНПМ и ГКП продемонстрировали меньшую стимуляцию: содержание данных пигментов возрастало почти в 2,4 раза, более чем 2,3 раза, в 2,2 раза и почти в 2,1 раза, соответственно.

В случае необходимости комплексного улучшения процесса прорастивания редиса с помощью обработки ГОК одним ферментом, то наиболее предпочтительным выбором будет использование ГЩП. Этот фермент лучше всех прочих стимулировал рост корней, а также рост и увеличение веса стеблей; он был в числе лучших для повышения содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях; он существенно повышал содержание каротиноидов.

Наблюдаемый эффект стимуляции может быть обусловлен различными причинами. Во-первых, при достаточно глубоком гидролизе получается большое количество свободных аминокислот, которые могут служить эффективной азотной подкормкой для прорастающих семян. Во-вторых, при

гидролизе кератина могут образоваться пептиды, специфически стимулирующие рост корней [16] и стеблей [17], а также синтез фотосинтетических пигментов в листьях. Данная работа не позволяет с точностью установить механизм стимулирующего эффекта. С одной стороны, ГКП и БНПМ, при обработке которыми наблюдался наименьший сдвиг пептидного профиля и наименьшее образование самых коротких пептидов и аминокислот, также демонстрировали и наименьшие биологические эффекты. Такая корреляция может свидетельствовать об участии свободных аминокислот в процессе стимуляции. С другой стороны, наибольший сдвиг пептидного профиля и наибольшее образование самых коротких пептидов и аминокислот наблюдался при обработке кератиназой, однако данный фермент не показывал наилучших биологических эффектов. Это может свидетельствовать об участии специфических пептидов, которые образуются в больших количествах при обработке другими ферментами.

Таким образом, в результате проведенной работы было исследовано влияние протеолиза продукта гидротермической обработки шерсти шестью различными протеолитическими ферментными препаратами отечественного производства на его способность стимулировать рост корней, рост листьев, а также на содержание хлорофиллов и каротиноидов у растений редиса. Были идентифицированы ферменты, позволяющие существенно повысить эти параметры, имеющие важнейшее значение в растениеводстве. Следующим этапом исследования станет оценка влияния ферментированного ГОК на микробное биоразнообразие в реальных тепличных условиях, что позволит лучше понять его потенциал в сельском хозяйстве. Если ферментированный ГОК окажет благотворный эффект на почвенный микробиом и сможет стимулировать рост растений за счет улучшения здоровья и функционирования почвенной экосистемы, его применение позволит заложить основы долгосрочного органического земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang J., Chen X., Zhang J., Sun X. et al. Animal keratin: Multifunctional biomaterial from slaughter by-products—extraction, functionality and applications. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2025, vol. 333, P. 148921. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148921>
2. Qingxin L. Progress in Microbial Degradation of Feather. *Waste.Front. Microbiol.*, 2019, vol.10, P. 2717. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>
3. Haththotuwa T.N., Dias G.J., Bekhit A.E.A. Valorisation of feather and wool for dietary applications and human nutrition: A step towards sustainable food production. *Food Chem.*, 2026, vol. 506, P. 48165. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.148165>
4. Qingxin Li. Perspectives on Converting Keratin-Containing Wastes Into Biofertilizers for Sustainable Agriculture. *Front Microbiol.*, 2022, vol. 13, P. 918262. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.918262>

5. Burnett C.L., Bergfeld W.F., Belsito D.V., Hill R.A., Klaassen C.D. et al. Safety Assessment of Keratin and Keratin-Derived Ingredients as Used in Cosmetics. *Int. J. Toxicoll*, 2021, vol. 40, no. 2, P. 6S-51S. <https://doi.org/10.1177/10915818211013019>
6. Batzer A.T., Marsh C., Kirsner R.S. The use of keratin-based wound products on refractory wounds. *Int. Wound.J.*, 2016, vol.13, no. 1, P. 110-115. <https://doi.org/10.1111/iwj.12245>
7. Feroz S., Muhammad N., Ranayake J., Dias G. Keratin - Based materials for biomedical applications. *Bioact. Mater.*, 2020, vol. 5, no. 3, P. 496-509. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.04.007>
8. Sarma A. Biological importance and pharmaceutical significance of keratin: A review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2022, vol. 219, P. 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.002>
9. Perța-Crișan S., Ursachi CȘ., Gavrilăș S., Oancea F., Munteanu F.D. Closing the Loop with Keratin-Rich Fibrous Materials. *Polymers (Basel)*, 2021, vol. 13, no. 11, P.1896. <https://doi.org/10.3390/polym13111896>
10. Verdnik A., Čolnik M., Knez Ž., Škerget M. Isolation of Keratin from Waste Wool Using Hydrothermal Processes. Isolation of Keratin from Waste Wool Using Hydrothermal Processes. *Acta Chim. Slov*, 2021, vol. 68, no. 2, P. 433-440. <https://doi.org/10.17344/aci.2020.6538>
11. Callegaro K., Brandelli A., Daroit D.J. Beyond plucking: Feathers bioprocessing into valuable protein hydrolysates. *Waste Manag*, 2019, vol. 95, P. 399-415. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.040>
12. Singh A., Singh J., Kaur S., et al. Emergence of microgreens as a valuable food, current understanding of their market and consumer perception: A review. *Food Chem. X*, 2024, vol. 23, P. 101527. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101527>
13. Yoon W., Park M., Yoo G., Kim Y.S., Park H.Y. Bioactive Compounds and Health Benefits of Radish Greens. *J. Agric. Food Chem*, 2025, vol. 73, no. 39, P. 24517-24527. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c08263>
14. Kostyleva E.V., Sereda A.S., Velikoretskaya I.A., Mineeva D.T., Tsurikova N.V. Efficiency of an enzyme preparation obtained from a new mutant *Bacillus subtilis*-96 strain in the hydrolysis of whey and egg white proteins. *Voprosy pitanya*, 2022, vol. 91, no. 2. P. 72-80. (In Russ.) <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-2-72-80>
15. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J. Plant. Physiol*, 1994, vol. 144, no.3, P. 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
16. Sun W., Shahrajabian M.H., Kuang Y., Wang N. Amino Acids Biostimulants and Protein Hydrolysates in Agricultural Sciences. *Plants (Basel)*, 2024, vol. 13, no. 2, P. 210. <https://doi.org/10.3390/plants13020210>
17. Sun L., Wang X., Li R., Dong W., et al. Preparation, characterization, antioxidant activity evaluation, and potential application of Peruvian squid liver protein hydrolysates. *Food Chem. X*, 2025, vol. 30, P. 102998. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102998>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравченко Ирина Валерьевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерной энзимологии института биохимии им. А.Н.Баха Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: ink71@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1715-1281>

Фуралев Владимир Александрович — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерной энзимологии института биохимии им. А.Н.Баха Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: furalyov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5039-0500>

AUTHOR INFORMATION

Kravchenko, Irina V. — PhD (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Engineering Enzymology, A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: ink71@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1715-1281>

Furalyov, Vladimir A. — PhD (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Engineering Enzymology, A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: furalyov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5039-0500>

Пшенникова Елена Станиславовна — кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории инженерной энзимологии института биохимии им. А.Н.Баха Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: pshennikova57@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1527-3426>

Федорова Татьяна Васильевна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией молекулярных основ биотрансформации, ведущий научный сотрудник института биохимии им. А.Н.Баха Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: fedorova_tv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0355-6800>

Попов Владимир Олегович — академик РАН, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией инженерной энзимологии института биохимии им. А.Н.Баха Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: v.popov@fbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0133-7962>

Pshennikova, Elena S. — PhD (Biology), Researcher, Laboratory of Engineering Enzymology, A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: pshennikova57@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1527-3426>

Fedorova, Tatyana V. — PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Molecular Bases of Biotransformation, Leading Researcher at the A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: fedorova_tv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0355-6800>

Popov, Vladimir O. — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Engineering Enzymology at the A.N. Bakh Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: v.popov@fbras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0133-7962>

Поступила в редакцию 06.05.2026
После доработки 10.06.2026
Принята к публикации 11.07.2026

Received May 06, 2026
Revised June 10, 2026
Accepted July 11, 2026