

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОСТИМУЛЯТОРНОЙ АКТИВНОСТИ ГИДРОЛИЗАТОВ КОЛЛАГЕНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРИДАТОЧНЫХ КОРНЕЙ ЧЕРЕНКОВ ТОПОЛЯ «ПИРАМИДАЛЬНО-ОСОКОРЕВЫЙ КАМЫШИНСКИЙ»

Брындина Лариса Васильевна[✉], Репникова Людмила Александровна,
Корчагина Анна Юрьевна, Живитченко Дарья Ивановна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г. Ф. Морозова», Воронеж, Россия
bryndinv@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния биостимулятора из коллагеновых отходов животного и рыбного происхождения на корнеобразование у черенков тополя «Пирамидально-осокоревый Камышинский». Проведена предварительная обработка коллагенового сырья NaOH для частичного его разрушения. Определены оптимальные концентрации NaOH, обеспечивающие необходимую скорость расщепления коллагена для последующей ферментации сырья культурой актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570. Установлено, что увеличение концентрации NaOH от 0,2 % до 0,8 % ускоряет гидролиз обоих видов коллагена за счет активного расщепления пептидных связей. Но рыбный коллаген более чувствителен к щелочной обработке и легче гидролизуется. Степень гидролиза рыбного коллагена была в 1,8–2,1 раза выше животного. Выявлено, что после предварительной обработки щелочью ферментативный гидролиз рыбного коллагена протекает интенсивнее. Степень гидролиза в среднем увеличилась для животного коллагена на 24,9 %, для рыбного – на 30,1 %. Фракционный состав коллагеновых гидролизатов показал, что в животном гидролизате преобладают пептидные фракции, а в рыбном – аминокислотные. Выявлена тенденция стимулирующего эффекта пептидных фракций коллагеновых гидролизатов на корнеобразование у черенков тополя «Пирамидально-осокоревый Камышинский». Определены морфометрические показатели черенков тополя «Пирамидально-осокоревый Камышинский» после обработки их коллагеновыми гидролизатами. Количество сформированных корней и общая корневая масса черенков, обработанных гидролизатом животного коллагена, были в 1,8 раза и 1,6 раза больше, чем у черенков, обработанных гидролизатом рыбного коллагена. Фитомасса листового аппарата при выдержке черенков в гидролизате животного коллагена также была больше на 14,3 % относительно варианта с гидролизатом рыбного коллагена.

Ключевые слова: биостимулятор для растений, коллагеновый гидролизат, укоренение черенков, тополь, животный коллаген, рыбный коллаген.

Для цитирования: Сравнительная оценка биостимуляторной активности гидролизатов коллагена при формировании придаточных корней черенков тополя «Пирамидально-осокоревый Камышинский» / Л. В. Брындина, Л. А. Репникова, А. Ю. Корчагина, Д. И. Живитченко // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №4(84). С. 38-48. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_38-48.

Актуальность. Управление ростом растений, их развитием и минимизация негативно-го влияния стрессов на протяжении жизненного цикла — ключевые условия повышения их продуктивности. Биотические и абиотические стрессы существенно снижают эти процессы, однако механизмы их преодоления изучены недостаточно. Абиотические стрессы можно в некоторой степени устранить за счет изменения условий выращивания, включая обеспечение растений водой, питательными веществами и регуляторами роста, такими, как ауксины, ци-

токинины, гиббереллины и др. Кроме классических способов все шире начинают использоваться биостимуляторы. Они способствуют улучшению физиологических процессов растений, увеличивая их устойчивость и продуктивность.

Биостимуляторы, получаемые из природных компонентов, на протяжении последних 25 лет привлекают внимание как научного сообщества, так и коммерческих компаний [7, 8, 13, 15, 22, 25]. Они открывают новые возможности для стимуляции роста, снижения стрессовой нагрузки.

Среди таких соединений особое место занимают белковые гидролизаты – комплексы пептидов и аминокислот, образующиеся в результате химического или ферментативного расщепления белков растительного либо животного происхождения [1, 6, 9, 21, 24].

Разрушение белковой структуры приводит к высвобождению не только свободных аминокислот, но и растворимых пептидов, содержание которых зависит от выбранного метода гидролиза. В частности, ферментативный гидролиз способствует преимущественному накоплению пептидов, тогда как химический – в большей мере приводит к образованию отдельных аминокислот.

Результаты исследований показывают, что именно пептиды, а не свободные аминокислоты выполняют ведущую функцию в физиологических процессах растений.

Они активируют защитные механизмы, регулируют рост и развитие через взаимодействие с клеточными рецепторами растения по принципу «ключ-замок». Каждый пептид приспосабливается к специфическому белку мембраны клетки и стимулирует ее физиологическую и биохимическую функцию.

Так, эксперименты с соевым гидролизатом показали, что выделенный из него пептид LRPP [20] запускает у растений ответные реакции, направленные на формирование вторичной корневой системы, что приводит к увеличению числа корней в 1,5–2 раза.

Исследования Cerdán и соавт. подтверждают благоприятное воздействие белковых гидролизатов на питание растений. Обработка растений такими гидролизатами повышает биодоступность минеральных элементов, что обусловлено способностью пептидов и аминокислот образовывать комплексы с питательными веществами и препятствовать их переходу в нерастворимые формы [11].

Кроме того, белковые гидролизаты способствуют повышению устойчивости растений к абиотическим стрессовым факторам, включая экстремальные температуры, засоление почвы, засуху и недостаточную освещенность.

В исследовании применения биостимулятора на основе пептидов растительного происхождения было установлено, что белковые гидролизаты способствовали более высокому содержанию азота и фосфора в надземных тканях растений, что приводило к увеличению урожайности [17].

В других научных работах использование пептона (гидролизата белков животного происхождения) ускорило образование новых корней,

цветение и завязывание плодов у растений земляники, подвергшихся стрессу в результате пересадки и воздействия очень низких температур окружающей среды [10, 18].

В России был разработан способ получения кислотного гидролизата коллагена как стимулятора роста и развития растений [12].

Исследования, направленные на раскрытие механизмов, регулирующих эти эффекты, показывают, что белковые гидролизаты могут непосредственно влиять на растения, стимулируя метаболизм углерода и азота. Кроме того, благотворное влияние белковых гидролизатов также может быть связано со стимуляцией растительных микробиомов. Растения колонизируются обильным и разнообразным ассортиментом микробных таксонов, которые могут помочь им приобретать питательные вещества, воду и противостоять биотическому стрессу [5].

Как было отмечено выше, в качестве источника гидролизованного белка может выступать широкий спектр белоксодержащих веществ. Но с учетом принципов циркулярной экономики, направленной на минимизацию отходов и эффективное использование ресурсов путем их повторного использования, стоит отдать предпочтение коллагеновым отходам мясной и рыбной промышленности. Рост производства мяса и рыбы неизбежно сопровождается увеличением объемов образующихся отходов. По данным [1, 2, 16, 19], отходы мясоперерабатывающих предприятий могут составлять до 50 % перерабатываемого сырья. Отходы рыбопереработки могут достигать от 20 до 70 % массы переработанной рыбы [4].

Цель исследования – получить гидролизаты животных и рыбных коллагенов и сравнить их влияние как биостимуляторов на образование придаточных корней черенков тополя «Пирамидально-осокоревый Камышинский».

Среди различных видов тополей, высаживаемых в городской среде, этот вид является достаточно популярным, что объясняется рядом положительных характеристик: высокая засухоустойчивость, быстрый рост и, как следствие, накопление фитомассы. Узкая, компактная пирамидальная крона, стройный, «кипарисовидный» габитус создает аккуратные вертикали в городском ландшафте. Занимает минимум места в ширину, что критично для узких улиц, тротуаров, участков рядом со зданиями, линиями электропередач.

Материал и методы. Предварительная обработка коллагена оказывает влияние на его функциональные свойства, биодоступ-

ность. Для получения биостимулятора коллагеновое сырье (свиная шкура и шкура прудовых рыб) предварительно промывали дистиллированной водой, измельчали до состояния фарша, а затем подвергали термической обработке в автоклаве в течение 20 минут при давлении 0,1 МПа и гидромодуле 1:6 с добавлением NaOH. Концентрацию NaOH варьировали в диапазоне от 0,2 % до 0,8 %.

После охлаждения в течение 5–7 минут до температуры 30–35 °С и нейтрализации pH сырье подвергалось ферментации с использованием культуры актиномицета *Streptomyces fradiae* AC-570. Процесс проводили при температуре 30–35 °С, pH 6,5–7,5 и концентрации микробной культуры 10 % в шейкер-инкубаторе при частоте вращения 200 об/мин в течение 36 часов. Культуру микроорганизма выращивали на среде CP-1 с крахмалом следующего состава (г/дм³): KNO₃ – 1,0; K₂HPO₄ – 0,5; NaCl – 0,5; MgSO₄ – 0,5; CaCO₃ – 1,0; FeSO₄ – 0,001; крахмал – 10; агар – 20. Используемый штамм обладает протеолитическим ферментным комплексом с протеолитической активностью 1900 ед/г и эластазной активностью 7700 ед/г.

По окончании ферментации коллагеновые гидролизаты центрифугировали на центрифуге Liston C 2203 при 1000 об/мин, отделяли центрифугат и использовали его для обработки черенков в течение 24 часов при температуре 22–24 °С. После обработки черенки высаживали в торф, а учет результатов проводили через 20 дней. Черенки тополя готовили в соответствии с ГОСТ 17267-71.

Содержание белка в исходном сырье определяли по ГОСТ 25011, а аминный азот — методом Серенсена.

Степень гидролиза (СГ), %, белка определяли по формуле

$$\text{СГ} = \frac{N_0 - N_1}{N_2 - N_1} \times 100,$$

где NO – содержание общего азота, %;

N₁ – содержание аминного азота в негидролизованном сырье, %;

N₂ – содержание аминного азота в гидролизате после гидролиза, %.

Фракционный состав гидролизата определяли следующим образом:

Для осаждения негидролизированных белков к 20 см³ гидролизата добавляли 10 см³ 60 %-ной трихлоруксусной кислоты. Через 20 минут образовавшийся осадок белков отделяли фильтрованием и промывали 10 см³ 5 %-ной трихлоруксус-

ной кислоты. Полученный фильтрат использовали для определения суммарного содержания пептидов и свободных аминокислот. Осадок, оставшийся на фильтре, растворяли в 0,1 н растворе NaOH, после чего по биуретовой реакции определяли количество негидролизованного (остаточного) белка. Оптическую плотность надосадочной жидкости измеряли на фотоэлектрокolorиметре КФК-56М при длине волны 570–580 нм.

В фильтрат, полученный после осаждения белков, вносили 1 см³ концентрированной H₂SO₄ и 6 см³ 25 %-ного раствора фосфорновольфрамовой кислоты. Через 24 часа выпавший осадок пептидов отфильтровывали и промывали 15 см³ 5 %-ной H₂SO₄. Полученный фильтрат использовали для определения суммы свободных аминокислот. Осадок пептидов растворяли в 0,1 н NaOH и по биуретовой реакции определяли их количество. Оптическую плотность надосадочной жидкости измеряли на фотоэлектрокolorиметре КФК-56М при 570–580 нм.

Расчет содержания пептидов и белков проводили по формуле:

$$X = \frac{D \times 100}{2,65 \times a}, \%,$$

где D – оптическая плотность;

a – объем исследуемой пробы, см³.

В фильтрате, полученном после осаждения пептидов, доводили pH до 6,5–7,0 с помощью 1 н раствора NaOH и проводили нингидриновую реакцию. Оптическую плотность измеряли при 570 нм на фотоэлектрокolorиметре КФК-56М.

Содержание суммы свободных аминокислот рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{(27,9 \times D) \times 100}{a}, \%,$$

где D – оптическая плотность;

a – объем исследуемой пробы, см³.

Морфометрические показатели укорененных черенков регистрировали в каждом варианте опыта. Каждый вариант включал 20 биологических повторов (n = 20). Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа (ANOVA) в соответствии с методикой Б. А. Доспехова [3].

Опыт рассматривался как однофакторный с пятью вариантами (концентрации NaOH: 0 % – контроль, 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 %) и двадцатью повторностями в каждом. Для оценки достоверности влияния изучаемого фактора рассчитыва-

ли фактическое значение критерия Фишера (F), которое сравнивали с табличными значениями $F_{0,05}$ и $F_{0,01}$ при соответствующих степенях свободы. При наличии достоверных различий между вариантами определяли наименьшую существенную разность (НСР) на 5 %-ном и 1 %-ном уровнях значимости по формуле:

$$НСР\alpha = t\alpha\sqrt{2 \cdot MS_{ост}/r},$$

где $t\alpha$ – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы остатка;

$MS_{ост}$ – остаточная дисперсия;

r – число повторностей.

Средние значения представлены в виде $M \pm SE$ (среднее \pm стандартная ошибка среднего). Буквенные обозначения в таблицах отражают результаты сравнения средних по НСР: варианты, помеченные одинаковыми буквами, не различаются достоверно при $p > 0,05$.

Результаты и обсуждение. Коллаген имеет уникальную структуру с тройной спиралью, богатой глицином, пролином и гидроксипролином. Как уже отмечалось выше, эта структура довольно устойчива, поэтому для ее расщепления нужны определенные условия. Процесс протеолиза коллагена на более мелкие пептиды и аминокислоты можно усилить с помощью щелочного гидролиза. Щелочь способствует набуханию коллагена за счет разрушения водородных связей и ионных взаимодействий. Это облегчает доступ OH^- к пептидным связям, ионы OH^- атакуют пептидные связи, приводя к их разрыву и ускоряя гидролиз.

Но на биологическую ценность конечного продукта существенное влияние оказывает концентрация щелочи. Слишком высокая концентрация может вызвать разложение самих аминокислот, особенно тех, которые чувствительны к щелочам, например, серин, треонин, цистеин. Это приведет к образованию побочных продуктов и потере некоторых аминокислот. А при низких концентрациях гидролиз идет медленно, так как недостаточно гидроксид-ионов (OH^-) для эффективного разрыва пептидных связей.

В связи с вышеизложенным проведены исследования по определению оптимальной концентрации NaOH, обеспечивающей достаточную скорость расщепления коллагена для последующей ферментации. Эффективность воздействия щелочи на степень гидролиза коллагенового сырья представлена на рисунке 1.

Увеличение концентрации NaOH от 0,2 % до 0,8 % ускоряет гидролиз обоих видов коллагена за счет более активного расщепления пеп-

тидных связей. Но рыбный коллаген оказался чувствительнее к щелочной обработке и легче гидролизировался. Так, если в контрольных образцах степень гидролиза животного и рыбного коллагена отличалась на 3,2 %, то уже при концентрации NaOH 0,2 % и 0,4 % степень гидролиза рыбного коллагена была в 1,8 – 2,1 раза выше животного. Это связано с меньшим содержанием пролина и гидроксипролина, что делает его менее термостабильным [26].

При дальнейшем росте концентрации щелочи эта разница снижалась, но положительная динамика щелочной предварительной обработки животного и рыбного коллагенового сырья сохранялась. Возрастание концентрации NaOH до 0,8 % повысило степень гидролиза животного и рыбного коллагена в 2,5 и 1,8 раза соответственно относительно концентрации 0,2 %.

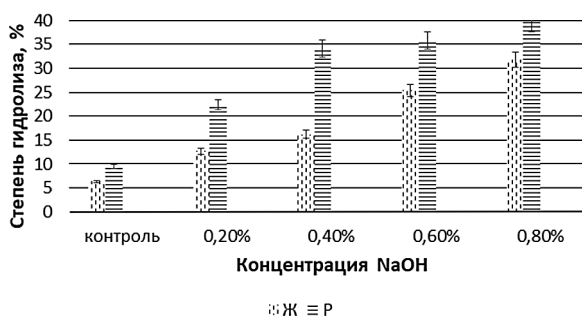


Рисунок 1 – Влияние предварительной обработки коллагенового сырья NaOH на степень его гидролиза:

Ж – животный коллаген; Р – рыбный коллаген

Для максимального усиления гидролиза коллагенового сырья после щелочной и термической подготовки была проведена его ферментация культурой актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570. Результаты эксперимента представлены на рисунке 2.

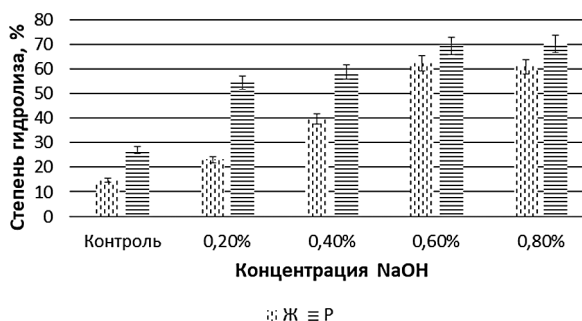


Рисунок 2 – Синергический эффект предварительной обработки коллагенового сырья NaOH и ферментации культурой актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570:

Ж – животный коллаген; Р – рыбный коллаген

Внесение культуры актиномицета в сравнении с ферментацией ферментными препаратами дает возможность саморегуляции дальнейшего процесса гидролиза. Микроорганизмы продолжают вырабатывать ферменты в течение всего процесса, а более сложный спектр действия нескольких протеаз позволяет расщеплять пептидные связи, недоступные для конкретного специфичного фермента.

Полученные экспериментальные данные (рис. 2) свидетельствуют о существенном повышении степени гидролиза коллагенового сырья после культивирования актиномицетом *Streptomyces fradiae* AC – 570. Однако следует отметить, что ферментация рыбного коллагена протекала интенсивнее. Согласно полученным данным, степень гидролиза в среднем увеличилась для животного коллагена на 24,9 %, для рыбного – на 30,1 %. Это подтверждает тот факт, что ферменты, выделяемые *Streptomyces fradiae* AC – 570, целенаправленно расщепляют оставшиеся пептидные связи в предварительно «раскрытой» структуре коллагена, увеличивая содержание биоактивных пептидов в конечном продукте.

Степень гидролиза напрямую влияет на свойства коллагеновых пептидов, поскольку их функциональные и биологические характеристики определяются молекулярным размером, составом аминокислот и их последовательностью в гидролизате. Специфическая тройная спиральная конформация коллагена делает

его плохо усваиваемым в нативном виде, однако чрезмерный гидролиз может привести к разрушению структурных мотивов, необходимых для проявления функциональной или биологической активности, в результате чего образуются пептиды, лишенные полезных свойств [12, 23], что указывает на важность регулирования степени гидролиза для максимального повышения функциональности пептидов. Следовательно, взаимосвязь между степенью гидролиза и функцией коллагена является сложной, что требует дальнейших исследований для изучения потенциальных коллагеновых пептидов с высокой физиологической активностью.

Фракционный состав коллагеновых гидролизатов представлен в таблицах 1 и 2. Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных показал, что после 12 ч ферментации животного коллагена наблюдается преобладание в гидролизате пептидной фракции при всех концентрациях щелочи. Максимальное их накопление соответствовало концентрации NaOH 0,6 %. Эта тенденция сохраняется при дальнейшем увеличении продолжительности гидролиза, но к 48 ч резко увеличивается доля свободных аминокислот при концентрации NaOH 0,4–0,8 %.

Иная картина складывается при деструкции рыбного коллагена. Уже в первые часы видно присутствие в гидролизате значительного количества растворимого белка. Дальнейшая ферментация приводит к высокому содержа-

Таблица 1 – Фракционный состав гидролизата животного коллагена после гидролиза *Streptomyces fradiae* AC – 570

Вариант опыта*	Продолжительность гидролиза, ч														
	0			12			24			36			48		
	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты
К	4,0±0,1	1,1±0,3	0	5,2±0,1	3,6±0,1	0,3±0,1	6,2±0,2	4,7±0,1	0,5±0,2	8,1±0,2	5,9±0,2	0,7±0,2	12,3±0,4	6,4±0,2	1,0±0,3
1	5,3±0,2	1,5±0,5	0	6,4±0,2	7,4±0,2	0,5±0,2	7,0±0,2	13,1±0,4	0,7±0,2	7,5±0,2	14,5±0,4	1,1±0,3	7,1±0,2	28,6±0,9	2,7±0,7
2	6,8±0,2	1,9±0,6	0	7,5±0,2	13,2±0,4	0,9±0,3	7,9±0,2	21,6±0,6	1,8±0,5	6,2±0,2	31,3±0,9	2,1±0,6	5,8±0,2	29,5±0,9	20,9±0,5
3	8,5±0,2	2,0±0,6	0	10,3±0,3	36,8±0,1	2,3±0,7	7,8±0,2	47,2±0,4	3,5±0,1	5,2±0,2	52,8±0,6	4,1±0,2	4,7±0,1	37,9±0,1	23,3±0,7
4	9,0±0,3	2,8±0,8	0	7,8±0,2	21,1±0,6	4,6±0,4	5,5±0,2	41,9±0,2	5,2±0,6	4,7±0,2	46,3±0,4	9,8±0,9	3,5±0,1	31,4±0,9	29,9±0,9

Примечание: *К – контроль; предварительная обработка NaOH: 1 – 0,2 %; 2 – 0,4 %; 3 – 0,6 %; 4 – 0,8 %.

нию в растворе свободных аминокислот, которое к 48 часам процесса в 3,1-10,1 раза превышает долю пептидов в зависимости от концентрации щелочи. Таким образом, можно отметить, что предварительная обработка щелочью оказывала положительное влияние на разрушение нативного коллагена и обеспечивала эффективное протекание дальнейшей его ферментации актиномицетом *Streptomyces fradiae* AC – 570. Но в животном коллагене преобладала в основном пептидная фракция, а в рыбном – свободные аминокислоты.

Последующие исследования были направлены на обработку черенков тополя сорта «Пи-

раמידально-осоконовый Камышинский» полученными коллагеновыми гидролизатами. Согласно результатам проведенных экспериментов установлено, что совместное воздействие NaOH и культуры микроорганизма *Streptomyces fradiae* AC-570 на коллагеновое сырье оказывает значительное влияние на процесс укоренения черенков данного сорта тополя (табл. 3).

Лучшая ответная реакция отмечена при воздействии 0,2 % NaOH на рыбный коллаген и 0,6 % NaOH – на животный. Возможно, у рыбного коллагена формирование пептидов, стимулирующих корнеобразование, происходит при меньшей концентрации щелочи из-за

Таблица 2 – Фракционный состав гидролизата рыбного коллагена после гидролиза *Streptomyces fradiae* AC – 570

Вариант опыта*	Продолжительность гидролиза, ч														
	0			12			24			36			48		
	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты	растворимый белок	пептиды	аминокислоты
К	8,8±0,3	1,4±0,4	0	10,5±0,3	2,6±0,1	3,3±0,1	7,4±0,2	11,2±0,3	4,1±0,1	6,5±0,2	15,1±0,4	5,3±0,2	5,7±0,2	13,4±0,4	9,4±0,3
1	15,3±0,1	2,7±0,1	0	15,6±0,1	10,9±0,3	8,3±0,2	4,8±0,1	24,1±0,1	16,4±0,1	3,5±0,1	30,1±0,1	20,7±0,6	2,9±0,1	14,1±0,4	43,2±0,3
2	18,3±0,6	4,2±0,2	0	14,8±0,4	17,1±0,5	14,5±0,4	4,0±0,1	23,4±0,7	26,4±0,8	3,3±0,1	16,0±0,5	39,2±0,1	2,7±0,1	12,4±0,4	50,4±0,5
3	25,1±0,8	6,5±0,2	0	14,2±0,4	24,7±0,7	17,3±0,5	3,4±0,1	22,6±0,7	38,7±0,1	3,0±0,9	14,8±0,4	51,6±0,5	2,5±0,1	7,7±0,2	60,1±0,8
4	31,0±0,9	7,2±0,2	0	3,7±0,1	25,0±0,7	31,4±0,9	3,2±0,1	15,2±0,5	47,9±0,4	2,9±0,9	4,8±0,1	62,4±0,9	2,5±0,1	6,5±0,2	65,5±0,2

Примечание: *К – контроль; предварительная обработка NaOH: 1 – 0,2 %; 2 – 0,4 %; 3 – 0,6 %; 4 – 0,8 %.

Таблица 3 – Морфометрические показатели черенков тополя «Пирамидально-осоконовый Камышинский»

Вариант	Общая масса корней, г		Количество корней, шт.		Общая масса листьев, г		Количество листьев, шт.		Масса черенка, г	
	животн.	рыбн.	животн.	рыбн.	животн.	рыбн.	животн.	рыбн.	животн.	рыбн.
Контроль	0,23±0,07с	0,08±0,02d	7,85±0,38a	8,55±0,35a	1,008±0,008b	0,979±0,009b	10,75±0,32b	10,90±0,29b	7,14±0,06b	11,40±0,05e
0,2%	0,22±0,07с	0,30±0,09a	12,05±0,43b	12,25±0,39b	0,853±0,016d	1,055±0,012a	11,75±0,32b	12,65±0,36a	6,17±0,04a	9,56±0,02d
0,4%	0,30±0,07b	0,14±0,06с	12,00±0,42b	11,50±0,37b	0,942±0,014с	1,043±0,009a	10,10±0,35b	10,40±0,47b	6,74±0,04b	9,10±0,02с
0,6%	0,49 ±0,01a	0,14±0,04с	22,65±0,49с	8,25±0,35a	1,206±0,008a	0,903±0,011с	13,65±0,47a	10,00±0,31b	9,00±0,05d	5,63±0,04a
0,8%	0,40±0,08b	0,10±0,03d	12,00±0,45b	6,45±0,34с	0,977±0,009b	0,931±0,014с	9,20±0,33с	10,20±0,36b	8,17±0,02с	8,12±0,02b
HCP _{0,05}	0,20	0,25	1,02	0,81	0,032	0,031	1,01	1,02	1,98	1,98

его более слабых структурных связей, тогда как для коллагена животных требуется больше щелочи для достижения аналогичного профиля пептидов. При этом гидролизат животного коллагена во всех опытах оказывал больший стимулирующий эффект, чем гидролизат рыбного коллагена.

Количество сформированных корней и общая корневая масса черенков, обработанных гидролизатом животного коллагена, были в 1,8 раза и 1,6 раза больше, чем у черенков, обработанных гидролизатом рыбного коллагена.

Обработка 0,6 % NaOH в животном коллагене достоверно повышала массу корней и их количество по сравнению с контролем и 0,2 %-ной обработкой. В рыбном коллагене такой эффект был отмечен при 0,2 %-ной обработке NaOH. А концентрация 0,8 % NaOH оказывала угнетающее действие. Видимо, в гидролизате животного коллагена при концентрации NaOH 0,6 % образуется больше биоактивных пептидов, которые действуют как сигналы растительных гормонов, стимулируя корнеобразование сильнее, чем пептиды рыбного коллагена. Гидролизаты коллагена млекопитающих содержат больше Pro-Hyp-Gly-фрагментов (до 15 % от общего числа пептидов против 5–8 % у рыбного) [14]. Эти пептиды стимулируют синтез ауксина в черенках, что ускоряет деление клеток в меристеме корня и активирует корнеобразование.

Наибольшая общая масса листьев наблюдалась в варианте «животный коллаген + 0,6 % щелочи», что достоверно превышало все остальные группы (табл. 3). В то же время, на рыбном коллагене оптимальный стимулирующий эффект оказывали концентрации 0,2 % и 0,4 %, более высокие концентрации (0,6 % и 0,8 %) оказывали угнетающее действие.

Общая листовая масса, сформированная за это время, при выдержке черенков в гидролизате животного коллагена увеличилась на 14,3 % относительно наилучшего варианта с гидролизатом рыбного коллагена.

Наибольшее количество листьев сформировалось у черенков, обработанных на основе животного коллагена с добавлением 0,6 % щелочи, что достоверно превышало показатели всех остальных вариантов (табл. 3). Наиболее сильное угнетение роста наблюдалось при концентрации щелочи 0,8 % независимо от типа коллагена. Рыбный коллаген достоверно повышал количество листьев по сравнению с контролем только при обработке 0,2 % NaOH. Остальные концентрации не оказывали достоверного влияния.

Статистическая обработка данных по массе черенков, выполненная по методике Б. А. Доспехова [3], показала достоверное влияние концентрации щелочной обработки на рост черенков. Животный коллаген после обработки 0,6 % NaOH приводил к максимальному увеличению массы черенков. Рыбный коллаген обеспечивал наибольшую массу только в контрольном варианте, а обработка 0,6 % NaOH вызывала сильное угнетение роста.

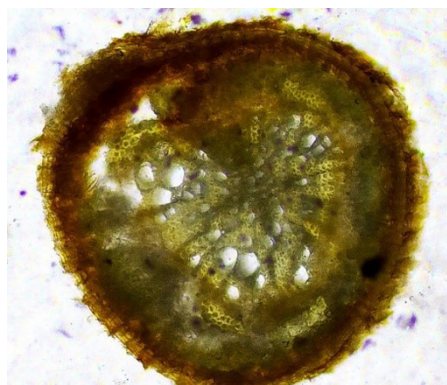
На фотографиях поперечного сечения основания черенков, выдержанных в гидролизате животного и рыбного коллагена (рис. 3), в опытных образцах в отличие от контроля четко прослеживается упорядоченная структура зон флоэмы, камбия и ксилемы, элементы вторичной древесины хорошо развиты. На рисунке 3б камбий сформирован, на рисунке 3г он находится в стадии деления.

Сосуды вторичной древесины крупно-про светные в большом количестве. Это свидетельствует о хорошо сформированных придаточных корнях.

Также следует отметить, что гидролизаты животного коллагена часто содержат остатки протеогликанов и гликозамингликанов, которые увлажняют ткань черенка, создавая благоприятную среду для корнеобразования, связывают и защищают активные пептиды от преждевременного разрушения. Рыбные гидролизаты обычно беднее такими компонентами из-за особенностей переработки.

Заключение. Проведенные исследования позволили оценить биостимуляторную активность гидролизатов коллагена животного и рыбного происхождения в контексте формирования придаточных корней у черенков тополя «Пирамидально-осоконовый Камышинский». Полученные данные подтверждают гипотезу о том, что эффективность биостимуляторов на основе белковых гидролизатов определяется не только степенью гидролиза исходного сырья, но и качественным составом образующихся пептидных фракций, а также их взаимодействием с физиологическими системами растений.

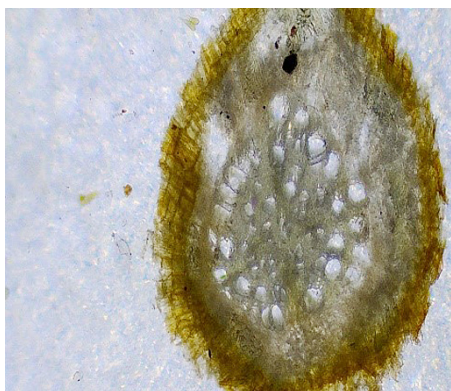
В ходе эксперимента установлено, что предварительная щелочная обработка коллагенового сырья (свиная шкура и шкура прудовых рыб) в концентрациях NaOH от 0,2 % до 0,8 % оказывает существенное влияние на последующую ферментацию актиномицетом *Streptomyces fradiae* AC – 570 и, как следствие, на фракционный состав получаемых гидролизатов. Рыбный коллаген, обладающий меньшей термостабильностью из-за пониженного содержания пролина



а



б



в



г

Рисунок 3 – Поперечный срез вторичного строения корня:

а – контроль (рыбный коллаген – КР); б – предварительная обработка рыбного коллагена NaOH 0,2 % с последующей ферментацией; в – контроль (животный коллаген – КЖ); г – предварительная обработка животного коллагена NaOH 0,6 % с последующей ферментацией

и гидроксипролина, оказался более чувствительным к щелочной обработке и легче подвергался гидролизу. Однако при этом в конечном продукте преобладали свободные аминокислоты, тогда как в гидролизатах животного коллагена — биологически активные пептиды, особенно при концентрации NaOH 0,6 %.

Анализ морфометрических показателей укорененных черенков выявил четкую зависимость между составом гидролизата и его стимулирующим эффектом. Наиболее выраженный положительный ответ был зафиксирован при обработке черенков гидролизатом животного коллагена, полученного после предварительной обработки 0,6 % NaOH. В этом варианте отмечено достоверное увеличение как количества корней (в 2,9 раза по сравнению с контролем), так и общей массы корневой системы (в 2,1 раза).

Кроме того, наблюдалось значительное повышение листовой массы и числа листьев, что свидетельствует о комплексном стимулирующем действии данного препарата на ростовые процессы.

В то же время гидролизаты рыбного коллагена проявили биостимуляторную активность только при низкой концентрации щелочи (0,2 % NaOH), что, вероятно, связано с формированием коротких пептидов, быстро усваиваемых растением, но не обеспечивающих длительного сигнального воздействия. При повышении концентрации NaOH до 0,6–0,8 % наблюдалось угнетение роста черенков, что может быть обусловлено чрезмерным расщеплением белковой структуры, разрушением функционально значимых пептидных фракций и накоплением побочных продуктов щелочного гидролиза. Чрезмерная концентрация щелочи (0,8 % NaOH) оказывает угнетающее действие на рост черенков независимо от типа коллагена, что связано с деструкцией функционально значимых пептидных последовательностей и образованием токсичных побочных продуктов.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки стандартизированных биостимуляторов на основе коллагеновых гидролизатов с заданным пептидным профилем,

ориентированных на конкретные физиологические задачи — от укоренения черенков до повышения устойчивости растений к абиотическим стрессам.

Список источников

1. Балякина К. Д., Детиненко С. А., Чернегов Н. Ю. Переработка вторичных ресурсов как метод повышения эффективности деятельности предприятия АПК // *ModernScience*. 2021. №4. С. 77–86.
2. Беспалова О. В., Соколов А. Ю., Гажур А. А. Разработка технологических решений для углубленной переработки мясокостных отходов на мясоперерабатывающих предприятиях // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2024. 32(4). С.80-104. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.613>.
3. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
4. Карпухина Е. Обзор методов переработки отходов рыбной промышленности в России и за рубежом [Электронный ресурс] // *CompostPro*: сайт. 2024. URL: <https://clck.ru/3QWYJS> (дата обращения: 20.09.2025).
5. Способ получения белкового стимулятора роста и развития растений: пат. 2533037 Рос. Федерация. № 2013134879/13 / Куцакова В. Е., Фролов С. В., Кременевская М. И., Марченко В. И.; заявл. 24.07.2013; опубл. 20.11.2014.
6. Ambrosini S., Prinsi B., Zamboni A. [et al.]. Chemical Characterization of a Collagen-Derived Protein Hydrolysate and Biostimulant Activity Assessment of Its Peptidic Components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022; 70 (36): 11201–11211. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c04379
7. Blyuss K. B., Fatehi F. [et al.]. RNAi-Based Biocontrol of Wheat Nematodes Using Natural Poly-Component Biostimulants. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2019.00483
8. Brown P., Saa S. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2015; 6: 1-3. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.
9. Canellas L. P., Olivares F. L., Aguiar N. O. [et al.]. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015; 196: 15–24. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.
10. Casadesús A., Polo J., Munné-Bosch S. Hormonal Effects of an Enzymatically Hydrolyzed Animal Protein-Based Biostimulant (Pepton) in Water-Stressed Tomato Plants. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1-11. DOI: 10.3389/fpls.2019.00758.
11. Cerdán M., Sánchez-Sánchez A., Oliver M. [et al.]. Effect of foliar and root applications of amino acids on iron uptake by tomato plants. *Acta Horticulturae*. 2009; 830: 481–488. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.830.68.
12. Colla G., Hoagland L., Ruzzi M. [et al.]. Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8: 1-14. DOI: 10.3389/fpls.2017.02202.
13. Du Jardin P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*. 2015; 196: 3–14. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.021.
14. Hu X., Yang Y., Chang C. [et al.]. The targeted development of collagen-active peptides based on composite enzyme hydrolysis: a study on the structure-activity relationship. *Food Funct*. 2024 Jan 2; 15(1): 401-410. doi: 10.1039/d3fo04455f. PMID: 38099483.
15. Kaushal P., Ali N. [et al.]. Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 10: 1-17. DOI: 10.3389/fpls.2023.1041413.
16. Kim V. V., Galaktionova E. A., Antonevich R. V. Food losses and food waste in the consumer market of the Russian Federation. *International Agricultural Journal*. 2020; 4: 1–20. DOI: 10.24411/2588-0209-2020-10191.
17. Lucini L., Rouphael Y., Cardarelli M. [et al.]. The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. *Scientia Horticulturae*. 2015; 182: 124–133. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.11.022.
18. Marfà O., Cáceres R., Polo J. [et al.]. Animal Protein Hydrolysate as a biostimulant for transplanted strawberry plants subjected to cold stress. *Acta Horticulturae*. 2009; 842: 315–318. DOI: 10.17660/actahortic.2009.842.57.
19. Martin-Rios C., Arboleya J. C., Bolton J. [et al.]. Editorial: Sustainable food waste management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022; 6: 885250 p. DOI: 10.3389/fsufs.2022.885250.
20. Matsumiya Y., Kubo M. Soybean Peptide: Novel Plant Growth Promoting Peptide from Soybean. In book: *Soybean and Nutrition*. 2011. P. 215-230. DOI:10.5772/19132.
21. Omidbakhshfard M. A., Sujeeth N., Gupta S. [et al.]. A Biostimulant obtained from the seaweed *Ascophyllum nodosum* protects *Arabidopsis thaliana* from severe oxidative stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21 (2): 474 p. DOI: 10.3390/ijms21020474.
22. Soppelsa S., Kelderer M. [et al.]. Use of Biostimulants for Organic Apple Production: Effects on Tree Growth, Yield, and Fruit Quality at Harvest and During Storage. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-17. DOI: 10.3389/fpls.2018.01342.
23. Tu M., Cheng S., Lu W. [et al.]. Advancement and prospects of bioinformatics analysis for studying bioactive peptides from food-derived protein: Sequence, structure, and functions. *Trends in Analytical Chemistry*. 2018; 105: 7–17. DOI: 10.1016/j.trac.2018.04.005.
24. Wilson H. T., Amirkhani M., Taylor A. G. Evaluation of Gelatin as a Biostimulant Seed Treatment to Improve Plant Performance. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-11. DOI: 10.3389/fpls.2018.01006.
25. Xu L., Geelen D. Developing Biostimulants From Agro-Food and Industrial By-Products. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-13. DOI: 10.3389/fpls.2018.01567.
26. Zhang X., Xu S., Shen L. [et al.]. Factors affecting thermal stability of collagen from the aspects of extraction, processing and modification. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2020; 2(19): 1-29. DOI: 10.1186/s42825-020-00033-0.

References

1. Balyakina K. D., Detinenko S. A., Chernegov N. Yu. Pererabotka vtorichny'x resursov kak metod povysheniya effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya APK // *ModernScience*. 2021. №4. S. 77–86.
2. Bespalova O. V., Sokolov A. Yu., Gazhur A. A. Razrabotka tekhnologicheskix reshenij dlya uglublennoj pererabotki myasokostny'x otxodov na myasopererabatyvayushhih predpriyatiyax // *Xranenie i pererabotka sel'xozsy'r'ya*. 2024. 32(4). S.80-104. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.613>.
3. Dospexov B. A. Metodika polevogo opy'ta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy). Moskva: Agropromizdat, 1985. 351 s.
4. Karpuxina E. Obzor metodov pererabotki otxodov ry'bnoj promy'shlennosti v Rossii i za rubezhom [E'lektronny'j resurs] // *CompostPro: sayt*. 2024. URL: <https://clck.ru/3QWyJS> (data obrashheniya: 20.09.2025).
5. Sposob polucheniya belkovogo stimulyatora rosta i razvitiya rastenij: pat. 2533037 Ros. Federaciya. № 2013134879/13 / Kuczakova V. E., Frolov S. V., Kremenevskaya M. I., Marchenko V. I.; zayavl. 24.07.2013: opubl. 20.11.2014.
6. Ambrosini S., Prinsi B., Zamboni A. [et al.]. Chemical Characterization of a Collagen-Derived Protein Hydrolysate and Biostimulant Activity Assessment of Its Peptidic Components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022; 70 (36): 11201–11211. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c04379
7. Blyuss K. B., Fatehi F. [et al.]. RNAi-Based Biocontrol of Wheat Nematodes Using Natural Poly-Component Biostimulants. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2019.00483
8. Brown P., Saa S. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2015; 6: 1-3. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.
9. Canellas L. P., Olivares F. L., Aguiar N. O. [et al.]. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 2015; 196: 15–24. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.013.
10. Casadesús A., Polo J., Munné-Bosch S. Hormonal Effects of an Enzymatically Hydrolyzed Animal Protein-Based Biostimulant (Pepton) in Water-Stressed Tomato Plants. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1-11. DOI: 10.3389/fpls.2019.00758.
11. Cerdán M., Sánchez-Sánchez A., Oliver M. [et al.]. Effect of foliar and root applications of amino acids on iron uptake by tomato plants. *Acta Horticulturae*. 2009; 830: 481–488. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.830.68.
12. Colla G., Hoagland L., Ruzzi M. [et al.]. Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8: 1-14. DOI: 10.3389/fpls.2017.02202.
13. Du Jardin P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*. 2015; 196: 3–14. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.021.
14. Hu X., Yang Y., Chang C. [et al.]. The targeted development of collagen-active peptides based on composite enzyme hydrolysis: a study on the structure-activity relationship. *Food Funct*. 2024 Jan 2; 15(1): 401-410. doi: 10.1039/d3fo04455f. PMID: 38099483.
15. Kaushal P., Ali N. [et al.]. Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 10: 1-17. DOI: 10.3389/fpls.2023.1041413.
16. Kim V. V., Galaktionova E. A., Antonevich R. V. Food losses and food waste in the consumer market of the Russian Federation. *International Agricultural Journal*. 2020; 4: 1–20. DOI: 10.24411/2588-0209-2020-10191.
17. Lucini L., Roupheal Y., Cardarelli M. [et al.]. The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. *Scientia Horticulturae*. 2015; 182: 124–133. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.11.022.
18. Marfà O., Cáceres R., Polo J. [et al.]. Animal Protein Hydrolysate as a biostimulant for transplanted strawberry plants subjected to cold stress. *Acta Horticulturae*. 2009; 842: 315–318. DOI: 10.17660/actahortic.2009.842.57.
19. Martin-Rios C., Arbolea J. C., Bolton J. [et al.]. Editorial: Sustainable food waste management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022; 6: 885250 p. DOI: 10.3389/fsufs.2022.885250.
20. Matsumiya Y., Kubo M. Soybean Peptide: Novel Plant Growth Promoting Peptide from Soybean. In book: *Soybean and Nutrition*. 2011. P. 215-230. DOI:10.5772/19132.
21. Omidbakhshfard M. A., Sajeeth N., Gupta S. [et al.]. A Biostimulant obtained from the seaweed *Ascophyllum nodosum* protects *Arabidopsis thaliana* from severe oxidative stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21 (2): 474 p. DOI: 10.3390/ijms21020474.
22. Soppelsa S., Kelderer M. [et al.]. Use of Biostimulants for Organic Apple Production: Effects on Tree Growth, Yield, and Fruit Quality at Harvest and During Storage. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-17. DOI: 10.3389/fpls.2018.01342.
23. Tu M., Cheng S., Lu W. [et al.]. Advancement and prospects of bioinformatics analysis for studying bioactive peptides from food-derived protein: Sequence, structure, and functions. *Trends in Analytical Chemistry*. 2018; 105: 7–17. DOI: 10.1016/j.trac.2018.04.005.
24. Wilson H. T., Amirkhani M., Taylor A. G. Evaluation of Gelatin as a Biostimulant Seed Treatment to Improve Plant Performance. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-11. DOI: 10.3389/fpls.2018.01006.
25. Xu L., Geelen D. Developing Biostimulants From Agro-Food and Industrial By-Products. *Frontiers in Plant Science*. 2018; 9: 1-13. DOI: 10.3389/fpls.2018.01567.
26. Zhang X., Xu S., Shen L. [et al.]. Factors affecting thermal stability of collagen from the aspects of extraction, processing and modification. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2020; 2(19): 1-29. DOI: 10.1186/s42825-020-00033-0.

Сведения об авторах:

Л. В. Брындина[✉], доктор сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>;

Л. А. Репникова, аспирант, <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>;

А. Ю. Корчагина, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>;

Д. И. Живитченко, аспирант, <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,
НИИ «Инновационных технологий и лесного комплекса», лаборатория промышленных биотехнологий,
394087, Россия, Воронеж, ул. Тимирязева, 8
bryndinv@mail.ru

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF BIOSTIMULATORY ACTIVITY OF COLLAGEN HYDROLYZATES IN ADVENTITIOUS ROOTS FORMATION IN CUTTINGS OF PYRAMIDAL OSOKOREVY KAMYSHINSKY POPLAR

Larisa V. Bryndina[✉], **Lyudmila A. Repnikova**, **Anna Yu. Korchagina**, **Darya I. Zhivitchenko**

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Voronezh, Russia
bryndinv@mail.ru

Abstract. *The article presents the results of studying the effect of a biostimulant from animal and fish collagen wastes on the rooting in cuttings of Pyramidal Osokorevy Kamysinsky poplar. The collagen raw material was pretreated with NaOH to partially destroy it. Optimal concentrations of NaOH were determined for providing the necessary rate of collagen cleavage for subsequent fermentation of raw materials with the actinomycete Streptomyces fradiae AC – 570 culture. It has been established that an increase in the concentration of NaOH from 0.2 % to 0.8 % accelerates the hydrolysis of both types of collagen due to the active cleavage of peptide bonds. But the fish collagen is more sensitive to alkaline treatment and is more easily hydrolyzed. The degree of hydrolysis of the fish collagen was 1.8 – 2.1 times higher than that of the animal collagen. It was revealed that the enzymatic hydrolysis of fish collagen was more intensive after the alkali pretreatment. The degree of hydrolysis increased by an average of 24.9 % for animal collagen, and by 30.1 % for fish collagen. The fractional composition of collagen hydrolysates has shown that peptide fractions predominate in the animal hydrolysate, while amino acid fractions predominate in the fish hydrolysate. The tendency of the stimulating effect of peptide fractions of collagen hydrolysates on root formation in cuttings of the Pyramidal Osokorevy Kamysinsky poplar has been revealed. Morphometric parameters of the cuttings of the Pyramidal Osokorevy Kamysinsky poplar after their treatment with collagen hydrolysates were determined. The number of formed roots and the total root mass of cuttings treated with animal collagen hydrolysate were 1.8 times and 1.6 times greater than those of cuttings treated with fish collagen hydrolysate. The leaf biomass of the cuttings aged in animal collagen hydrolysate increased by 14.3 % compared to the fish collagen variant.*

Key words: biostimulator for plants, collagen hydrolysate, rooting of cuttings, poplar, animal collagen, fish collagen.

For citation: Bryndina L. V., Repnikova L. A., Korchagina A. Yu., Zhivitchenko D. I. Comparative assessment of biostimulatory activity of collagen hydrolysates in adventitious roots formation in cuttings of Pyramidal Osokorevy Kamysinsky poplar. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 4 (84): 38-48. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_38-48.

Authors:

L. V. Bryndina[✉], Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>;

L. A. Repnikova, Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>;

A. Yu. Korchagina, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>;

D. I. Zhivitchenko, Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Research Institute of Innovative Technologies and Forest Complex, Laboratory of Industrial Biotechnologies, 8 Timiryazeva St., Voronezh, Russia, 394087
bryndinv@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.