БИООРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 13.08.2026
Статья принята к публикации: 12.09.2026
Статья опубликована: 07.10.2026

УДК 547.466:581.14

DOI: 10.32743/UniChem.2026.148.10.23409

Синтез амидных производных индол-3-уксусной кислоты с аминокислотами и исследование их биологической активности на проростках ячменя (*Hordeum vulgare L.*)

Суярова Дилдора Амануллаевна
PhD, докторант
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: suyarovadildora90@gmail.com
Эрбутаев Дониер Шавкат угли
магистрант
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: thedoniyor01@gmail.com
Джураев Тулкин Арзикулович
доц.
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: t_jurayev@mail.ru
Усмонов Фозил
магистрант
Гулистанский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Гулистан
E-mail: fozilusmonov01@gmail.com

Synthesis of amide derivatives of indole-3-acetic acid with amino acids and investigation of their biological activity on barley seedlings (*Hordeum vulgare L.*)

Suyarova Dildora Amanullayevna
PhD Doctoral Student
Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan
Doniyor Shavkat ugli Erbutayev
Master's Student, Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan

Библиографическое описание: Синтез амидных производных индол-3-уксусной кислоты с аминокислотами и исследование их биологической активности на проростках ячменя (Hordeum vulgare L.) // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Суярова Д.А. [и др.]. 2026. 10(148). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23409

Djuraev Tulkin Arzikulovich
Associate Professor
Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan
Usmonov Fozil
Master's Student, Gulistan State University
Republic of Uzbekistan, Gulistan

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты синтеза амидных производных индол-3-уксусной кислоты (ИУК) с L-аланином, L-валином, L-лейцином, L-метионином, L-пролином, L-лизином и L-аргинином методом карбодиимидной конденсации с использованием системы DCC/HOBt. Синтез проводили в мягких условиях с последующей очисткой целевых соединений; их строение и индивидуальность подтверждали методами ИК-спектроскопии, тонкослойной хроматографии и физико-химического анализа. На данном этапе биологическую активность изучали для амидного производного ИУК с аргинином (ИУК–Арг) на проростках ячменя (*Hordeum vulgare L.*) по показателям энергии прорастания, лабораторной всхожести, длины корневой системы и надземной части, а также сырой и сухой биомассы. Установлено, что ИУК–Арг оказывало выраженное рострегулирующее действие по сравнению с контрольным вариантом и свободной ИУК. Наиболее выраженный эффект наблюдался при концентрациях 10^{-5} и 10^{-6} М. На восьмые сутки длина корневой системы при обработке ИУК–Арг в указанных концентрациях составила соответственно 12,17 и 12,50 см, тогда как в контрольном варианте данный показатель составлял 8,73 см, что соответствует увеличению в 1,39 и 1,43 раза. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной ростстимулирующей активности ИУК–Арг и перспективности его дальнейшего изучения в качестве потенциального регулятора роста растений.

Abstract

This study presents the synthesis of amide derivatives of indole-3-acetic acid (IAA) with L-alanine, L-valine, L-leucine, L-methionine, L-proline, L-lysine, and L-arginine using carbodiimide-mediated coupling with the DCC/HOBt system. The target compounds were synthesized under mild conditions and purified prior to characterization. Their structures and individuality were characterized by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, thin-layer chromatography (TLC), and physicochemical analysis. At this stage, the biological activity of the arginine amide derivative of IAA (IAA–Arg) was evaluated on barley seedlings (*Hordeum vulgare L.*) using germination energy, laboratory germination, root and shoot length, and fresh and dry biomass as indicators. IAA–Arg showed a pronounced growth-regulating effect compared with the untreated control and free IAA. The most pronounced effect was observed at concentrations of 10^{-5} and 10^{-6} M. On the eighth day, root length reached 12.17 and 12.50 cm, respectively, compared with 8.73 cm in the control, corresponding to 1.39- and 1.43-fold increases. These results demonstrate the pronounced growth-stimulating activity of IAA–Arg and support its further investigation as a potential plant growth regulator.

Ключевые слова: индол-3-уксусная кислота, аминокислоты, амидные производные, DCC/HOBt, органический синтез, регуляторы роста растений, биологическая активность, ячмень, Hordeum vulgare L, ИК-спектроскопия, тонкослойная хроматография.

Keywords: indole-3-acetic acid, amino acids, amide derivatives, DCC/HOBt, organic synthesis, plant growth regulators, biological activity, barley, *Hordeum vulgare* L, FTIR spectroscopy, thin-layer chromatography.

Введение

В последние годы разработка новых биологически активных соединений, сочетающих высокую физиологическую эффективность и экологическую безопасность, является одним из приоритетных направлений биоорганической химии и агробиотехнологии [3, 8]. В условиях изменения климата, засоления и засухи возрастает потребность в эффективных регуляторах роста растений, способных повышать продуктивность сельскохозяйственных культур и их устойчивость к абиотическим стрессам [4, 1]. Одним из важнейших природных фитогормонов является индол-3-уксусная кислота (ИУК) — основной представитель ауксинов, регулирующий деление и растяжение клеток, формирование корневой системы, развитие побегов и другие процессы роста растений [6]. Однако свободная ИУК характеризуется низкой стабильностью вследствие ферментативного окисления, фотодеструкции и микробиологического разложения, что ограничивает её практическое применение. Поэтому актуальной задачей является получение более стабильных производных ИУК с пролонгированным физиологическим действием [9, 16]. Перспективным направлением считается синтез аминокислотных конъюгатов ИУК. В растениях такие соединения участвуют в транспорте, депонировании и контролируемом высвобождении ауксина, поддерживая гормональный баланс [10, 14]. Кроме того, конъюгаты с природными α-аминокислотами представляют интерес как потенциальные регуляторы роста и антистрессовые препараты благодаря их биосовместимости и участию в метаболических процессах растений [11].

Для получения амидных производных ИУК эффективным является метод карбодиимидной конденсации с использованием системы DCC/HOBt, обеспечивающий селективное образование амидной связи в мягких условиях и позволяющий проводить синтез без предварительной защиты функциональных групп аминокислот [13, 7]. Несмотря на значительный интерес к химической модификации ИУК, биологическая активность большинства её аминокислотных амидов изучена недостаточно, особенно их влияние на ранние этапы развития сельскохозяйственных культур [12]. В связи с этим целью настоящей работы являлся синтез новых аминокислотных конъюгатов индол-3-уксусной кислоты методом DCC/HOBt и сравнительная оценка их рострегулирующей активности на проростках ячменя (Hordeum vulgare L.) по морфометрическим и физиологическим показателям [2].

Материалы и методы исследования

В качестве исходных реагентов для синтеза амидных производных индол-3-уксусной кислоты (ИУК) использовались индол-3-уксусная кислота, N,N′-дициклогексилкарбодиимид (DCC), 1-гидроксибензотриазол (HOBt), а также L-аминокислоты: L-аланин, L-валин, L-лейцин, L-метионин, L-пролин, L-лизин и L-аргинин. Все реагенты применялись без дополнительной очистки (аналитическая степень чистоты).В качестве растворителей использовались тетрагидрофуран (ТГФ), хлороформ, метанол и дистиллированная вода. Для регулирования pH применяли 1 М раствор гидроксида натрия.

ИК-спектры синтезированных соединений регистрировали на спектрофотометре IRAffinity-1S (Shimadzu, Япония) в диапазоне 4000–500 $см^{-1}$.Тонкослойную хроматографию (ТСХ) проводили на пластинах Silica gel F254 (Merck). В качестве элюентов использовались системы хлороформ:метанол в соотношениях 8:1 и 12:1. Визуализацию пятен осуществляли под УФ-лампой (254/366 нм), а также с использованием нингидринового реактива.Температуры плавления определяли на приборе BÜCHI Melting Point M-560 и использовали как критерий чистоты соединений.

Синтез амидных производных индол-3-уксусной кислоты проводили методом карбодиимидной конденсации с использованием системы DCC/HOBt.В типичном эксперименте 3,0 ммоль индол-3-уксусной кислоты растворяли в 15–20 мл тетрагидрофурана (ТГФ) при перемешивании. К полученному раствору при охлаждении (0–5 °C) добавляли 3,0 ммоль DCC и реакционную смесь перемешивали в течение 10–15 минут для активации карбоксильной группы. Затем добавляли 3,0 ммоль HOBt и продолжали перемешивание в течение 30 минут при тех же условиях. Отдельно готовили раствор соответствующей L-аминокислоты (3,0 ммоль) в 3–5 мл воды с добавлением 1–2 капель 1 М NaOH для частичной нейтрализации.

Полученный раствор аминокислоты по каплям добавляли к активированной смеси ИУК при комнатной температуре. Реакционную смесь перемешивали 1–2 часа. Образовавшийся побочный продукт N,N′-дициклогексилмочевина (DCU) удаляли фильтрацией. Фильтрат упаривали под пониженным давлением. Остаток экстрагировали хлороформом, органический слой сушили безводным Na_2SO_4 и упаривали. Очистку целевых соединений проводили перекристаллизацией из системы хлороформ: метанол.

В качестве объекта исследования использовали семена ячменя сорта «Ўзбекистон-30». Для изучения рострегулирующей активности использовали индол-3-уксусную кислоту (ИУК) и её амидное производное с аргинином (ИУК–Арг). Для проведения биологического эксперимента использовали растворы ИУК и ИУК–Арг в концентрациях 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6} и 10^{-7} М. В качестве контрольного варианта использовали дистиллированную воду (dH_2O).

Перед началом эксперимента семена ячменя промывали водой. Для каждого экспериментального варианта использовали три чашки Петри, в каждую из которых помещали по 30 семян. Таким образом, общее количество семян для каждого варианта составляло 90 штук. В каждую чашку Петри помещали фильтровальную бумагу, которую увлажняли соответствующим раствором ИУК, ИУК–Арг или дистиллированной водой в контрольном варианте. Семена равномерно размещали на увлажнённой фильтровальной бумаге. Все варианты опыта культивировали в одинаковых условиях при постоянной

температуре +27 °C. Проращивание семян проводили в условиях естественного освещения при обычных лабораторных условиях, без искусственного регулирования фотопериода. Наблюдения проводили на 2-е, 3-и, 4-е и 8-е сутки после начала эксперимента.

Биологическую активность исследуемых соединений оценивали по основным показателям роста и развития проростков ячменя. На 2-е, 3-и, 4-е и 8-е сутки культивирования определяли длину корневой системы и надземной части проростков. Результаты измерений выражали в сантиметрах. Дополнительно определяли энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян, а также показатели накопления сырой и сухой биомассы проростков. Полученные показатели сравнивали с контрольным вариантом (dH_2O) и соответствующими вариантами, обработанными ИУК и ИУК–Арг.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием методов дисперсионного анализа. Для каждого срока наблюдения (2-е, 3-и, 4-е и 8-е сутки) различия между девятью экспериментальными группами оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA). Результаты представлены в виде среднего значения (M) ± стандартной ошибки среднего (SE). Для определения статистически значимых различий между отдельными вариантами и контрольной группой после проведения ANOVA использовали апостериорный критерий Тьюки (Tukey HSD). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$, высоко значимыми — при $p < 0,01$. Количество биологических повторностей составляло $n = 3$; для варианта ИУК+Арг–4М на 2-е сутки фактическое число повторностей составило $n = 2$ в связи с отсутствием третьего измерения в исходных данных.

Результаты и обсуждение

В рамках настоящего исследования были синтезированы семь амидных производных индол-3-уксусной кислоты с различными аминокислотами. На данном этапе биологические исследования были проведены для одного из полученных соединений — амидного производного ИУК с аргинином (ИУК–Арг), которое изучали в диапазоне концентраций 10^{-4}–10^{-7} М. Остальные синтезированные производные будут исследованы на следующих этапах работы. В результате проведения карбодиимидной конденсации индол-3-уксусной кислоты с L-аминокислотами в присутствии системы DCC/HOBt были успешно получены соответствующие амидные производные (ИУК–Ала, ИУК–Вал, ИУК–Лей: Rf = 0,71;ИУК–Мет, ИУК–Про, ИУК–Лиз, ИУК–Арг). Реакции протекали в мягких условиях (0–25 °C) и завершались в течение 1–2 часов. Выход целевых соединений составлял 68–75 %, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного метода.



Рисунок 1. ИК-спектр амидного производного индол-3-уксусной кислоты с аргинином (ИУК–Арг)

ИК-спектроскопический анализ подтвердил образование амидной связи во всех синтезированных соединениях. Во всех спектрах наблюдались характерные полосы:1650–1665 $см^{-1}$ — валентные колебания C=O амидной группы (амид I);1530–1550 $см^{-1}$ — деформационные колебания N–H (амид II);3300–3350 $см^{-1}$ — широкая полоса валентных колебаний N–H; 2920–2960 $см^{-1}$ — алифатические C–H связи. Отсутствие характерной полосы карбоксильной группы исходной ИУК (~1710–1725 $см^{-1}$) подтверждает полную конверсию исходного субстрата и образование амидов.

Чистота и индивидуальность полученных соединений были подтверждены методом тонкослойная хроматография(ТСХ). Значения Rf зависели от природы аминокислотного фрагмента: ИУК–Ала: Rf = 0,62;ИУК–Вал: Rf = 0,68; ИУК–Лей: Rf = 0,71;ИУК–Мет: Rf = 0,58; ИУК–Про: Rf = 0,65;ИУК–Лиз: Rf = 0,42;ИУК–Арг: Rf = 0,35..Более низкие значения Rf для лизина и аргинина обусловлены их высокой полярностью и наличием дополнительных аминогрупп, усиливающих взаимодействие с силикагелем. Полученные амидные производные характеризовались различными температурами плавления (168–185 °C), что подтверждает их индивидуальность.

В настоящем исследовании биологическая активность была изучена для амидного производного индол-3-уксусной кислоты с аргинином (ИУК–Арг) в различных концентрациях. Полученные результаты показали, что ИУК–Арг оказывало выраженное влияние на рост корневой системы проростков ячменя по сравнению с контрольным вариантом. Наблюдаемый эффект зависел от концентрации исследуемого соединения и продолжительности культивирования. Выраженное ростостимулирующее действие ИУК–Арг может быть обусловлено сочетанием физиологической активности индол-3-уксусной кислоты и биологической роли аргинина. Аргинин участвует в азотном обмене растений и может быть связан с процессами, регулирующими клеточное деление, растяжение клеток и развитие корневой системы. Кроме того, аргинин является метаболическим предшественником ряда физиологически активных соединений, включая полиамины и оксид

азота, которые участвуют в регуляции роста и развития растений. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о перспективности ИУК–Арг как потенциального росторегулирующего соединения. При этом следует отметить, что в рамках данного исследования биологическая активность остальных синтезированных амидных производных ИУК с аминокислотами не изучалась. Поэтому сравнительная оценка эффективности ИУК–Арг с ИУК–Ала, ИУК–Вал, ИУК–Лей, ИУК–Мет, ИУК–Про и ИУК–Лиз в настоящей работе не проводилась. Полученные результаты относятся непосредственно к исследованному производному ИУК–Арг и его изученным концентрациям. Результаты статистического анализа показали, что влияние исследуемых препаратов на длину корневой системы проростков ячменя зависело от продолжительности культивирования. На 2-е сутки различия между экспериментальными вариантами не достигали статистической значимости ($F(8,17) = 1,982$; $p = 0,1123$). На 3-и сутки также не было выявлено общего статистически значимого различия между группами ($F(8,18) = 2,307$; $p = 0,0671$), хотя при последующем сравнении по критерию Тьюки вариант ИУК+ Арг –10 – 6 М отличался от контроля ($p = 0,0212$).На 4-е сутки общий эффект исследуемых вариантов также не достигал статистической значимости ($F(8,18) = 2,146$; $p = 0,0852$). Несмотря на увеличение средней длины корней в отдельных вариантах, различия относительно контрольной группы после поправки на множественные сравнения не были статистически значимыми ($p > 0,05$).Наиболее выраженный эффект наблюдался на 8-е сутки культивирования. Однофакторный дисперсионный анализ выявил высоко значимые различия между экспериментальными группами ($F(8,18) = 17,034$; $p < 0,001$). Согласно критерию Тьюки, статистически значимое увеличение длины корней по сравнению с контролем отмечено для вариантов ИУК+ Арг –10-4М ($p = 0,0075$), ИУК+ Арг –10-5М ($p < 0,001$), ИУК+ Арг –10-6М ($p < 0,001$) и ИУК+ Арг –10-7М ($p = 0,0004$). Наибольшая средняя длина корневой системы отмечена при использовании ИУК+ Арг –10-6М и составила 12,50 ± 0,29 см, тогда как в контрольном варианте данный показатель составлял 8,73 ± 0,15 см. Таким образом, статистический анализ подтверждает выраженное стимулирующее действие амидного производного ИУК с аргинином, особенно на поздних этапах развития проростков. Наиболее выраженный эффект был зарегистрирован на 8-е сутки культивирования, при этом максимальное значение длины корневой системы наблюдалось в варианте ИУК+ Арг –10-6М.

Таблица 1.

Показатели длины корней (см) (M±m)

Варианты опыта	Концен-трация (моляр)	2 день	3 день	4 день	8 день
Контроль (dH2O)		0,83±0,03	1,87±0,19	3,33±0,17	8,73±0,15
ИУК	4М	0,90±0,06	2,03±0,03	3,93±0,22	9,57±0,07
ИУК	5М	0,93±0,07	2,10±0,06	3,53±0,32	9,50±0,29
ИУК	6М	1,07±0,09	2,17±0,09	3,5±0,29	10,00±0,29
ИУК	7М	1,00±0,10	2,07±0,03	3,87±0,19	10,00±0,29
ИУК -Арг	4М	1,00±0,08	2,07±0,03	3,83±0,17	10,67±0,60**
ИУК -Арг	5М	1,13±0,03	2,10±0,06	4,33±0,17	12,17±0,33**

Варианты опыта	Концен-трация (моляр)	2 день	3 день	4 день	8 день
ИУК -Арг	6М	1,10±0,06	2,33±0,09*	4,33±0,17	12,5±0,29**
ИУК -Арг	7М	1,07±0,09	2,20±0,06	4,36±0,25	11,30±0,15**

*Примечание: * — различия статистически значимы по сравнению с контролем (p<0,05); ** — различия высоко статистически значимы (p<0,01)..*

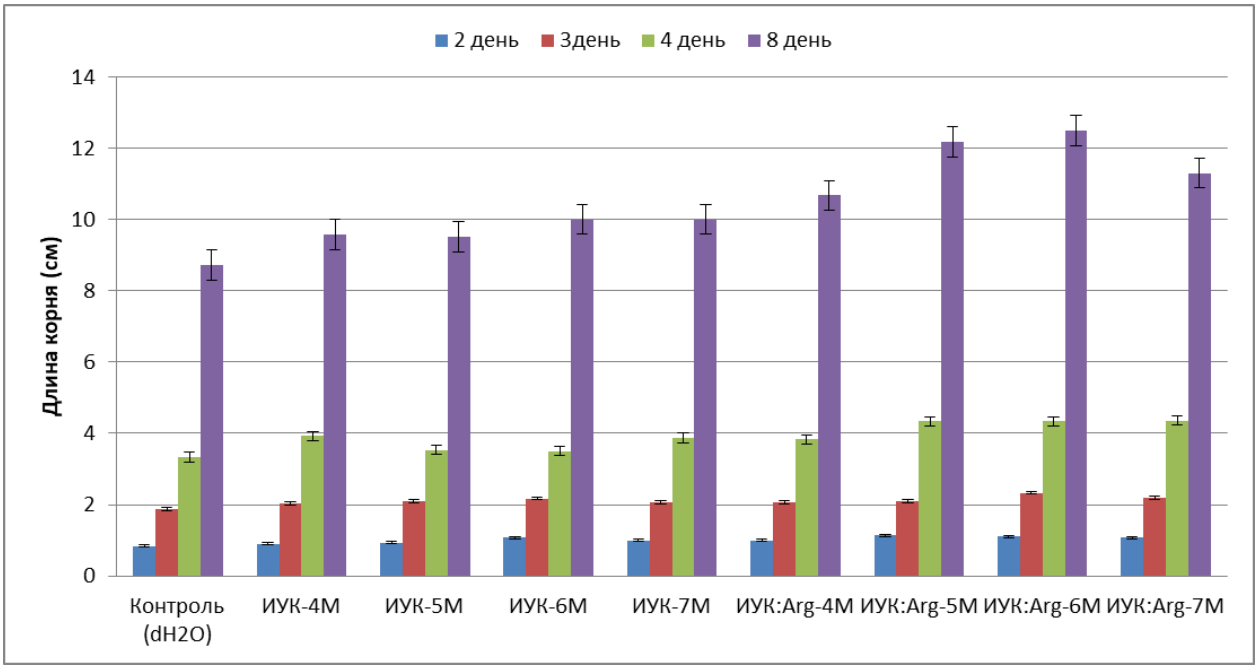


Рисунок 2. Влияние синтезированных производных индол-3-уксусной кислоты на динамику роста корневой системы проростков ячменя (Hordeum vulgare L.)

Одним из наиболее информативных показателей физиологической активности регуляторов роста является длина корневой системы проростков. В настоящем исследовании для углублённой оценки биологической активности было выбрано амидное производное индол-3-уксусной кислоты с аргинином (ИУК–Арг). Полученные результаты свидетельствуют о выраженном стимулирующем влиянии ИУК–Арг на рост корневой системы проростков ячменя по сравнению с контрольным вариантом. (рисунок 2).На вторые сутки различия между вариантами были незначительными. Однако начиная с третьих суток наблюдалось постепенное усиление ростостимулирующего эффекта большинства исследуемых соединений. Наиболее выраженное влияние зарегистрировано у производных ИУК:Арг- 10^{-5} М и ИУК:Арг- 10^{-}6 М, которые к восьмым суткам обеспечивали максимальную длину корней — около 12–12,5 см, что значительно превышало контрольный вариант (≈8,8 см). Растворы ИУК в концентрациях 10^{-6} и 10^{-7} М также оказывали стимулирующее действие на развитие корневой системы, однако их эффект был менее выраженным по сравнению с ИУК–Арг. Полученные результаты позволяют предположить, что введение остатка аргинина в молекулу индол-3-уксусной кислоты способствует усилению физиологической активности соединения.

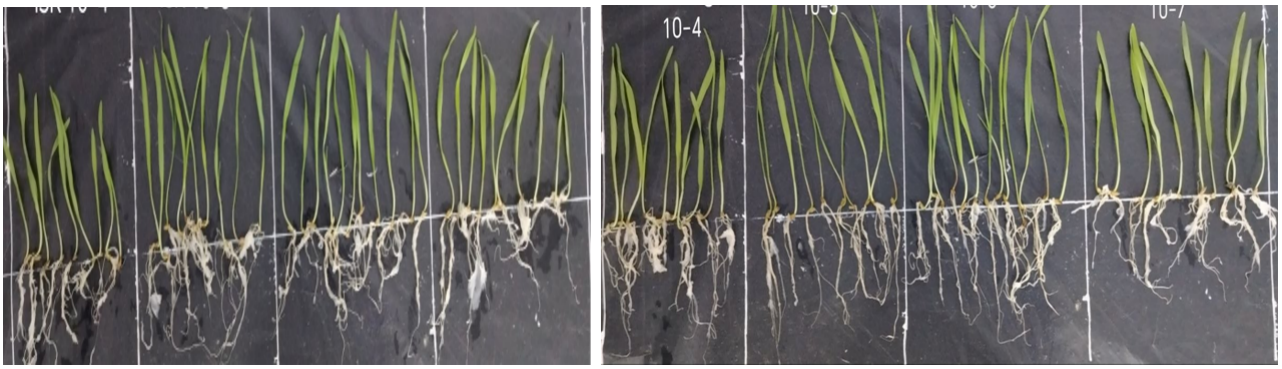


Рисунок 3. Влияние различных концентраций индол-3-уксусной кислоты (ИУК) и её амидного производного с аргинином (ИУК–Арг) на рост корневой системы проростков ячменя (Hordeum vulgare L.) на восьмые сутки культивирования. Слева представлены проростки, обработанные ИУК (4М–7М), справа — проростки, обработанные ИУК–Арг (4М–7М)

Вероятно, это связано с улучшением транспорта молекулы в растительных тканях, увеличением её устойчивости к ферментативной инактивации и постепенным высвобождением свободной индол-3-уксусной кислоты. Следует отметить, что наиболее высокая рострегулирующая активность наблюдалась при использовании соединений ИУК:Арг-10^{-5}М и ИУК:Арг-10^{-}6М, что свидетельствует о существовании оптимальной концентрации препарата. Дальнейшее увеличение концентрации не сопровождалось существенным усилением биологического эффекта. Наблюдаемое стимулирующее действие ИУК–Арг на рост корневой системы может быть связано с сочетанным влиянием индольного и аминокислотного компонентов молекулы. Индол-3-уксусная кислота является естественным ауксином, регулирующим процессы клеточного деления и растяжения, формирование и развитие корневой системы растений. В свою очередь, аргинин является важной аминокислотой, участвующей в азотном обмене и ряде физиолого-биохимических процессов растений. Кроме того, аргинин рассматривается как предшественник биосинтеза полиаминов и оксида азота, участвующих в регуляции роста, развития и адаптационных процессов растений. В связи с этим можно предположить, что объединение ИУК и аргинина в составе одного амидного производного может способствовать реализации комплексного росторегулирующего эффекта. Однако содержание полиаминов, оксида азота и параметры азотного обмена в настоящем исследовании непосредственно не определялись, поэтому данный механизм рассматривается как возможное объяснение наблюдаемого эффекта ИУК–Арг, а не как экспериментально установленный механизм его действия.

Заключение

В результате проведённого исследования разработан эффективный способ синтеза амидных производных индол-3-уксусной кислоты с аминокислотами с использованием карбодиимидной системы DCC/HOBt. Предложенный метод позволяет получать целевые соединения в мягких условиях без предварительной защиты функциональных групп аминокислот. Выход синтезированных соединений составил 68–75 %. Биологические испытания на проростках ячменя (Hordeum vulgare L.) показали выраженное ростстимулирующее действие исследованных соединений. Наиболее существенные различия наблюдались по длине корневой системы. На восьмые сутки длина корней в контрольном

варианте составила 8,73 см, тогда как при обработке ИУК–Арг в концентрации 5М и 6М она достигала соответственно 12,17 и 12,50 см, что превышало контроль в 1,39 и 1,43 раза соответственно. При использовании ИУК–Арг 10^{-4} М и 10^{-7}М длина корней на восьмые сутки составляла 10,67 и 11,30 см, что соответствовало увеличению относительно контроля в 1,22 и 1,29 раза. Для свободной ИУК наиболее высокие значения также отмечены при концентрациях 10^{-6} М и 10^{-7}М — по 10,00 см, что в 1,15 раза превышало контрольный показатель. Динамика роста также свидетельствовала о постепенном усилении эффекта препаратов. В варианте ИУК–Арг 10^{-5}М длина корней увеличилась с 2,10 см на третьи сутки до 4,33 см на четвёртые сутки, то есть в 2,06 раза, а к восьмым суткам достигла 12,17 см. При ИУК–Арг 10^{-6}М данный показатель увеличился с 2,33 до 4,33 см за период с третьих по четвёртые сутки (в 1,86 раза), а к восьмым суткам достиг 12,50 см. Таким образом, среди исследованных вариантов наиболее выраженное рострегулирующее действие проявили амидные производные ИУК с аргинином в концентрациях 10^{-5} М и 10^{-6} М. Их применение обеспечивало увеличение длины корневой системы на 39 и 43 % соответственно по сравнению с контролем. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности ИУК–Арг 10^{-5} М и ИУК–Арг 10^{-6} М для дальнейшего изучения в качестве потенциальных регуляторов роста растений.

Список литературы

1. Adamowski M., Friml J. PIN-dependent auxin transport: action, regulation, and evolution // The Plant Cell. – 2015. – Т. 27, № 1. – P. 20–32. – DOI: 10.1105/tpc.114.134874.
2. Blakeslee J.J., Peer W.A., Murphy A.S. Auxin transport // Current Opinion in Plant Biology. – 2005. – Т. 8. – P. 494–500. – DOI: 10.1016/j.pbi.2005.07.014.
3. Brunoni F. et al. Amino acid conjugation of oxIAA is a secondary metabolic regulation involved in auxin homeostasis // New Phytologist. – 2023. – Т. 238, № 6. – P. 2264–2270. – DOI: 10.1111/nph.18887.
4. Casanova-Sáez R., Mateo-Bonmatí E., Ljung K. Auxin Metabolism in Plants // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2021. – Т. 13, № 3. – DOI: 10.1101/cshperspect.a039867.
5. Casanova-Sáez R., Mateo-Bonmatí E. Auxin metabolism: a dynamic regulator of plant development // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Т. 22, № 21. – Art. 11292. – DOI: 10.3390/ijms222111292.
6. Du M., Spalding E.P., Gray W.M. Rapid Auxin-Mediated Cell Expansion // Annual Review of Plant Biology. – 2020. – Т. 71. – P. 379–402. – DOI: 10.1146/annurev-arplant-073019-025907.
7. Enders T.A., Strader L.C. Auxin activity: past, present, and future // American Journal of Botany. – 2015. – Т. 102, № 2. – P. 180–196. – DOI: 10.3732/ajb.1400285.
8. Hayashi K. et al. The main oxidative inactivation pathway of the plant hormone auxin // Nature Communications. – 2021. – Т. 12. – Art. 6752. – DOI: 10.1038/s41467-021-27020-1.
9. Hayashi K.-I. Chemical Biology in Auxin Research // Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. – 2021. – Т. 13, № 5. – DOI: 10.1101/cshperspect.a040105.

10. Ludwig-Müller J. Auxin conjugates: their role for plant development and in the evolution of land plants // Journal of Experimental Botany. – 2011. – T. 62, № 6. – P. 1757–1773. – DOI: 10.1093/jxb/erq412.
11. Mellor N. et al. Dynamic regulation of auxin oxidase and conjugating enzymes AtDAO1 and GH3 modulates auxin homeostasis // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – T. 113, № 39. – P. 11022–11027. – DOI: 10.1073/pnas.1604458113.
12. Novák O., Napier R., Ljung K. Zooming In on Plant Hormone Analysis: Tissue- and Cell-Specific Approaches // Annual Review of Plant Biology. – 2017. – T. 68. – P. 323–348. – DOI: 10.1146/annurev-arplant-042916-040812.
13. Olatunji D., Geelen D., Verstraeten I. Control of endogenous auxin levels in plant root development // International Journal of Molecular Sciences. – 2017. – T. 18, № 12. – Art. 2587. – DOI: 10.3390/ijms18122587.
14. Semeradova H., Montesinos J.C., Benkova E. All Roads Lead to Auxin: Post-translational Regulation of Auxin Transport by Multiple Hormonal Pathways // Plant Communications. – 2020. – T. 1. – Art. 100048. – DOI: 10.1016/j.xplc.2020.100048.
15. Staswick P.E. et al. Characterization of an Arabidopsis enzyme family that conjugates amino acids to indole-3-acetic acid // Plant Cell. – 2005. – T. 17, № 2. – P. 616–627. – DOI: 10.1105/tpc.104.026690.
16. Wang R., Estelle M. Diversity and specificity: auxin perception and signaling through the TIR1/AFB pathway // Current Opinion in Plant Biology. – 2014. – T. 21. – P. 51–58. – DOI: 10.1016/j.pbi.2014.06.006.
17. Weijers D., Wagner D. Transcriptional Responses to the Auxin Hormone // Annual Review of Plant Biology. – 2016. – T. 67. – P. 539–574. – DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112122.
18. Zhao Y. Essential Roles of Local Auxin Biosynthesis in Plant Development and in Adaptation to Environmental Changes // Annual Review of Plant Biology. – 2018. – T. 69. – P. 417–435. – DOI: 10.1146/annurev-arplant-042817-040226.