



## Влияние биостимулятора на корнеобразование черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский

Лариса В. Брындина<sup>1</sup> ✉, [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>,  
Людмила А. Репникова<sup>1</sup>, [lyu58445295@yandex.ru](mailto:lyu58445295@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>  
Анна Ю. Корчагина<sup>1</sup>, [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>  
Дарья И. Живитченко<sup>1</sup>, [darzhivitchenko@gmail.com](mailto:darzhivitchenko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>  
Валерий И. Посметьев<sup>1</sup>, [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>  
Андрей Ю. Мануковский<sup>1</sup>, [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Проблема выращивания высококачественного посадочного материала древесных пород решается путем применения биологически активных веществ. Большинство тополей, в том числе и Пирамидально-осоконовый Камышинский, размножаются черенкованием. Но слабая корневая система пирамидальных форм тополей делает их уязвимыми к засухе, ветрам и механическим повреждениям. В данной работе представлены результаты получения биостимулятора путем ферментации коллагенового сырья актиномицетом *Streptomyces fradiae* AC – 570 и оценки его влияния на формирование придаточных корней у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский. Аминокислотный состав гидролизата коллагена определяли с применением жидкостной хроматографии на аппарате Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония). Степень гидролиза коллагенового сырья оценивали по аминному азоту, по методу Серенсена. Установлено, что оптимальными условиями получения биостимулятора являются автоклавирование измельченного сырья при гидромодуле 1:6 в течение 20 минут при давлении 0,1 МПа с последующей его ферментацией 36 ч при температуре 28-30 °С, pH 6,5 – 7,0 и концентрации культуры микроорганизма 10%. Обработка коллагенового сырья в этих условиях увеличивала степень гидролиза в 5,9 раза. При соблюдении указанных режимов биодеструкции коллагена обеспечивается высокое содержание аминокислот, что позволяет его использовать в качестве аминокислотного стимулятора растений. Содержание пролина возросло на 64,6 %, глицина – в 7,5 раза. Обработка черенков биостимулятором способствовала увеличению корневой массы более чем в 3 раза, листовой биомассы растений на 36,8 %. Общая масса черенка опытных образцов превышала контрольные варианты в 1,9 раза. Полученные данные могут использоваться для усиления корнеобразования черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский.

**Ключевые слова:** аминокислоты, биостимулятор, корнеобразование черенков, тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский, коллаген

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Влияние биостимулятора на корнеобразование черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский / Л. В. Брындина, Л. А. Репникова, А. Ю. Корчагина, Д. И. Живитченко, В. И. Посметьев, А. Ю. Мануковский // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 5–18. – Библиогр.: с. 14–17 (20 назв.). – <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/1>

*Поступила* 15.05.2025. *Пересмотрена* 10.09.2025. *Принята* 15.09.2025. *Опубликована онлайн* 25.09.2025.

Article

### The effect of a biostimulator on the root formation of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky

Larisa V. Bryndina<sup>1</sup> ✉, bryndinv@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>,

Lyudmila A. Repnikova<sup>1</sup>, lyu58445295@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>

Anna Y. Korchagina<sup>1</sup>, nuta10011@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Daria I. Zhivitchenko<sup>1</sup>, darazhivitchenko@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>

Valerii I. Posmetev<sup>1</sup>, posmetyev@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Andrey Yu. Manukovskiy<sup>1</sup>, mayu1964@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation

#### Abstract

The problem of growing high-quality tree planting material is solved by using biologically active substances. Most poplars, including the Pyramid-sedge Kamyshinsky, are propagated by cuttings. But the weak root system of the pyramid-shaped poplars makes them vulnerable to drought, winds and mechanical damage. This paper presents the results of obtaining a biostimulator by fermenting collagen raw materials with actinomycete *Streptomyces fradiae* AC – 570 and evaluating its effect on the formation of adventitious roots in cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar. The amino acid composition of collagen hydrolysate was determined using liquid chromatography on a Shimadzu LC-20 Prominence apparatus (Shimadzu, Japan). The degree of hydrolysis of collagen raw materials was assessed by amine nitrogen, using the Sorensen method. It was found that the optimal conditions for obtaining a biostimulator are autoclaving of crushed raw materials with a 1:6 hydromodule for 20 minutes at a pressure of 0.1 Mpa, followed by fermentation for 36 hours at a temperature of 28-30 °C, pH 6.5 – 7.0 and a concentration of culture of the microorganism of 10%. Processing of collagen raw materials under these conditions increased the degree of hydrolysis by 5.9 times. When observing these modes of collagen biodegradation, a high content of amino acids is provided, which allows it to be used as an amino acid stimulator of plants. The content of proline increased by 64.6%, and glycine by 7.5 times. Treatment of cuttings with a biostimulator increased the root mass by more than 3 times, and the leaf biomass of plants by 36.8%. The total weight of the cuttings of the prototypes exceeded the control variants by 1.9 times. The data obtained can be used to enhance the root formation of the cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar.

**Keywords:** amino acids, biostimulator, root formation of cuttings, Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar, collagen

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

*For citation:* Bryndina L.V., Repnikova L.A., Korchagina A.Y., Zhivitchenko D.I., Posmetyev V.I., Manukovsky A.Y. (2025). The effect of a biostimulator on the root formation of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 5-18 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/1>

*Received* 15.05.2025. *Revised* 12.07.2025. *Accepted* 15.05.2025. *Published online* 25.09.2025.

## Введение

Здоровая и быстро растущая корневая система имеет решающее значение для продуктивности растительного сырья, поскольку пространственное размещение, плотность и структура корней определяют способность растения использовать почвенные ресурсы. У таких экономически и экологически важных древесных биоэнергетических культур, как тополь, структура корневой системы формируется в результате двух основных последовательных многоступенчатых процессов: образование корней на побегах и их разрастание за счет удлинения и ветвления. Формирование придаточных корней способствует появлению новых корневых тканей в местах, отличных от первичной корневой системы, является первым условием для успешного укоренения и роста посаженных деревьев [1].

Образование придаточных корней – это сложный биологический процесс, состоящий из нескольких фаз. Обычно они развиваются из клеток, соседних с сосудистыми тканями. На стеблевых черенках тополя зачатки придаточных корней появляются из клеток камбия и их непосредственных производных [2].

У некоторых видов *Populus* уже существуют предварительно сформированные зачатки придаточных корней в состоянии покоя. У некоторых других генотипов зачатки индуцируются в ответ на внешние раздражители или у основания черенка образуется каллус, предшествующий дифференцировке корневых зачатков [3].

Главными внутренними факторами, индуцирующими рост придаточных корней, выступают гормоны [3-7].

Некоторые наблюдения свидетельствуют о том, что образование придаточных корней является сложным и высокоорганизованным биологи-

ческим процессом, регулируемым множеством эндогенных гормонов и факторов окружающей среды. Одним из ключевых игроков в этом процессе является гормон ауксин [8]. Наиболее важными питательными веществами, участвующими в развитии первичных и боковых корней, являются азот (N) и фосфор (P) [9,10].

Видимо поэтому большинство научных работ в области изучения формирования придаточных корней у растений сосредоточены на роли фитогормонов, в основном ауксинов, и физиологических условиях черенкования. Влиянию стрессовых реакций, связанных с отделением черенка, уделяется меньше внимания, хотя отклик на повреждение, связанный с отделением черенка, является неотъемлемой частью процесса, ведущего к укоренению.

Ускорить адаптацию к стрессу можно за счет повышения содержания в черенках некоторых аминокислот, фенолов, перекиси водорода, активности антиоксидантных ферментов и др. [11]. Так Фримпонг с соавторами установлена корреляция между накоплением аминокислоты пролина и устойчивостью к водному стрессу [12]. Благоприятное влияние пролина в условиях стресса может проявляться и при поступлении пролина извне, как показано в обзоре [13].

Экзогенными источниками аминокислот могут выступать белковые гидролизаты. Но здесь следует отметить, что сырье, из которого их получают сильно влияет на аминокислотный состав. Например, гидролизаты животных белков (коллаген) содержат много пролина и глицина, а растительные (соя, водоросли) — больше глутаминовой кислоты и аргинина. Это важно, потому что разные аминокислоты по-разному влияют на растения. Животные гидролизаты обычно имеют низкомолекулярные пептиды, которые легче усваиваются растениями. Растительные могут содержать

больше полисахаридов и других веществ, которые тоже полезны, но усваиваются медленнее.

Следует также учесть, что аминокислоты из источников животного происхождения более эффективны для корнеобразования у древесных культур (тополь), так как усиливают синтез ауксинов и полиаминов, обеспечивают быструю доставку биоактивных пептидов к поврежденным тканям, что важно при черенковании, пролин и глицин из животных источников улучшают осморегуляцию и защищают клетки [14].

Растительные аминокислотные стимуляторы более эффективны для вегетативного роста и цветения. Например, аргинин и фитогормоны в растительных гидролизатах усиливают развитие побегов. При листовых подкормках отмечено, что глутаминовая кислота улучшает усвоение микроэлементов.

В связи с вышеизложенным целью исследования было повысить корнеобразование у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский за счет стимуляции аминокислотным гидролизатом животного происхождения.

Тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский – достаточно распространенное растение в городской среде, оно устойчиво к загрязнениям и активно очищает воздух от пыли, автомобильных выбросов [15,16]. Тополь обладает удивительной газопоглощающей способностью. За период вегетации растение пропускает 180 кг углекислого газа и выделяет 30 кг кислорода. В возрасте 25-30 лет по этому показателю оно намного продуктивнее ели, липы, клена, дуба, березы, рябины [17].

В основном тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский размножается черенкованием, так как семенное размножение не позволяет сохранить «колонну» и сеянцы часто растут с обычной раскидистой кроной.

### Материалы и методы

В качестве источника аминокислот использовали гидролизат коллагена из коллагенового сырья (свиные уши). Сырье предварительно промывали дистиллированной водой, измельчали до фаршеобразного состояния, автоклавировали в колбах объемом 250 см<sup>3</sup> в течение 20 минут при

давлении 0,1 Мпа. После охлаждения до температуры 28–30 °С проводили ферментативный гидролиз культурой актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570 при температуре 28–30 °С, pH 6,5 – 7,0 в шейкере-инкубаторе при n = 200 об/мин. Предварительно актиномицет *Streptomyces fradiae* AC – 570 выращивали 10 дней при температуре 28–30 °С на среде CP-1 с крахмалом состава, г/дм<sup>3</sup>: KNO<sub>3</sub> – 1,0; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 0,5; NaCl – 0,5; MgSO<sub>4</sub> – 0,5; CaCO<sub>3</sub> – 1,0; FeSO<sub>4</sub> – 0,001; крахмал – 10; агар – 20.

Аминокислотный состав гидролизата коллагена определяли с применением жидкостной хроматографии на аппарате Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония).

Выход сухих веществ определяли по ГОСТ 31640-2012.

Степень гидролиза коллагенового сырья оценивали по аминному азоту и выражали в процентах к контрольному опыту. Аминный азот определяли по методу Серенсена. Накопление аминного азота в гидролизате свидетельствует о присутствии свободных аминокислот и пептидов.

По завершении ферментации гидролизат коллагена центрифугировали на центрифуге Liston C 2203 при 1000 об/мин, отделяли центрифугат, в котором обрабатывали черенки.

Черенки тополя готовили по ГОСТ 17267-71, выдерживали в гидролизате коллагена 24 ч при температуре 22–24 °С, затем высаживали в торф и снимали показания через 20 дней. Контролем служили черенки, замоченные в дистиллированной воде. В каждом варианте использовалось по 30 черенков.

Массу корней, листьев и черенка определяли после высушивания свежего растительного материала в термостате при температуре 105 °С до постоянной массы.

Полученные данные обрабатывали по общепринятым статистическим методам, используя программное обеспечение MS Excel (office 2010). Разница достоверно значимой считалась при p < 0,05.

### Результаты и обсуждение

Коллаген, являясь фибриллярным белком, имеет вытянутую структуру и большую молеку-

лярную массу (300 кДа), что осложняет его разрушение. Поэтому для оптимизации процесса деградации коллагена важное значение имеет определение условий, при которых он проводится. Одним из таких параметров является гидромодуль. Он играет ключевую роль в определении эф-

фективности реакции, повышении диффузионных процессов. В связи с этим был проведен эксперимент по определению гидромодуля, обеспечивающего максимальное извлечение белковых составляющих из коллагенового сырья. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Выход сухих веществ после автоклавирования, %

Table 1

Dry matter yield after autoclaving, %

Гидромодуль   Hydraulic module	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7
Коллаген свиных ушей   Pig Ear Collagen	22,40±1,15	32,11 ± 2,75	40,93 ± 0,96	48,12 ± 2,15	56,21 ± 1,75	56,80 ± 3,11	57,10±2,15

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

По полученным результатам видно, что концентрация сухих веществ в гидролизате при соотношениях 1:1 – 1:5 возрастает на 7,19 – 9,71 %. Затем при гидромодуле 1:6 и 1:7 интенсивность гидролиза снижается и выход сухих веществ существенно не увеличивается. Поэтому был выбран гидромодуль 1:6, обеспечивающий высокую концентрацию белковых компонентов в продукте.

Другим важным условием является способ гидролиза, который влияет на качество получаемого продукта, его функциональные свойства. Наиболее перспективным считается ферментативный гидролиз коллагенового сырья. Этот способ разрушения коллагена, прежде всего, безопасен, не требует дополнительной очистки конечного

продукта, в отличие от кислотного и щелочного, проводимых при высоких концентрациях реагентов и температурах. Ферментативный гидролиз благодаря мягким условиям сохраняет биологическую активность продуктов распада коллагена [18-20].

Результаты влияния концентрации вносимого микроорганизма, проявляющего коллагеназную активность, и продолжительности процесса на степень гидролиза коллагена представлены в таблице 2. Контролем выступал гидролизат коллагена, не содержащий в своем составе культуру актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570.

Таблица 2

Степень гидролиза коллагена в зависимости от концентрации культуры микроорганизма

Table 2

The degree of collagen hydrolysis depends on the concentration of the culture of the microorganism

Время гидролиза, ч   Hydrolysis time, h	Аминный азот, мг/см <sup>3</sup>   Amine nitrogen, mg/cm <sup>3</sup>					
	Контроль   Control	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %
0	0	0	0	0	0	0
12	1,30±0,1	3,80±0,2	5,31±0,1	5,20±0,2	5,00±0,3	4,40±0,2
24	1,37±0,1	4,62±0,1	7,28±0,1	7,30±0,2	6,35±0,1	5,20±0,2
36	1,50±0,1	5,80±0,3	8,87±0,2	7,35±0,1	6,35±0,2	5,20±0,3
48	1,50±0,1	5,82±0,1	8,87±0,1	7,35±0,2	6,35±0,1	5,20±0,2
60	1,50±0,1	5,80±0,2	8,87±0,1	7,35±0,1	6,35±0,1	5,20±0,3

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Экспериментальные данные таблицы 2 показывают, что при концентрации вносимой культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570 10 % в течении 60 ч обеспечивается максимальная степень гидролиза коллагена, которая превышала контрольные показатели в 4,1 – 5,9 раз. Увеличение концентрации микроорганизма приводит к торможению процесса. Возможно, при слишком высокой концентрации микроорганизмов они начинают конкурировать за ресурсы, продукты распада коллагена или побочные метаболиты могут ингибировать ферментативную активность, что может привести к снижению их продуктивности.

Влияние времени ферментации на степень гидролиза коллагена показало, что при концентрациях микроорганизма 5%, 10 % и 15 % максимальные результаты были достигнуты к 36 ч гидролиза, а при концентрациях 20 % и 25 % - к 24 ч. Это объясняется тем, что микроорганизмы должны сначала вырасти и начать производить ферменты. Поэтому при низких концентрациях инокулята происходит задержка в начале гидролиза, пока культура не размножится достаточно. При высоких концентрациях начальное производство ферментов начнется быстрее.

Соблюдение указанных условий обеспечило высокий выход биостимулятора с полноценным аминокислотным составом (таблица 3).

Таблица 3

Аминокислотный состав коллагена после термической обработки в автоклаве и после ферментации

Table 3

Amino acid composition of collagen after heat treatment in an autoclave and after fermentation

Аминокислоты, %  Amino acids, %	Термообработка (автоклава)  Heat treatment (autoclave)	Ферментация  Fermentation
Аргинин  Arginine	0,05	1,41
Лизин  Lysine	0,01	0,51
Тирозин  Tyrosine	0,03	0,17
Фенилаланин  Phenylalanine	0,07	0,31
Гистидин  Histidine	0,01	0,12
Лейцин  Leucine	0,04	0,73
Изолейцин  Isoleucine	0,03	0,36
Метионин  Methionine	0,08	0,08
Валин  Valin	0,77	0,86
Пролин  Proline	0,79	1,30
Треонин  Threonine	0,01	0,25
Серин  Serin	0,02	0,43
Аланин  Alanine	0,05	1,06
Глицин  Glycine	0,32	2,38
Цистин  Cystine	0,01	0,20
Глутаминовая кислота  Glutamic acid	0,02	1,55
Аспарагиновая кислота  Aspartic acid	0,02	1,74

Источник: собственные экспериментальные данные| Source: own experimental data

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 3, свидетельствует о большой специфичности *Streptomyces fradiae* AC – 570 к коллагеновому сырью. Ферментированный гидролизат

характеризуется наличием всего спектра аминокислот и обеспечивает высокое их содержание в сравнении с коллагеном, подвергнутым только термиче-

ской деструкции. Результаты исследования демонстрируют повышенную биологическую ценность коллагенового гидролизата и возможность его использования в качестве аминокислотного стимулятора.

Результаты морфометрических параметров черенков, представленные на рисунке 1, демонстрируют значительные положительные изменения под воздействием аминокислотного биостимулятора,

полученного в результате ферментации коллагенового сырья с использованием культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570. Исследования показали, что данный биостимулятор оказывает существенное влияние на биометрические показатели черенков тополя Пирамидально-осокооревый Камышинский, стимулируя активное развитие придаточных корней и обеспечивая повышение их количества в опытных образцах почти в 2,9 раза по сравнению с контролем.

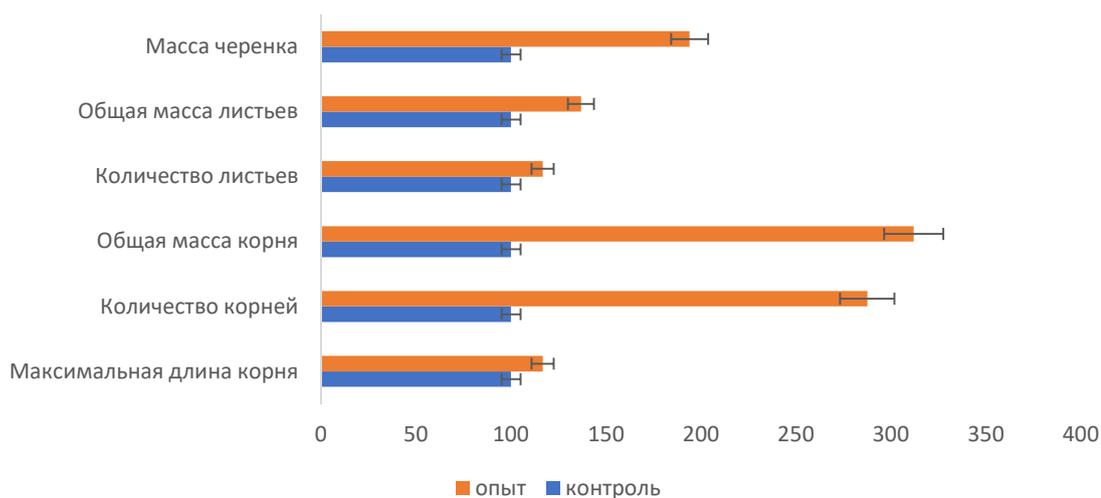


Рисунок 1. Морфометрические показатели черенков тополя Пирамидально-осокооревый Камышинский, % от контрольного образца

Figure 1. Morphometric parameters of the cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar, % of the control sample

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Кроме того, была зарегистрирована значительная прирост общей биомассы корневой системы — более чем в 3 раза, что свидетельствует о повышении жизнеспособности и потенциала укоренения черенков. Увеличение корневой массы напрямую влияет на способность растения лучше усваивать воду и питательные вещества из почвы, что особенно важно для дальнейшего роста и адаптации высокопродуктивных древесных культур.

На рисунке 2 визуально подтверждается различие в развитии черенков, обработанных биостимулятором, и контрольных образцов, выдержанных в воде. Черенки, подвергнутые обработке аминокислотным гидролизатом, демонстрируют не только

увеличение числа придаточных корней, но и их более развитую структуру, что указывает на улучшение морфогенеза и активизацию корнеобразования.

Помимо корневого роста, исследования выявили прирост листовой биомассы растений на 36,8%, что в значительной степени способствует усилению фотосинтеза. Повышенная листовая масса увеличивает площадь фотосинтезирующей поверхности, что ведет к большему накоплению фотосинтезирующих продуктов, а это, в свою очередь, влияет на общий рост и развитие растений. Усиление фотосинтеза активизирует транспорт и распределение ауксина — одного из важнейших гормонов, регулирующих рост корней — к местам формирования новых корней.

Фотосинтез играет ключевую роль не только в обеспечении растительных тканей необходимой энергией и ассимилятами, но и в регуляции метаболических процессов, влияющих на морфогенез корневой системы. Гены, связанные с фотосинтезом, вероятно, оказывают прямое или косвенное влияние на образование придаточных корней, что подтверждается исследованиями у черенков тополя. Это подчеркивает важность интегрированного взаимодействия физиологических процессов, где фотосинтетическая активность влияет на гормональный фон и стимулирует деление клеток, дифференцировку и рост корней.

Таким образом, применение аминокислотного биостимулятора не только улучшает морфометрические показатели корневой системы, но и комплексно стимулирует развитие растений за счет улучшения фотосинтетической активности и повышения гормональной регуляции корнеобразования, обеспечивая более быстрый и эффективный переход черенков к самостоятельному развитию.



А



Б

Рисунок 2. Черенки тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский через 20 суток:

А - замачивание в воде; Б – замачивание в биостимуляторе

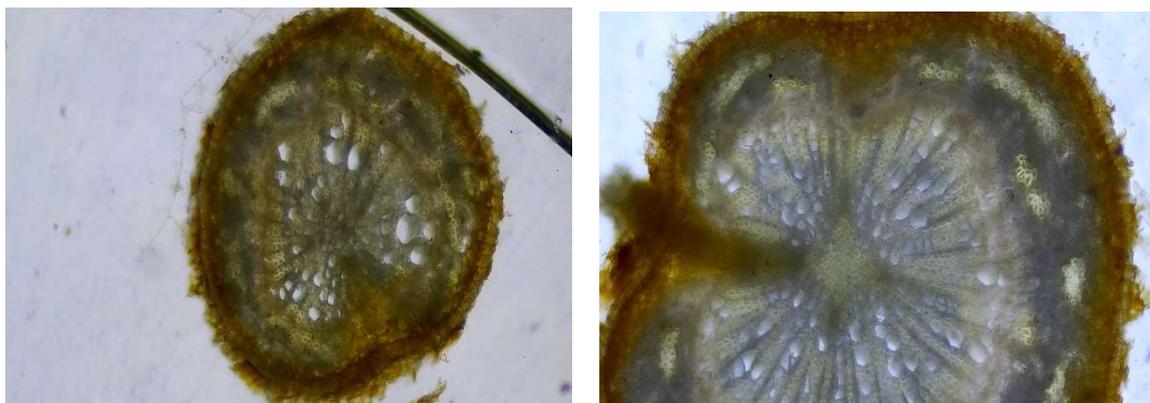
Figure 2. Cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar after 20 days:

A - soaking in water; B – soaking in a biostimulator

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Образование придаточных корней у черенков тополя в основном связано с делением клеток в

сосудистых тканях и появлением корневых примордий. Формирование придаточных корней представлено на рисунке 3.



А

Б

Рисунок 3. Поперечное сечение черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский через 20 суток:

А - замачивание в воде; Б – замачивание в биостимуляторе

Figure 3. Cross section of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky after 20 days:

A - soaking in water; B – soaking in a biostimulator

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

На рисунке 3 видно, что на начальной стадии формирования придаточного корня связь между проводящими элементами ксилемы стебля и корня в опытном варианте выражена ярче. Между проводящими элементами возникают сосудистые трахеиды. Благодаря деятельности камбия в области стебля и у основания придаточного корня исходные клетки ксилемы в этих органах по возрасту, расположению и строению совпадают, что обеспечивает быстрое формирование ксилемы в переходной зоне. В процессе роста придаточного корня формируется собственная вторичная ксилема корня. Между сосудами придаточного корня и стебля устанавливается тканевая связь и формируется собственная вторичная ксилема корня.

Образование придаточного корня как единого морфологического и функционального органа начинается с формирования апикальной меристемы, производные которой дифференцируются в характерные тканевые структуры, что и считается фактическим появлением корня. Развитие апикальной меристемы в стебле черенка происходит из примордия, возникающего в камбиальной зоне, которое представляет собой сферическую группу меристематических клеток. Примордия, как правило, формируются в камбиальной зоне сердцевинного луча, что послу-

жило основанием предполагать, что апикальная меристема придаточного корня развивается из изодиаметрических (лучевых) инициалей камбия.

В результате активного растяжения лучевой паренхимы в области проторизной ксилемы камбиальная зона сердцевинных лучей в опытном варианте более развита.

В сформированном придаточном корне доминируют вторичные ткани, образованные стебле-корневым камбием. Выше по оси расположены участки с первичной и вторичной ксилемой, камбием, первичной и вторичной флоэмой, первичной корой и протодермой. Вблизи апекса наблюдается типичное первичное строение: прокамбиальная стель, первичная кора и протодерма.

### Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено, что использование аминокислотного биостимулятора, полученного путем ферментативного гидролиза коллагенового сырья с применением культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570, оказывает значительное положительное влияние на процессы корнеобразования у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский. Биостимулятор способствует активному развитию придаточных корней, увеличивает их количество почти в три раза и значительно повышает общую биомассу корневой

системы, что свидетельствует о его высокой эффективности в усилении процессов укоренения.

Использование данного стимулятора также способствует значительному приросту листовой биомассы, что в свою очередь усиливает фотосинтетическую активность растений и ускоряет транспорт ауксина к местам формирования корней. Это важный фактор, так как ауксин является ключевым гормоном, регулирующим рост и дифференцировку корней. Повышение фотосинтетической активности способствует увеличению запасов ассимилятов, необходимых для интенсивного роста и развития как корневой системы, так и надземной части растений.

Микроскопический анализ показал улучшение связи между ксилемными элементами стебля и придаточного корня в опыте с применением биостимулятора, что обеспечивает скоординированное формирование и быстрое созревание ксилемы в переходной зоне. Это указывает на то, что аминокислотный стимулятор не только улучшает рост корней, но и способствует гармоничному развитию сосудистых тканей, необходимых для эффективного транспорта воды и питательных веществ.

Кроме того, экспериментально подтверждена высокая биологическая ценность коллагенового гидролизата как источника аминокислот с полноценным аминокислотным профилем, который содержит важные компоненты — пролин, глицин, аргинин — участвующие в осморегуляции, защите клеток от стресса и стимуляции синтеза фитогормонов. Это делает гидролизат перспективным для применения как биостимулятор в растениеводстве, особенно при размножении древесных культур, требующих быстрого и качественного укоренения.

Таким образом, применение аминокислотного стимулятора из коллагенового сырья позволяет повысить качество посадочного материала тополя Пирамидально-осокоревый Камышинский за счет активизации формирования придаточных корней и улучшения физиологического состояния черенков. Эти результаты открывают перспективы для разработки эффективных биотехнологических подходов к улучшению размножения и роста древесных культур, что имеет важное значение для экологически устойчивого городского озеленения и биоэнергетики.

### Список литературы

1. Швецова Е.А., Бунькова Н.П. Оценка применения методов черенкования к выращиванию тополя пирамидального (*Populus pyramidalis*) селекции Н.А. Коновалова и тополя итальянского (*Populus italica*) в условиях Екатеринбурга // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. – С. 389-393.
2. Bannoud F., Bellini S. Adventitious rooting in populist forms: renewal and prospects. *The front: Plant Sci.* 2021;12: 668837. - doi:10.3389/fpls.2021.668837.
3. Li J., Jia H., Sun P., Zhang J., Xia Y., Hu J. et al. WUSCHELA (PtoWUSa) participates in the plasticity of Adventist roots in poplar. *Genes (Basel)*. 2020; 11: 176. - doi: 10.3390/genes11020176.
4. Ranjan A., Perrone I., Alallak S., Singh R., Rigal A., Brunoni F. et al. The molecular basis of differential adventitive root competence in poplar genotypes: *J. Express Bot.* 2022; 73: 4046-4064. - doi:10.1093/jxb/erac126.
5. Yue J., Yang H., Yang S., Wang J. (2020). TDIF regulates auxin accumulation and modulates auxin sensitivity to enhance both adventist root and lateral root formation in pololar trees: *The physiology of the tree.*2020; 40: 1534–1547. - doi:10.1093/treephys/tpaa077.
6. Yang S. , Bai J., Wang J. TDIF peptides regulate root growt by affecting auxin homeostasis and PINs expression in *Arabidopsis thaliana*: *Front. Plant.* 2020; 29;251(6):109. - doi: 10.1007/s00425-020-03406-1.
7. Ahkami A.H. Systems biology of root development in *Populus*: Review and perspectives:*Plant Science.* 2023;335. doi:https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818.
8. Amir H. Akhkami. Systemic biology of root development in *Populus*: an overview and prospects *Issue. Plant Sci.* 2023; 335: 111818. - https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818.

9. Zhang M., Zhou H., Xiang H. et al. Characterization and analysis of genetic differences in the development of adventitious roots of *Populus* germplasm resources: *Plant Mol Biol.* 2024; 114, 9. - <https://doi.org/10.1007/s11103-024-01418-z>.

10. Arya, A.; Husen, A. The role of various auxins in the formation of adventitive roots. in the ecological, physiological and chemical control of accidental rooting of cuttings; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2022; pp. 213-238. [Google Academy].

11. Ali M., Jeddi K., Attia M.S., Elsayed S.M., Yusuf M., Osman M.S., Soliman M.H., Hessini K. Wuxal amino (Bio stimulant) improved growth and physiological performance of tomato plants under salinity stress through adaptive mechanisms and antioxidant potential: *Saudi Journal of Biological Sciences.* 2021; 28 (6):3204-3213. - DOI:10.1186/s40529-022-00345-w.

12. Frimpong F., Windt C.W., Dusschoten D., Naz A.A., Frei M., Fiorani F. A Wild Allele of *Pyrroline-5-Carboxylate Synthase1* Leads to Proline Accumulation in Spikes and Leaves of Barley Contributing to Improved Performance Under Reduced Water Availability: *Front. Plant Sci.* 2021;12: 633448. - DOI: 10.3389/fpls.2021.633448.

13. El Moukhtari A., Cabassa-Hourton C., Farissi M., Savouré A. How Does Proline Treatment Promote Salt Stress Tolerance During Crop Plant Development? *Front. Plant Sci.* 2020; 11:1127. - DOI: 10.3389/fpls.2020.01127.

14. Buffagni V., Vurro F., Janni M., Gulli M., Keller A.A., Marmioli N. Shaping Durum Wheat for the Future: Gene Expression Analyses and Metabolites Profiling Support the Contribution of BCAT Genes to Drought Stress Response: *Front. Plant Sci.* 2020; 11:891. - DOI: 10.3389/fpls.2020.00891.

15. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В. Некоторые результаты испытания тополей в Центральной лесостепи// Лесохозяйственная информация. — 2023. — № 1. — С. 111–120. — DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.09.

16. Учарова Ю. Н., Зюбровская А. В., Христинич В.В. Выращивание тополя пирамидального в зеленом строительстве// Молодой ученый. — 2017. — № 5 (139). — С. 121-123. — URL: <https://moluch.ru/archive/139/39206/>.

17. Абрамов А. Тополя проклинаят, а зря: деревьям просят дать второй шанс в городах. - 30 июня 2022: Сайт: Комсомольская правда. – URL: <https://www.kp.ru/daily/27412/4611038/>.

18. Gharehbeglou P., Sarabandi K., Akbarbaglu Z. Insights into enzymatic hydrolysis: Exploring effects on antioxidant and functional properties of bioactive peptides from *Chlorella* proteins. *Journal of Agriculture and Food Research.* 2024;16: 101129. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101129>.

19. Mohanty U., Majumdar R.K., Mohanty B., Mehta N.K., Parhi J. Influence of the extent of enzymatic hydrolysis on the functional properties of protein hydrolysates from visceral waste of *Labeo rohita*: *Food Science Technology.* 2021;58(11):4349–4358. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04915-3>.

20. Bai L., Tian X., Wang Y., Zhang K., Guo J., Ma C. et al. Antioxidant activity during in vitro gastrointestinal digestion and the mode of action with tannins of cowhide-derived collagen hydrolysates: The effects of molecular weight: *Food Bioscience.* 2023; 53:102773.

### References

1. Shvetsova Ye.A., Bunkova N.P. *Otsenka primeneniya metodov cherenkovaniya k virashchivaniyu topolya piramidalnogo (Populus pyramidalis) seleksii N.A. Konovalova i topolya italyanskogo (Populus italica) v usloviyakh Yekaterinburga* [Evaluation of the application of cuttings to the cultivation of N.A. Konovalov's pyramidal poplar (*Populus pyramidalis*) and Italian poplar (*Populus italica*) in Yekaterinburg]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii. – Yekaterinburg: UGLTU = Scientific creativity of youth is dedicated to the Russian forest complex. – Yekaterinburg: UGLTU. 2023; 389-393. (In Russ.).

2. Bannoud F., Bellini S. *Adventitious rooting in populist forms: renewal and prospects. The front:* *Plant Sci.* 2021;12: 668837. DOI:10.3389/fpls.2021.668837.

3. Li J., Jia H., Sun P., Zhang J., Xia Y., Hu J. et al. *WUSCHELA (PtoWUSa) participates in the plasticity of Adventist roots in poplar. Genes (Basel).* 2020; 11: 176. DOI: 10.3390/genes11020176.

4. Ranjan A., Perrone I., Alallak S., Singh R., Rigal A., Brunoni F. et al. *The molecular basis of differential adventitious root competence in poplar genotypes*: J. Express Bot. 2022; 73; 4046–4064. DOI:10.1093/jxb/erac126.
5. Yue J., Yang H., Yang S., Wang J. *TDIF regulates auxin accumulation and modulates auxin sensitivity to enhance both adventitious root and lateral root formation in poplar trees*: The physiology of the tree. 2020; 40; 1534–1547. DOI:10.1093/treephys/tpaa077.
6. Yang S., Bai J., Wang J. *TDIF peptides regulate root growth by affecting auxin homeostasis and PINs expression in Arabidopsis thaliana*: Front. Plant. 2020; 29;251(6):109. DOI: 10.1007/s00425-020-03406-1.
7. Ahkami A.H. *Systems biology of root development in Populus: Review and perspectives*: Plant Science. 2023;335. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818>.
8. Amir H. Akhkami. *Systemic biology of root development in Populus: an overview and prospects Issue*. Plant Sci. 2023; 335: 111818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818>.
9. Zhang M., Zhou H., Xiang H. et al. *Characterization and analysis of genetic differences in the development of adventitious roots of Populus germplasm resources*: Plant Mol Biol. 2024; 114, 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-024-01418-z>.
10. Arya, A.; Husen, A. *The role of various auxins in the formation of adventitious roots. in the ecological, physiological and chemical control of accidental rooting of cuttings*; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2022; pp. 213-238. [Google Academy].
11. Ali M., Jeddi K., Attia M.S., Elsayed S.M., Yusuf M., Osman M.S., Soliman M.H., Hessini K. *Wuxal amino (Bio stimulant) improved growth and physiological performance of tomato plants under salinity stress through adaptive mechanisms and antioxidant potential*: Saudi Journal of Biological Sciences. 2021; 28 (6):3204-3213. DOI:10.1186/s40529-022-00345-w.
12. Frimpong F., Windt C.W., Dusschoten D., Naz A.A., Frei M., Fiorani F. *A Wild Allele of Pyrroline-5-Carboxylate Synthase1 Leads to Proline Accumulation in Spikes and Leaves of Barley Contributing to Improved Performance Under Reduced Water Availability*: Front. Plant Sci. 2021;12: 633448. DOI: 10.3389/fpls.2021.633448.
13. El Moukhtari A., Cabassa-Hourton C., Farissi M., Saviouré A. *How Does Proline Treatment Promote Salt Stress Tolerance During Crop Plant Development?* Front. Plant Sci. 2020; 11:1127. DOI: 10.3389/fpls.2020.01127.
14. Buffagni V., Vurro F., Janni M., Gulli M., Keller A.A., Marmioli N. *Shaping Durum Wheat for the Future: Gene Expression Analyses and Metabolites Profiling Support the Contribution of BCAT Genes to Drought Stress Response*: Front. Plant Sci. 2020; 11:891. DOI: 10.3389/fpls.2020.00891.
15. Czarev A.P., Czareva R.P., Czarev V.A., Laur N.V. *Nekotorye rezultaty ispytaniya topolej v Centralnoj lesostepi*. [Some results of testing poplars in the Central forest-steppe]. Lesoxozyajstvennaya informaciya = Forestry information. 2023; 1:111–120. (In Russ.). DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.09.
16. Ucharova Yu. N., Zyubrovskaya A. V., Xristich V.V. *Vyrashhivanie topolya piramidalnogo v zelenom stroitelstve* [Cultivation of pyramidal poplar in green construction]. Molodoj uchenyj = Young scientist. 2017; 5 (139): 121-123. (In Russ.). URL: <https://moluch.ru/archive/139/39206/>.
17. Abramov A. *Topolya proklinayut, a zrya: Derevyam prosyat dat vtoroj shans v gorodax* [Poplars are cursed, but in vain: Trees are asked to be given a second chance in cities] - 30 iyunya 2022: Sajt: Komsomolskaya Pravda = June 30, 2022: Website: Komsomolskaya Pravda. (In Russ.). URL: <https://www.kp.ru/daily/27412/4611038/>.
18. Gharehbeqlou P., Sarabandi K., Akbarbaglu Z. *Insights into enzymatic hydrolysis: Exploring effects on antioxidant and functional properties of bioactive peptides from Chlorella proteins*: Journal of Agriculture and Food Research. 2024;16: 101129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101129>.
19. Mohanty U., Majumdar R.K., Mohanty B., Mehta N.K., Parhi J. *Influence of the extent of enzymatic hydrolysis on the functional properties of protein hydrolysates from visceral waste of Labeo rohita*: Food Science Technology. 2021;58(11):4349–4358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04915-3>.

20. Bai L., Tian X., Wang Y., Zhang K., Guo J., Ma C. et al. *Antioxidant activity during in vitro gastrointestinal digestion and the mode of action with tannins of cowhide-derived collagen hydrolysates: The effects of molecular weight*. Food Bioscience. 2023; 53:102773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102773>.

### Сведения об авторах

✉ *Брындина Лариса Васильевна* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru).

*Репникова Людмила Александровна* – аспирант лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>, e-mail: [lyu58445295@yandex.ru](mailto:lyu58445295@yandex.ru).

*Корчагина Анна Юрьевна* – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru).

*Живитченко Дарья Ивановна* - аспирант лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>, e-mail: [darzhivitchenko@gmail.com](mailto:darzhivitchenko@gmail.com).

*Посметьев Валерий Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

*Мануковский Андрей Юрьевич* - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>, e-mail: [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru)

### Information about the authors

✉ *Larisa V. Bryndina* – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru).

*Lyudmila A. Repnikova* - Post graduate student at of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>, e-mail: [lyu58445295@yandex.ru](mailto:lyu58445295@yandex.ru).

*Anna Yu. Korchagina* - Cand. Sci. (Technic.), junior researcher at the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru).

*Darya I. Zhivitchenko* - Post graduate student at of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>, e-mail: [darzhivitchenko@gmail.com](mailto:darzhivitchenko@gmail.com).

*Valerii I. Posmetev* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

*Andrey Yu. Manukovskiy* - Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy. Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>, e-mail: [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru).

✉ – Для контактов /Corresponding author