



Биоактивные коллагеновые пептиды, полученные из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), и их антивозрастное действие на дермальные фибробласты человека

Обзорная статья
УДК 639.3.043.2

<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-170-178>
EDN: KJKOVW

Рашид Лайт Мохаммед Рашид – аспирант кафедры Водные биоресурсы и аквакультура, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: laythrashid91@gmail.com

Турицин Владимир Сергеевич – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры Водные биоресурсы и аквакультура, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: turicin_spb@mail.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Адрес: Россия, 196601, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2

Аннотация. Старение кожи – это сложный биологический процесс, характеризующийся постепенным снижением структурной целостности и физиологических функций кожи, что приводит к появлению морщин и потере эластичности. Коллаген – основной структурный белок внеклеточного матрикса (ECM), играет решающую роль в поддержании прочности и эластичности кожи. В данной статье рассматривается многообещающий потенциал биоактивных коллагеновых пептидов, полученных из побочных продуктов аквакультуры, в частности – из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), в качестве эффективных антивозрастных агентов. Особое внимание уделяется механизмам действия этих пептидов на уровне дермальных фибробластов человека – основных клеток, ответственных за синтез коллагена. В обзоре обсуждаются методы экстракции и ферментативного гидролиза, физико-химические свойства полученных пептидов, их влияние на синтез коллагена I типа, ингибирование матриксных металлопротеиназ (ММП), модуляция ключевых клеточных сигнальных путей, таких как TGF- β и NF- κ B, а также их антиоксидантная активность. Совокупность данных свидетельству-

ет о том, что коллагеновые пептиды, полученные из кожи радужной форели, представляют собой ценный функциональный ингредиент для косметических и нутрицевтических применений, а также демонстрируют высокий потенциал для валоризации побочных продуктов рыбного хозяйства.

Ключевые слова: коллагеновые пептиды, радужная форель, *Oncorhynchus mykiss*, антивозрастное действие, дермальные фибробласты, синтез коллагена, матриксные металлопротеиназы (ММП), побочные продукты аквакультуры.

Для цитирования: Рашид Л.М.Р., Турицин В.С. Биоактивные коллагеновые пептиды, полученные из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), и их антивозрастное действие на дермальные фибробласты человека // Рыбное хозяйство. 2026. № 3. С. 170-178. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-170-178>

BIOACTIVE COLLAGEN PEPTIDES DERIVED FROM RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*) SKIN AND THEIR ANTI-AGING EFFECTS ON HUMAN DERMAL FIBROBLASTS

Layth Mohammed Rashid Rashid – Postgraduate Student Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, St. Petersburg, Russia

Vladimir S. Turitsin – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, Saint Petersburg, Russia

St. Petersburg State Agrarian University

Address: Russia, 196601, Saint Petersburg, Pushkin, Peterburgskoye Shosse, 2

Annotation. Skin aging is a complex biological process characterized by a gradual decline in the structural integrity and physiological functions of the skin, leading to wrinkles and loss of elasticity. Collagen, the main structural protein in the extracellular matrix (ECM), plays a crucial role in maintaining skin strength and resilience. This article reviews the promising potential of bioactive collagen peptides derived from aquaculture by-products, specifically the skin of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), as effective anti-aging agents. Special focus is given to the mechanisms of action of these peptides at the level of human dermal fibroblasts, the primary cells responsible for collagen synthesis. The review discusses extraction and enzymatic hydrolysis methods, the physicochemical properties of the resulting peptides, their effect on type I collagen synthesis, inhibition of matrix metalloproteinases (MMPs), modulation of key cellular signaling pathways such as TGF- β and NF- κ B, and their antioxidant activity. The collective evidence suggests that collagen peptides from rainbow trout skin are a valuable functional ingredient for cosmetic and nutraceutical applications and demonstrate high potential for the valorization of fishery by-products.

Keywords: collagen peptides, rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, anti-aging, dermal fibroblasts, collagen synthesis, matrix metalloproteinases (MMP), aquaculture by-products

For citation: Rashid L.M.R., Turitsin V.S. 2026. Bioactive Collagen Peptides Derived from Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Skin and Their Anti-Aging Effects on Human Dermal Fibroblasts // Fisheries. No. 3. Pp. 170-178. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-170-178>

Рисунок и таблица – авторские / The drawing and table were made by the author

1. ВВЕДЕНИЕ

Старение кожи – это многофакторное явление, на которое влияют как внутренние (хронологическое старение), так и внешние (фотостарение) факторы, которые в совокупности приводят к постепенному ухудшению структуры и функции кожи [1]. На молекулярном уровне это ухудшение в основном связано с изменениями во внеклеточном матриксе (ECM), где снижается выработка коллагена и эластина, а их деградация увеличивается [2]. Коллаген I типа является наиболее распространенным белком в коже человека и в основном отвечает за обеспечение структурной поддержки и прочности на разрыв [3]. Дермальные фибробласты – это основные клетки дермы, которые регулируют обновление и гомеостаз коллагена, поэтому поддержание их функции и активности – ключевая стратегия в борьбе со старением кожи [4].

В последние годы возрос интерес к биоактивным пептидам, полученным из природных источников, как к потенциальным антивозрастным агентам. Коллагеновые пептиды, представляющие собой небольшие белковые фрагменты, полученные путем гидролиза коллагена, продемонстрировали многообещающие биологические эффекты в доклинических и клинических исследованиях, включая улучшение увлажнения и эластичности кожи, а также – уменьшение морщин [5; 6]. Традиционно коллаген извлекали из наземных животных, таких как коровы и свиньи. Однако опасения, связанные с зоонозными заболеваниями (такими как бычья губчатая энцефалопатия) и религиозными ограничениями, стимулировали поиск альтернативных источников [7].

Морские источники, особенно побочные продукты рыбной промышленности и аквакультуры, такие как кожа, кости и чешуя, стали устойчивой и многообещающей альтернативой для производства коллагена и его производных пептидов [8]. Эти побочные продукты, которые могут составлять до 70% от общего веса рыбы, представляют собой богатый и в значительной степени неиспользованный ресурс, что имеет огромное значение для экономики рыбного хозяйства [9]. Морской коллаген отличается высокой биосовместимостью, высокой усвояемостью и отсутствием рисков заболеваний, связанных с наземными животными [10].

Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) – один из важных коммерческих видов рыб, широко разводимых по всему миру в системах аквакультуры. При переработке этой рыбы образуется большое количество побочных продуктов, включая кожу – богатый источник коллагена I типа. Недавние исследования по-

казали, что пептиды, полученные из белков радужной форели, обладают множественными биологическими свойствами, включая антиоксидантную, противовоспалительную и антигипертензивную активность [11; 12].

Цель данного обзора – обобщить и проанализировать современную научную литературу о биоактивных коллагеновых пептидах, полученных из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), и оценить их антивозрастное действие на дермальные фибробласты человека. Будут рассмотрены методы экстракции и химические свойства этих пептидов с акцентом на молекулярные механизмы, лежащие в основе их эффективности, включая стимуляцию синтеза коллагена, ингибирование коллаген-деградирующих ферментов, антиоксидантную активность и модуляцию соответствующих клеточных сигнальных путей. Особое внимание уделяется потенциалу этого подхода для повышения ценности побочных продуктов аквакультуры.

2. ЭКСТРАКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЛАГЕНОВЫХ ПЕПТИДОВ ИЗ КОЖИ РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ

Производство биоактивных коллагеновых пептидов – это многоэтапный процесс, который начинается с экстракции коллагена из сырья, за которой следует контролируемый гидролиз для получения пептидов с определенной молекулярной массой и функциональными свойствами. Были разработаны и применены различные методы экстракции коллагена из кожи рыб, но ферментативный гидролиз считается наиболее распространенным и эффективным для получения пептидов с высокой биологической активностью.

2.1. Методы экстракции и гидролиза

Ферментативный гидролиз – предпочтительный метод расщепления крупных молекул коллагена на более мелкие, легко усваиваемые и биологически активные пептиды. Этот процесс включает использование специфических протеаз, таких как Alcalase, папаин, бромелайн и пепсин, в контролируемых условиях температуры, pH и времени [13]. Например, исследование, проведенное Квангерснес и соавторы (2023), показало, что использование смеси ферментов папаина и бромелайна (в концентрации 0,05% каждого) при температуре 50 °C позволило получить белковый гидролизат из радужной форели со степенью гидролиза (DH) 17,24% [14]. Степень гидролиза является важным показателем степени расщепления белка и напрямую влияет на размер и функциональные свойства полученных пептидов.

После процесса гидролиза часто используются методы ультрафильтрации для разделения пептидов по диапазонам молекулярной массы. Санчес и соавторы (2018) использовали ультрафильтрационную мембрану с пределом отсека 3000 Да (Дальтон) для разделения гидролизата коллагена на две фракции: задержанную фракцию (Retained Fraction – RF), содержащую пептиды с более высокой молекулярной массой, и пермеат (Permeate Fraction – PF), содержащий пептиды с более низкой молекулярной массой. Было обнаружено, что задержанная фракция (RF) была более эффективной в стимуляции синтеза коллагена в фибробластах [4].

2.2. Физико-химические свойства и аминокислотный состав

Физико-химические свойства коллагеновых пептидов, такие как распределение молекулярной массы и аминокислотный состав, являются решающими факторами, определяющими их биологическую активность.

Распределение молекулярной массы. Исследования показали, что пептиды с разной молекулярной массой могут оказывать различное биологическое действие. Анализ с помощью эксклюзионной хроматографии показал, что молекулярная масса пептидов, полученных в результате ферментативного гидролиза кожи радужной форели, обычно находится в диапазоне от 400 до 3000 Да [4; 14]. Интересно, что пептиды с относительно более высокой молекулярной массой (в диапазоне 1-3 кДа) показали большую эффективность в стимуляции выработки коллагена I типа в дермальных фибробластах, что указывает на то, что размер может быть важен для взаимодействия с клеточными рецепторами и стимуляции биологических путей [4].

Аминокислотный состав. Коллаген характеризуется уникальным аминокислотным составом с повторяющимся мотивом Gly-X-Y, где X часто является пролином, а Y – гидроксипролином. Эта структура необходима для образования стабильной тройной спирали коллагена. Анализ аминокислотного состава белкового

гидролизата радужной форели показал высокое содержание следующих аминокислот [14] (табл. 1).

Высокое содержание глицина, пролина и гидроксипролина не только подтверждает коллагеновое происхождение пептидов, но и способствует их биологической активности. Было высказано предположение, что дипептиды, такие как Pro-Нур и Нур-Gly, которые всасываются в кровоток после приема гидролизованного коллагена, могут достигать кожи и непосредственно стимулировать фибробласты [15].

3. АНТИВОЗРАСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ НА ДЕРМАЛЬНЫЕ ФИБРОБЛАСТЫ ЧЕЛОВЕКА

Коллагеновые пептиды, полученные из кожи радужной форели, оказывают свое антивозрастное действие через комплекс взаимосвязанных молекулярных и клеточных механизмов, которые в основном нацелены на дермальные фибробласты человека.

3.1. Стимуляция синтеза коллагена

Наиболее прямым и важным эффектом коллагеновых пептидов, в борьбе со старением кожи, является их способность стимулировать фибробласты к выработке большего количества коллагена, особенно коллагена I типа. Исследование Санчеса и соавторов (2018) убедительно доказало, что обработка дермальных фибробластов человека коллагеновыми пептидами, полученными из рыбы, приводила к значительному увеличению уровня мРНК коллагена I типа. Что еще более важно, это исследование показало, что пептиды с более высокой молекулярной массой (задержанная фракция RF) были значительно более эффективными, чем пептиды с более низкой молекулярной массой (пермеат PF) через 48 час. после обработки [4]. Это говорит о том, что размер пептида может играть роль во взаимодействии с рецепторами клеточной поверхности или в регуляции экспрессии генов внутри фибробластов.

Таблица 1. Содержание основных аминокислот в белковом гидролизате радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) / **Table 1.** Content of the major amino acids in the protein hydrolysate of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

Аминокислота	Процентное содержание (%)
Глицин (Glycine)	15.50
Лизин (Lysine)	11.61
Глутаминовая кислота (Glutamic acid)	11.15
Пролин/Метионин (Proline/Methionine)	10.83
Аланин (Alanine)	7.02

Считается, что механизм этой стимуляции включает распознавание определенных пептидов, таких как Pro-Нур, рецепторами на поверхности фибробластов, что приводит к активации внутриклеточных сигнальных путей, которые усиливают транскрипцию генов коллагена [15]. Эту гипотезу подтверждает высокое содержание гидроксипролина в наиболее эффективных фракциях гидролизата коллагена [4].

3.2. Ингибирование матриксных металлопротеиназ (ММП)

Параллельно со снижением синтеза коллагена, старение кожи характеризуется повышенной активностью матриксных металлопротеиназ (ММП), семейства ферментов, ответственных за деградацию компонентов внеклеточного матрикса, включая коллаген и эластин. ММП-1 (коллагеназа) и ММП-3 (стромелизин) являются основными ферментами, участвующими в этом процессе. Исследования показали, что воздействие ультрафиолетового (УФ) излучения, основного фактора фотостарения, сильно стимулирует выработку этих ферментов в клетках кожи [16].

Из результатов исследования можно сделать вывод, что морские коллагеновые пептиды могут противодействовать этому разрушительному эффекту. Было обнаружено, что коллагеновые пептиды, полученные из различных морских источников, способны значительно снижать экспрессию ММП-1 и ММП-3 в фибробластах [17; 18]. Ингибируя эти деградирующие ферменты, коллагеновые пептиды помогают сохранить существующий запас коллагена в коже и замедлить процесс деградации внеклеточного матрикса, что способствует поддержанию структуры и эластичности кожи.

3.3. Антиоксидантная активность

Окислительный стресс, вызванный повышенной выработкой активных форм кислорода (АФК), является еще одним ключевым фактором, способствующим процессу старения кожи. АФК могут непосредственно повреждать клеточные компоненты, включая липиды, белки и ДНК, а также активировать сигнальные пути, которые приводят к увеличению выработки ММП и снижению синтеза коллагена. Многочисленные исследования показали, что пептиды, полученные из белков радужной форели, обладают мощными антиоксидантными свойствами [11;12].

Исследование, проведенное Бартоломеи и соавторами (2023), показало, что гидролизат белка радужной форели (FPH) проявлял антиоксидантную активность в нескольких тестах

in vitro, включая DPPH, FRAP, ORAC и ABTS. Что еще более важно в результатах исследования, что этот гидролизат способен снижать уровни активных форм кислорода (АФК) и перекисного окисления липидов, вызванные перекисью водорода (H_2O_2), в клетках кишечника человека Caco-2 [12]. Хотя это исследование проводилось на клетках кишечника, эти антиоксидантные свойства, вероятно, применимы и к клеткам кожи, обеспечивая дополнительный механизм защиты от повреждений, вызванных старением.

3.4. Модуляция клеточных сигнальных путей

Действие коллагеновых пептидов выходит далеко за рамки простого предоставления строительных блоков для нового коллагена; они действуют как сигнальные молекулы, которые могут модулировать ключевые клеточные пути, регулирующие гомеостаз внеклеточного матрикса.

Сигнальный путь трансформирующего фактора роста бета (TGF-β). Сигнальный путь TGF-β/Smad является одним из ключевых регуляторов синтеза коллагена в фибробластах. Исследование Джонстона и Гиллиса (2017) показало, что TGF-β1 стимулирует синтез коллагена в сердечных фибробластах радужной форели, что указывает на эволюционную консервативность этого пути [19]. Данные свидетельствуют, что коллагеновые пептиды могут влиять на этот путь, что приводит к увеличению выработки коллагена. Например, исследование пептидов коллагена рыбы роху (*Labeo rohita*) показало, что они увеличивают продолжительность жизни кожи за счет модуляции сигнального пути TGF-β/Smad [20].

Сигнальный путь ядерного фактора каппа В (NF-κB): Сигнальный путь NF-κB – ключевой провоспалительный путь, который активируется окислительным стрессом и УФ-излучением, и его активация приводит к увеличению выработки ММП и воспалительных цитокинов. На основании исследований Янга и соавторов (2019) выяснилось, что морские коллагеновые пептиды способствуют пролиферации фибробластов NIH-3T3 через сигнальный путь NF-κB [21]. Хотя это может показаться противоречивым, модуляция этого пути может иметь различные эффекты, в зависимости от клеточного контекста и типа пептида, и может способствовать процессам клеточного восстановления и регенерации.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные данные убедительно доказывают целесообразность использования биоактивных коллагеновых пептидов, получен-

ных из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) в качестве эффективного средства для борьбы со старением кожи. Результаты различных исследований сходятся воедино, формируя целостную картину многогранных механизмов, посредством которых эти пептиды оказывают свое благотворное воздействие на дермальные фибробласты человека.

Одним из наиболее интересных аспектов является двойственная роль, которую играют эти пептиды. С одной стороны они стимулируют анаболические пути, увеличивая экспрессию гена коллагена I типа, что жизненно важно для восстановления деградировавшего внеклеточного матрикса. С другой стороны, они подавляют катаболические пути, ингибируя активность ключевых ферментов ММП, например, ММП-1, которые активируются под действием внешних факторов, таких как УФ-излучение. Этот двойной эффект – усиление синтеза и уменьшение деградации – позиционирует коллагеновые пептиды как комплексное средство для поддержания гомеостаза внеклеточного матрикса.

Открытие того, что пептиды с более высокой молекулярной массой (в диапазоне 1-3 кДа) более эффективны в стимуляции синтеза коллагена [4], имеет важные последствия для производства и разработки функциональных ингредиентов. Это говорит о том, что эффективность связана не только с аминокислотным составом, но и с трехмерной структурой и размером пептидов, что может позволить им более эффективно взаимодействовать с рецепторами фибробластов. Это подчеркивает важность точного контроля процесса гидролиза и последующей фильтрации для оптимизации биологической эффективности конечного продукта.

Более того, антиоксидантная активность, продемонстрированная пептидами, полученными из радужной форели [11; 12], добавляет еще один уровень защиты. Нейтрализуя активные формы кислорода, эти пептиды не только защищают клетки от прямого повреждения, но и могут косвенно предотвращать активацию провоспалительных сигнальных путей (таких как NF-κB), которые приводят к увеличению выработки ММП. Эта антиоксидантная активность, наряду с модуляцией ключевых сигнальных путей, таких как TGF-β, демонстрирует как эти пептиды могут влиять на микроокружение кожи на нескольких уровнях для достижения комплексного антивозрастного эффекта.

Использование побочных продуктов аквакультуры, таких как кожа радужной форели, полностью соответствует принципам циркулярной экономики и устойчивого развития. Вместо того чтобы утилизировать эти

материалы как отходы, их можно превратить в продукты с высокой добавленной стоимостью, имеющие применение в косметической и пищевой промышленности. Такой подход не только снижает воздействие рыбной промышленности на окружающую среду, но и обеспечивает безопасный и надежный источник коллагена, избегая рисков и ограничений, связанных с традиционными животными источниками.

Несмотря на многообещающие результаты, необходимо дальнейшее изучение. Большинство рассмотренных исследований были проведены *in vitro*. Необходимы клинические примеры на людях для подтверждения этих эффектов *in vivo* и определения оптимальных доз и способов введения (местного или перорального). Кроме того, идентификация и характеристика отдельных пептидных последовательностей, ответственных за специфическую биологическую активность, позволит в будущем разрабатывать более целенаправленные и эффективные ингредиенты.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся научные данные убедительно свидетельствуют о том, что биоактивные коллагеновые пептиды, полученные из кожи радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), представляют собой многообещающую и многогранную стратегию борьбы со старением кожи. Благодаря своим синергетическим механизмам действия, которые включают прямую стимуляцию синтеза коллагена I типа в дермальных фибробластах, ингибирование коллаген-деградирующих ферментов (ММП), обеспечение мощной защиты от окислительного стресса и модуляцию жизненно важных клеточных сигнальных путей, эти пептиды демонстрируют комплексную способность восстанавливать гомеостаз внеклеточного матрикса и поддерживать структурную целостность кожи. Использование устойчивых побочных продуктов аквакультуры для производства этих высокоценных ингредиентов не только повышает их коммерческую и экологическую привлекательность, но и открывает новые горизонты для разработки инновационных и эффективных косметических и пищевых продуктов, направленных на поддержание здоровья кожи и замедление признаков старения. Необходимы дальнейшие клинические исследования для подтверждения этих преимуществ у людей и определения оптимальных составов и дозировок, однако неоспоримый потенциал этих морских пептидов для экономики рыбного хозяйства очевиден.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Вклад авторов в работу: **Рашид Л.М.Р.** – идея и концепция обзора, поиск и анализ литературных источников, систематизация данных, подготовка текста рукописи; **Турицин В.С.** – научное руководство, корректировка текста, окончательная проверка и утверждение рукописи.

The authors declare that there is no conflict of interest. Author contributions: **Rashid L.M.R.** – conception and design of the review, literature search and analysis, data systematization, manuscript preparation; **Turitsin V.S.** – scientific supervision, manuscript revision, final review and approval.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ/ REFERENCES AND SOURCES

- Ganceviciene, R., Liakou, A. I., Theodoridis, A., Makrantonaki, E., & Zouboulis, C. C. (2012). Skin anti-aging strategies. *Dermato-endocrinology*, 4(3), 308-319.
- Zhang, S., & Duan, E. (2018). Fighting against Skin Aging: The Way from Bench to Bedside. *Cell transplantation*, 27(5), 729-738.
- Shoulders, M. D., & Raines, R. T. (2009). Collagen structure and stability. *Annual review of biochemistry*, 78, 929-958.
- Sanchez, A., Blanco, M., Correa, B., Perez-Martin, R. I., & Sotelo, C. G. (2018). Effect of Fish Collagen Hydrolysates on Type I Collagen mRNA Levels of Human Dermal Fibroblast Culture. *Marine drugs*, 16(5), 144.
- Proksch, E., Segger, D., Degwert, J., Schunck, M., Zague, V., & Oesser, S. (2014). Oral supplementation of specific collagen peptides has beneficial effects on human skin physiology: a double-blind, placebo-controlled study. *Skin pharmacology and physiology*, 27(1), 47-55.
- Kim, D. U., Chung, H. C., Choi, J., Sakai, Y., & Lee, B. Y. (2018). Oral Intake of Low-Molecular-Weight Collagen Peptide Improves Hydration, Elasticity, and Wrinkling in Human Skin: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Study. *Nutrients*, 10(7), 826.
- Geahchan, S., Baharlouei, P., & Rahman, A. (2022). Marine Collagen: A Promising Biomaterial for Wound Healing, Skin Anti-Aging, and Bone Regeneration. *Marine drugs*, 20(1), 61.
- Coppola, D., Oliviero, M., Vitale, G. A., Lauritano, C., D'Ambra, I., Iannace, S., & de Pascale, D. (2020). Marine Collagen from Alternative and Sustainable Sources: Extraction, Processing and Applications. *Marine drugs*, 18(4), 214.
- Ahmed, R., Haq, M., & Chun, B. S. (2019). Characterization of fish gelatin from horse mackerel (*Trachurus japonicus*) skin. *Journal of food science and technology*, 56(11), 4949-4959.
- Silva, T. H., Moreira-Silva, J., Marques, A. L., Domingues, A., Bayon, Y., & Reis, R. L. (2014). Marine origin collagens and its potential applications. *Marine drugs*, 12(12), 5881-5901.
- Escamilla-Rosales, M. F., Pérez-Escalante, E., Jara-Gutiérrez, C. E., Santana-Sepúlveda, P. A., Álvarez-Álvarez, C. A., Castañeda-Ovando, A., & González-Olivares, L. G. (2024). Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) proteins as a source of antioxidant peptides with promising anticancer activity. *Future Foods*, 10, 100509.
- Bartolomei, M., Cropotova, J., Bollati, C., Kvangarsnes, K., et al. (2023). Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) as Source of Multifunctional Peptides with Antioxidant, ACE and DPP-IV Inhibitory Activities. *Nutrients*, 15(4), 829.
- Blanco, M., Vázquez, J. A., Pérez-Martín, R. I., & Sotelo, C. G. (2017). Hydrolysates of fish skin collagen: An opportunity for valorizing fish industry byproducts. *Marine drugs*, 15(5), 131.
- Kvangarsnes, K., Dauksas, E., Tolstorebrov, I., Rustad, T., Bartolomei, M., Xu, R., Lammi, C., & Cropotova, J. (2023). Physicochemical and functional properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hydrolysate. *Heliyon*, 9(7), e17979.
- Shigemura, Y., Iwai, K., Morimatsu, F., Iwamoto, T., Mori, T., Oda, C., Taira, T., Park, E. Y., Nakamura, Y., & Sato, K. (2009). Effect of prolyl-hydroxyproline (Pro-Hyp), a food-derived collagen peptide in human blood, on growth of fibroblasts from mouse skin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(2), 444-449.
- Pittayapruek, P., Meehansan, J., Prapapan, O., Komine, M., & Ohtsuki, M. (2016). Role of Matrix Metalloproteinases in Photoaging and Photocarcinogenesis. *International journal of molecular sciences*, 17(6), 868.
- Zhang, X., Zhuang, H., Wu, S., Mao, C., Dai, Y., & Chen, F. (2024). Marine bioactive peptides: anti-photoaging mechanisms and potential skin protective effects. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(2), 1261-1281.
- De Luca, C., Mikhail'chik, E. V., Suprun, M. V., Papacharalambous, M., Truhanov, A. I., & Korkina, L. G. (2016). Skin Antiageing and Systemic Redox Effects of Supplementation with Marine Collagen Peptides and Plant-Derived Antioxidants: A Single-Blind Case-Control Clinical Study. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2016, 4389410.
- Johnston, E. F., & Gillis, T. E. (2017). Transforming growth factor beta-1 (TGF-β1) stimulates collagen synthesis in cultured rainbow trout cardiac fibroblasts. *The Journal of experimental biology*, 220(Pt 14), 2645-2653.
- Kim, H. D., Chang, Y. B., Suh, H. J., Han, S. H., Jang, E. Y., Sun, E. M., ... & Kim, Y. S. (2025). Enhancement of skin longevity through TGF-β/Smad signaling pathway modulation by Rohu fish (*Labeo rohita*) collagen peptides in chronologically aged hairless mice. *Food Bioscience*, 100863.
- Yang, F., Jin, S., & Tang, Y. (2019). Marine Collagen Peptides Promote Cell Proliferation of NIH-3T3 Fibroblasts via NF-κB Signaling Pathway. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 24(22), 4201.

Материал поступил в редакцию / Received 18.03.2026
Принят к публикации / Accepted for publication 07.05.2026