

Оригинальная статья / Original article

УДК 577.1: 543.42: 547.1

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-90-98>



Образование первичных метаболитов и хлорофилла в растениях *Cucumis sativus* L. при воздействии конъюгата *l*-рамнозы с *m*-аминобензойной кислотой

© И.С. Черепанов, А.А. Журавлева

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Российская Федерация

Резюме: Изучен характер влияния конъюгата *l*-рамнозы с *m*-аминобензойной кислотой на динамику образования первичных метаболитов и хлорофилла при проращивании семян огурца (*Cucumis sativus* L.). Синтетический аминоконъюгат (рамнозиламин) оказывает ингибирующее влияние на рост тест-растения, ослабевающее с уменьшением концентрации его раствора от 0,05 до 0,0005%. Анализ изменения профилей ИК-Фурье спектров образцов корней и гипокотилей пророщенных семян показывает наиболее существенные изменения в углеводном пуле и протеиновой составляющей биоматериала. С уменьшением содержания аминоконъюгата до 0,0005% происходит увеличение интенсивности полос 1060, 1100 и 1158 см⁻¹, указывающее на накопление целлюлозных полисахаридов. Аналогичным образом меняется интенсивность амидных полос, при этом значения волновых чисел вторых производных спектральных сигналов в области 1600–1700 см⁻¹ свидетельствуют о конформационных изменениях белков в процессе прорастания. Электронные спектры экстрактов и колебательные спектры образцов семядолей демонстрируют более интенсивное образование хлорофилла в системах с аминоконъюгатом, увеличивающееся с уменьшением содержания в среде последнего, при этом дополнительно свидетельствуют о различном состоянии фотосинтетических пигментов в контрольном и исследуемых образцах. По нашему предположению, влияние аминоконъюгата на параметры роста, образование первичных метаболитов и фотосинтетических пигментов обусловлено его присутствием в среде совместно с *m*-аминобензойной кислотой и *l*-рамнозой, образующимися в качестве продуктов гидролиза, протекание которого подтверждается поляриметрическими измерениями. Результаты исследования подтверждают перспективность поиска и испытаний соединений, содержащих в структуре активные компоненты разного спектра действия.

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L., метаболиты, *l*-рамноза, *m*-аминобензойная кислота, аминоконъюгат, регуляторы роста, спектроскопия

Для цитирования: Черепанов И.С., Журавлева А.А. Образование первичных метаболитов и хлорофилла в растениях *Cucumis sativus* L. при воздействии конъюгата *l*-рамнозы с *m*-аминобензойной кислотой. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 1. С. 90–98. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-90-98>

Formation of primary metabolites and chlorophyll in the plants of *Cucumis sativus* L. when exposed to *l*-ramnose conjugated with *m*-aminobenzoic acid

Igor S. Cherepanov, Alina A. Zhuravleva

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

Abstract: This article studies the effect of *l*-rhamnose conjugated with *m*-aminobenzoic acid on the formation of primary metabolites and chlorophyll during germination of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seeds. This synthetic aminoconjugate (rhamnosylamine) has an inhibitory effect on the growth of the plant under study, which weakens with a decrease in the solution concentration from 0.05 to 0.0005%. An analysis of changes in the FTIR spectra of the root and hypocotyl samples of germinated seeds showed significant changes in the carbohydrate pool and protein structure of the biomaterial. As the aminoconjugate content decreases to 0.0005%, the intensity of the bands at 1060, 1100 and 1158 cm⁻¹ increases, indicating the ac-

cumulation of cellulose polysaccharides. The intensity of the amide bands changes in a similar way, while the values of the wave numbers of the second derivatives of the spectral signals in the 1600-1700 cm^{-1} range indicate conformational changes in proteins during germination. The electronic spectra of extracts and the vibrational spectra of cotyledon samples demonstrated a more intense formation of chlorophyll in the systems comprising the aminoconjugate; the chlorophyll content increases with a decrease in the content of the aminoconjugate in the medium. These spectra additionally indicate a different state of the photosynthetic pigments in the control and experimental samples. According to our assumption, the effect of the aminoconjugate on the growth parameters, the formation of primary metabolites and photosynthetic pigments can be explained by its presence in the medium simultaneously with *m*-aminobenzoic acid and *L*-rhamnose. The latter substances are formed as the products of hydrolysis, the course of which was confirmed by polarimetric measurements. The obtained results confirm the prospects of searching and testing compounds containing structural components of different action.

Keywords: *Cucumis sativus* L., metabolites, *L*-rhamnose, *m*-aminobenzoic acid, aminoconjugate, growth regulators, spectroscopy

For citation: Cherepanov IS, Zhuravleva AA. Formation of primary metabolites and chlorophyll in the plants of *Cucumis sativus* L. when exposed to *L*-rhamnose conjugated with *m*-aminobenzoic acid. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1):90–98. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-90-98>

ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом агротехнологий в настоящее время является применение регуляторов роста, способных в малых дозах влиять на процессы метаболизма в растениях, что приводит к существенным изменениям в их росте и развитии. Поскольку применение регуляторов роста позиционируется как экологически чистый и экономически выгодный способ влияния на растительные организмы, к ним предъявляется ряд требований, обеспечивающих их максимально эффективное использование. Большое внимание исследователей к синтетическим регуляторам роста объясняется рядом недостатков их природных аналогов, таких как быстрое разложение на свету, низкая водорастворимость, используемые при обработке высокие концентрации [1]. В связи с этим остается актуальной проблема поиска новых синтетических аналогов регуляторов, вектор которого направлен в первую очередь на исследование в качестве ростовых препаратов, достоверно обладающих биологической активностью веществ [2].

Ранее была показана возможность модифицирования ароматических аминов с целью увеличения их растворимости и снижения токсичности для их испытаний в качестве рострегулирующих препаратов, в частности, *m*,*p*-замещенных анилинов [3]. Компьютерное моделирование и экспериментальные данные показывают перспективность использования *m*-замещенных ариламинов в качестве биологически активных в отношении роста растений веществ. Для оптимизации ключевых свойств ариламина, в частности, повышения водорастворимости и снижения токсичности, в качестве регуляторов роста перспективны конъюгаты ароматических аминов с углеводами, содержащие *N*-гликозидные связи, лабильные в условиях испытаний [3].

Одной из основных проблем при изучении действия рострегулирующих препаратов является

исследование механизмов их влияния в различные фазы развития растений, что в значительной степени определяется химической структурой рострегуляторов и ее возможным изменением в процессе активной фазы действия [1, 2]. Вариации состава и структуры клеточных стенок растений традиционно изучаются различными физическими методами, такими как ЯМР-спектроскопия и газовая хроматография. Данные методы являются дорогостоящими, зачастую требуют значительного количества образца биоматериала и применения специфических растворителей. Методы молекулярной спектроскопии, в частности электронной и ИК-Фурье спектроскопии, более доступны и оперативны; последний является также одним из наиболее информативных в отношении исследования структурно-группового состава, установления динамики изменения содержания метаболитов в образцах исследуемого биоматериала в ходе морфологических процессов [4–8]. Конформационная чувствительность полос поглощения биополимеров позволяет исследовать их структурные особенности, а также происходящие в динамике изменения их содержания. Так, полоса колебаний $\nu_{\text{C=O}}$ амидных групп белков (Амид I) расщепляется в зависимости от величины межмолекулярных взаимодействий, что позволяет получать информацию о геометрическом расположении групп в макромолекулах.

Анализ литературных данных по обозначенной проблеме показывает наличие как исследований, направленных на изучение динамики изменения содержания биологически активных веществ в различных частях растений в ходе вегетационных экспериментов [4–6], так и работ по анализу деталей механизма действия регуляторов роста варьируемой структуры на различных стадиях развития растения [6–11]. По нашему мнению, целесообразно объединить назван-

ные направления исследований. В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение характера и механизма влияния конъюгата *L*-рамнозы с *m*-аминобензойной кислотой на динамику образования первичных метаболитов и хлорофилла при проращивании семян огурца (*Cucumis sativus* L.).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза целевого продукта смесь эквивалентных (0,002 моль) количеств *L*-рамнозы (Fluka) и *m*-аминобензойной кислоты (ч.д.а.) растворяли в 15 мл этанола (96% EtOH, Merck). Реакционную систему термостатировали в колбах с обратным холодильником в бане с водяным нагревом 70–75 °С в течение 30 мин до полного растворения реагентов. По окончании измерений к раствору добавляли равный объем диэтилового эфира и оставляли реакционную смесь при температуре 18 °С для кристаллизации, после чего промывали абсолютным эфиром, высушивали и идентифицировали методом ИК-Фурье спектроскопии и элементного анализа. Спектры регистрировали в режиме поглощения в таблетках KBr (1:200) на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек», Россия) в интервале волновых чисел 4000–500 см⁻¹ со спектральным разрешением по волновому числу 2 см⁻¹ при 40 сканах с предварительной регистрацией опорных спектров. Спектры вторых производных получены в результате численного дифференцирования с использованием сглаживания полиномом 4-го порядка в окнах до 15 точек, анализ и отнесение проводились по экстремумам ниже нулевой линии. Спектры многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) растворов снимали на приставке МНПВО-36 в интервале волновых чисел 4000–650 см⁻¹. Обработку спектров проводили в среде программы FSpec 4.2.0.9. Температуру плавления аминоконъюгата определяли в открытых капиллярах в установках Кьельдаля, элементный анализ проводили на анализаторе Vario MICRO Cube (Elemental Analyzer GmbH, Германия), поляриметрические измерения проводили на поляриметре СМ-3 (АООТ «ЗОМЗ», Россия).

Синтезированный аминоконъюгат – *N*-*m*-карбоксифенилрамнозилламин, представляет собой растворимый в воде порошок серого цвета. Выход – 85%, температура плавления – 112–113 °С. Элементный анализ: найдено, %: С – 55,25; Н – 6,25; N – 4,91; вычислено, %: С₁₃Н₁₇NO₆ С – 55,12; Н – 6,00; N – 4,91. ИК-Фурье спектр: 1700 см⁻¹ (ν_{C=O}); 1608, 1521, 746 см⁻¹ (ν_{C=C}, γ_{C-H}); 1495, 1005 см⁻¹ (N-гликозид).

Биотестирование полученных препаратов проводили с использованием в качестве тест-растений семян огурца сорта Нежинский в трех параллелях. В чашки Петри, выложенные фильтровальной бумагой, полностью смоченной рабочими растворами (0,05; 0,005 и 0,0005%) выкладывали по 10 семян и помещали в термостат.

После четырех суток инкубации при 25 °С оценивали количество нормально проросших семян и изменение длины проростков в сравнении с контрольной пробой (дистиллированная вода). Для изучения характера действия синтезированного продукта на ростовые процессы пробы (4 мг) корней и гипокотилей биотестируемых образцов высушивали, измельчали до однородной массы, таблетировали с KBr (1:300) и исследовали ИК-Фурье спектроскопически в трех параллелях. Спектры характеризовались достаточным разрешением и ровной базовой линией, что свидетельствовало о химической стабильности исследуемых образцов.

Влияние синтезированного продукта на синтез хлорофилла изучали на изолированных семядолях, для чего последние после окончания проращивания отделяли от оболочек и высушивали в течение 4 ч при 60 °С, затем пробы измельчали, таблетировали с KBr (1:200) и исследовали ИК-Фурье спектроскопически. Для количественной оценки изменения динамики содержания хлорофилла в ходе экспериментов проводили экстракцию из 10 мг образцов семядолей 5 мл 96% этанола, после чего отфильтровывали, доводили объем до 10 мл и снимали спектры экстрактов в кварцевых кюветках (1 см) в интервале длин волн 300–800 нм на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ «Спектр», Россия). Расчет содержания фотосинтетических пигментов проводили по формулам, приведенным в работе [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамика развития ростовых процессов при проращивании семян тест-растений в растворах рамнозилламина представлена в табл. 1. Анализ данных показывает ингибирование прорастания семян в растворах исследуемого препарата, снижающееся с уменьшением его концентрации.

Таблица 1. Влияние концентрации растворов синтезированного продукта на ростовые характеристики семян огурца сорта Нежинский
Table 1. Influence of synthesized product solutions concentration on germination characteristics of Nezhinsky variety cucumber seeds

Концентрация, %	Длина проростка, см	Прирост, %	Всхожесть, %
Контроль	7,7±0,2	100	96±2
0,05	2,4±0,3	31±2	54±3
0,005	4,6±0,2	60±3	86±2
0,0005	5,1±0,2	66±2	86±2

Анализ профиля ИК-Фурье спектра контрольного образца показывает наличие характерных для исследуемого биоматериала полос поглощения (рис. 1, спектр 1) [5–13].

Отмечается сравнительно интенсивная карбонильная полоса (1732 см⁻¹; ν_{C=O}), относимая к колебаниям сложноэфирных фрагментов, а так-

же интенсивная полоса при 1406 см^{-1} (δ_{OH} , ν_{COO^-} ; полисахариды, пектины). Отмеченное положение максимума $\nu_{\text{C=O}}$, смещенное от традиционно наблюдаемых для сложноэфирных групп (1740 см^{-1}) [11], связывают с образованием водородных связей карбонильной группы с гидроксогруппами липидов и полисахаридов, а также с низкой степенью этерификации пектинов [13]. Пептидная полоса Амид I ($\nu_{\text{C=O}}$, $\nu_{\text{C-N}}$, $\delta_{\text{N-H}}$) наблюдается в виде дублета 1632 (β -слои), 1657 (α -спирали) см^{-1} , полосы Амид II (1544 см^{-1} ; $\delta_{\text{N-H}}$, $\nu_{\text{C=N}}$) и Амид III + P=O, C-O (1240 см^{-1} ; $\nu_{\text{C-N}}$, $\delta_{\text{N-H}}$, ν_{PO_2} , $\nu_{\text{C-O}}$) выражены слабее. Участок в области $1310\text{--}1370\text{ см}^{-1}$ содержит полосы колебаний CH_2 -фрагментов целлюлозы, комбинация C-O-C, C-O, C-OH полос углеводных компонентов проявляется широким сигналом с пиками, характерными для различных сахаров [13].

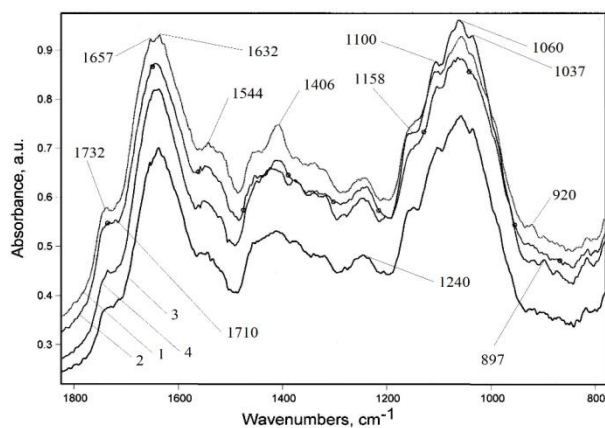


Рис. 1. ИК-Фурье спектры образцов корней тест-растений, пророщенных в растворах: 1 – контроль; 2 – 0,05%; 3 – 0,005%; 4 – 0,0005%

Fig. 1. IR-Fourier transform spectra of test-plant roots germinated in solutions: 1 – control; 2 – 0.05%; 3 – 0.005%; 4 – 0.0005%

Спектры пророщенных в среде регулятора образцов корней показывают некоторые изменения в положении и интенсивности полос поглощения. Размытость и варьируемая интенсивность $\nu_{\text{C=O}}$ -полосы связаны с наличием карбонильных групп в различном структурном окружении (эфиры фенолов, липиды, пектины) [10, 11]. Появление слабых сигналов при 1710 см^{-1} , относимых к колебаниям C=O жирных кислот и альдегидов, указывает на частичную деградацию клеточных мембран [7]. Сигнал 1406 см^{-1} также снижает интенсивность, более выражено проявляясь с уменьшением концентрации раствора аминоконъюгата. Полоса Амид I для образца, пророщенного в 0,05% растворе, сохраняет слабовыраженный максимум при 1635 см^{-1} , тогда как для двух других центрирована при 1640 см^{-1} , что указывает на конформационные изменения [12]. Полоса $1220\text{--}1240\text{ см}^{-1}$ и плечо при 1082 см^{-1} (ν_{PO_2}) практически не изменяются, при этом полосы 1060 , 1100 и 1158 см^{-1} , относимые к

$\nu_{\text{CO,CC,COC}}$ -колебаниям целлюлозных фрагментов, интенсивны для контрольного образца и образца, пророщенного в 0,0005% растворе [9, 14]. Полосы 1037 см^{-1} (ν_{COH}) и 897 , 816 см^{-1} ($\delta_{\text{HCC+HCO}}$) в спектре 4 также является характерными для фрагментов целлюлозы и некоторых других полисахаридов [11]. Подобные изменения указывают на возрастание содержания полисахаридной составляющей с уменьшением концентрации рамнозилamina, что характеризует последний как ингибитор синтеза целлюлозы [14].

Спектры образцов гипокотилей имеют практически те же полосы поглощения, при этом характеризуются более низкой интенсивностью углеводной области $1200\text{--}900\text{ см}^{-1}$, тонкая структура полос которой проявляется слабее (рис. 2).

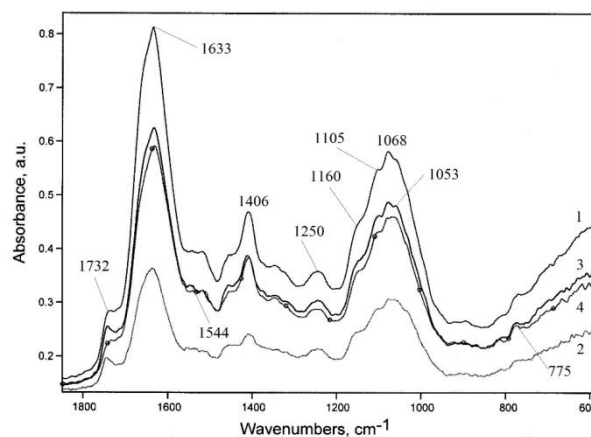


Рис. 2. ИК-Фурье спектры образцов гипокотилей тест-растений, пророщенных в растворах: 1 – контроль; 2 – 0,05%; 3 – 0,005%; 4 – 0,0005 %

Fig. 2. IR-Fourier transform spectra of test-plant hypocotyls germinated in solutions: 1 – control; 2 – 0.05%; 3 – 0.005%; 4 – 0.0005%

Полоса 1515 см^{-1} ($\nu_{\text{C=C}}$) проявляется наиболее интенсивно в спектре контрольного образца, при этом, вероятно, сливается со слабой полосой Амид II (1544 см^{-1}). Полоса Амид I показывает плечо на высокочастотном крыле, что так же, как и для спектров образцов корней, может свидетельствовать о трансформации вторичной структуры в процессе испытаний.

Затруднительность анализа составного контура амидной полосы обусловлена превышением ширины отдельных полос над их максимумами, поэтому более детальная информация может быть получена при анализе вторых производных спектральных полос в области $1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ (рис. 3) [12]. В спектре контрольного образца наиболее интенсивны полосы 1618 и 1635 см^{-1} , что подтверждает вторичную структуру в форме β -слоев, тогда как для пророщенного в 0.0005% растворе образца уже достаточно отчетливо проявляется сигнал при 1654 см^{-1} , свидетельствующий о наличии α -спиралей в структуре белка [10, 12]. Соотношение интенсивностей «дальнего» (1654 см^{-1}) и «ближнего» (1635 см^{-1}) сиг-

налов полосы Амид I характеризует степень структурирования белковой структуры водородными связями [13]: рост данного соотношения при переходе от контрольного образца к исследуемым указывает на снижение интенсивности Н-связей протеиновых структур.

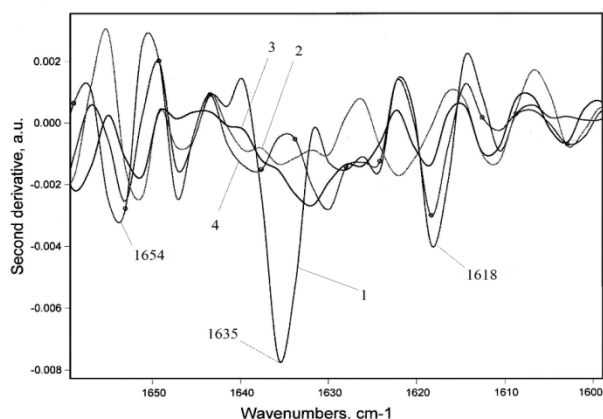


Рис. 3. Вторые производные полос ИК-Фурье спектров образцов гипокотилей тест-растений, пророщенных в растворах: 1 – контроль; 2 – 0,05%; 3 – 0,005%; 4 – 0,0005%

Fig. 3. Second derivative of IR-Fourier transform spectra of test-plant hypocotyls germinated in solutions: 1 – control; 2 – 0.05%; 3 – 0.005%; 4 – 0.0005%

Варьирование интенсивности полос 1406 и 1732 cm^{-1} для обоих типов образцов можно связать с изменением скорости накопления пектинов [11] и синтеза ростовых гормонов в присутствии рамнозиламина [8]. Следует также отметить, что как в спектрах корней, так и гипокотилей полосы в интервале 2850–2970 cm^{-1} ($\nu_{\text{C-H}}$) не изменяют своей интенсивности и положения; ширина полосы с максимумом 2925 cm^{-1} также практически не меняется, что указывает на отсутствие структурных изменений, в том числе конформационной упорядоченности мембранных липидов [15].

Колебательные спектры образцов семядолей тест-растений представлены на рис. 4. Характерные для хлорофиллов полосы поглощения наблюдаются для всех образцов с несколько изменяющейся интенсивностью.

Характеристические сигналы 1745, 1651 cm^{-1} относятся к колебаниям С=О-групп, 1543 cm^{-1} – к $\nu_{\text{C=C, C=N}}$ пиррольного цикла [16]. Полоса 1745 cm^{-1} указывает на наличие неассоциированных Н-связями сложноэфирных карбонильных групп. Наложение полос протеинов и липидов в тех же интервалах волновых чисел не позволяет оценить поглощение фотосинтетических пигментов в чистом виде [17]. Тем не менее дополнительная структурная информация может быть получена анализом тонкой структуры ряда полос. Так, для образцов растений, пророщенных в растворах рамнозиламина, ИК-полоса, центрированная в спектре

контроля при 1651 cm^{-1} , проявляется в виде дублета 1635 и 1670 cm^{-1} , что указывает на сложные межмолекулярные взаимодействия молекул хлорофилла, в том числе с протеинами растений, сопровождающиеся сопутствующими конформационными изменениями [16].

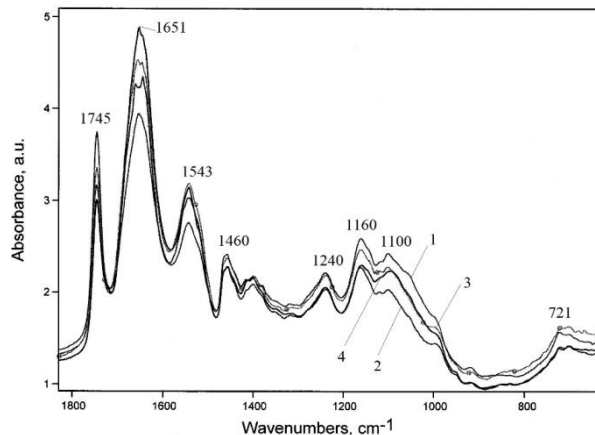


Рис. 4. ИК-Фурье спектры образцов семядолей тест-растений, пророщенных в растворах: 1 – контроль; 2 – 0,05%; 3 – 0,005%; 4 – 0,0005%

Fig. 4. IR-Fourier transform spectra of test-plant cotyledons germinated in solutions: 1 – control; 2 – 0.05%; 3 – 0.005%; 4 – 0.0005%

Полосы поглощения в электронных спектрах экстрактов отличаются для контрольных и пророщенных под влиянием аминоконъюгата растений. Данные электронной и колебательной спектроскопии указывают на различное состояние фотосинтетических пигментов в исследуемых системах, которое может контролироваться влиянием аминоконъюгата [15, 16]. Последнее обстоятельство, возможно, влияет на динамику изменения значений оптической плотности, характеризующую накопление хлорофилла (табл. 2).

Таблица 2. Максимумы поглощения электронных спектров и содержание хлорофилла (a + b) в спиртовых экстрактах семядолей тест-растений, пророщенных в растворах с различной концентрацией аминоконъюгата

Table 2. Absorption maxima UV-Vis spectra and chlorophyll (a+b) content in ethanolic cotyledons extracts of test-plants, germinated in solutions with various aminoconjugate concentration

Концентрация, %	Хлорофилл (a + b), мг/г	λ_{max} , нм
Контроль	2,47±0,03	380, 590, 670
0,05	2,55±0,08	410, 590, 667
0,005	3,67±0,10	430, 610, 660
0,0005	4,46±0,10	430, 610, 660

Механизмы действия регуляторов роста на морфологические процессы в значительной степени обусловлены их химической структурой, при этом детали влияния структурных парамет-

ров на рост (ингибирование) остаются малоизученными. Проявление рострегулирующего действия реализуется в ходе двух последовательных процессов – транспорт регулятора через биомембраны и его взаимодействие с макромолекулами. Авторами работы [18] было показано влияние структуры замещенных бензойных кислот и их солей на ростовые процессы *Cucumis sativus* L. При этом установлено, что ингибирование роста растений огурца связано с гидрофобностью молекул, обуславливающей способность к диффузии через мембраны, которая в свою очередь зависит от степени ионизации кислот. Неионизированные формы кислот более токсичны в отношении роста в сравнении с ионизированными, при этом есть указания на вклад в токсичность как первых, так и вторых форм. Известно также, что *m*-аминобензойная кислота существует в свободном состоянии в виде биплярной цвиттер-формы, тогда как рамнозиламин, по данным спектроскопии, содержит неионизированный остаток кислоты [3].

Вероятно, что на ростовые процессы оказывает влияние наличие лабильных химических связей, обуславливающих реакции гидролитического расщепления [1]: рострегулирующая активность может быть связана с гидролизом аминоконъюгата с образованием свободного углевода и *m*-аминобензойной кислоты. В пользу протекания гидролиза свидетельствует увеличение удельного вращения 1%-го раствора рамнозиламина от исходного значения $+34,7^\circ$ до значения $+42,5^\circ$ уже через 24 ч, которое далее стабилизировалось, поскольку известно, что негидролизующиеся арилгликозиламины не показывают изменения удельного вращения. Данные МНПВО-спектроскопии подтверждают протекание процессов с участием аминоконъюгата в растворе во времени. В спектре, снятом непосредственно после приготовления раствора, отмечается четкая полоса 1692 см^{-1} , относимая к колебаниям карбонила неионизированной карбоксильной группы, тогда как в спектре, зарегистрированном через сутки после приготовления раствора (пробы хранились в закрытых бюксах при 20°C), данная полоса отсутствует (рис. 5).

Таким образом, увеличение ростовой активности, образование полисахаридов, протеинов и фотосинтетических пигментов с уменьшением концентрации раствора может быть обусловлено снижением содержания оказывающей ингибирующее действие *m*-аминобензойной кислоты [19]. С другой стороны, превышение содержания хлорофилла в сравнении с контролем может быть связано с влиянием аминоконъюгата (или свободного углевода): известна положительная динамика образования пигментов под действием *L*-рамнозы и ее производных¹. Данный вопрос

требует дальнейшего изучения, в то же время можно предположить перспективность поиска и испытаний соединений, содержащих в структуре активные компоненты разного спектра действия. Лабильные гликозидные связи между компонентами, способные к разрыву в условиях проращивания, обеспечивают возможность их контролируемого образования, что может быть положено в основу разработки рострегулирующих препаратов, содержащих структурные фрагменты различной биологической активности.

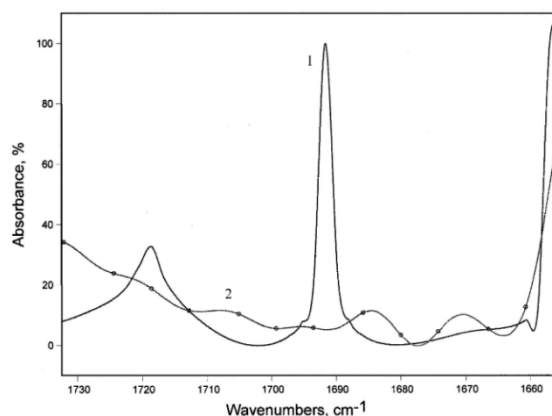


Рис. 5. ИК-Фурье МНПВО-спектры 1%-го раствора аминоконъюгата, снятые через: 1 – 0 ч; 2 – 24 ч

Fig. 5. IR-Fourier transform ATR-spectra of 1% aminoconjugate solution recorded after: 1 – 0 h; 2 – 24 h

ВЫВОДЫ

Методами электронной и ИК-Фурье спектроскопии изучено влияние конъюгата *L*-рамнозы с *m*-аминобензойной кислотой (рамнозиламина) на динамику морфологических процессов тест-растений *Cucumis sativus* L. На фоне общего ростингибирующего действия аминоконъюгата показано увеличение содержания полисахаридной и белковой структурных составляющих образцов корней и гипокотилей при снижении концентрации раствора рамнозиламина. Содержание липидных фрагментов и их структурная организация во всех системах остается приблизительно на одном уровне, тогда как анализ полос Амид I исходных спектров и их вторых производных подтверждает конформационные изменения белков в ходе ростовых процессов. Динамика изменения содержания фотосинтетических пигментов для 0,05, 0,005 и 0,0005%-х растворов аминоконъюгата коррелирует с ростовыми параметрами, при этом концентрация хлорофилла во всех случаях превышает данный показатель для контрольных образцов. Описанное действие для контрольных образцов, по нашему предположению, обусловлено его совместным с продуктами гидролиза (*m*-аминобензойной кислоты, *L*-рамнозы) влиянием.

¹Posner H. Inhibitory effect of carbohydrate on flowering in *Lemna perpusilla*. II. Reversal by glycine and L-aspartate correlation with reduced levels of β -carotene and chlorophyll // Plant Physiology. 1970. Vol. 45. Issue 6. P. 687–690. <https://doi.org/10.1104/pp.45.6.687>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинак А.И., Сулейманкадиев С.Э., Сулейманкадиева А.Э. Рострегулирующая активность 2-замещенных тиазolidинов на проростках подсолнечника // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 1. Вып. 5. С. 98–101
2. Ольшевская В.А., Черепанов И.А., Спиридонов Ю.А., Спиридонова Г.С., Макаренков А.В., Самарская А.С. [и др.]. Гербицидная активность производных карборанов, сидномина, ферроцена // Агрохимия. 2017. N 4. С. 16–21.
3. Cherepanov I.S. Spectral characteristics and biological activity of synthetic humic-like substances on the basis of carbohydrates // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. Issue 5. P. 055001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055001>
4. Butler H.J., McAinsh M.R., Adams S., Martin F.L. Application of vibrational spectroscopy techniques to non-destructively monitor plant health and development // Analytical Methods. 2015. Vol. 7. P. 4059–4070. <https://doi.org/10.1039/c5ay00377f>
5. Turker-Kaya S., Huck C.W. A review of mid-infrared and near-infrared imaging: principles, concepts and application in plant tissue analysis // Molecules. 2017. Vol. 22. Issue 1. P. 168. <https://doi.org/10.3390/molecules22010168>
6. Дмитриева Е.Д., Сюндюкова К.В., Акатова Е.В., Леонтьева М.М., Волкова Е.М., Музафаров Е.Н. Биологическая активность гуминовых веществ сапропеля реки Упы Тульской области // Химия растительного сырья. 2017. N 1. С. 137–144. <https://doi.org/10.14528/jcprm2017011418>
7. Stewart D. Fourier transform infrared microspectroscopy of plant tissues // Applied Spectroscopy. 1996. Vol. 50. Issue 3. P. 357–365. <https://doi.org/10.1366/0003702963906384>
8. Buensanteai N., Sompong M., Saengchan C., Thumanu K. The cellular components of cucumber seedlings after primed with plant growth promoting rhizobacteria, *Bacillus subtilis* Bs008 // African Journal of Microbiology Research. 2014. Vol. 8. Issue 10. P. 1006–1011. <https://doi.org/10.5897/AJMR12.1856>
9. Wu J., Guo J., Hu Y., Gong H. Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress // Frontiers in Plant Science. 2015. Vol. 6. P. 453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00453>
10. Thumanu K., Sompong M., Phansak P., Nontapot K., Buensanteai N. Use of infrared microspectroscopy to determine leaf biochemical composition of cassava in response to *Bacillus subtilis* CaSUT007 // Journal of Plant Interactions. 2015. Vol. 10. Issue 1. P. 270–279. <https://doi.org/10.1080/17429145.2015.1059957>
11. Rico C.M., Peralta-Videa J.R., Gardea-Torresday J.L. Differential effect of cerium oxide nanoparticles on rice, wheat and barley root: a Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy // Applied Spectroscopy. 2015. Vol. 69. Issue 2. P. 287–295. <https://doi.org/10.1366/14-07495>
12. Chu H.-L., Lu T.-Y., Lin S.-Y. Effect of cyanide concentration on the secondary structures of protein in the crude homogenates of the fish gill tissue // Aquatic Toxicology. 2001. Vol. 55. Issue 3-4. P. 171–176. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00177-1](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00177-1)
13. Yang J., Yen H. Early salt stress effect on the changes in chemical composition in leaves of Ice plant and Arabidopsis. A Fourier transform infrared spectroscopy study // Plant Physiology. 2002. Vol. 130. P. 1032–1042.
14. Mouille G., Robin S., Lecomte M., Pagant S., Hofte H. Classification and identification of *Arabidopsis* cell wall mutants using Fourier-transform infrared (FTIR) microspectroscopy // The Plant Journal. 2003. Vol. 35. Issue 3. P. 393–404. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113X.2003.01807.x>
15. Gorgulu S.T., Dogan M., Severcan F. The characterization and differentiation of higher plants by Fourier transformed infrared spectroscopy // Applied Spectroscopy. 2007. Vol. 61. Issue 3. P. 300–308. <https://doi.org/10.1366/000370207780220903>
16. Chapados C., Lemieux S., Carpentier R. Protein and chlorophyll in photosystem II probed by infrared spectroscopy // Biophysical Chemistry. 1991. Vol. 39. Issue 3. P. 225–239. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(91\)80001-8](https://doi.org/10.1016/0301-4622(91)80001-8)
17. Антонов В.И., Ягодин В.И. Спектральные характеристики препаратов хлорофилла из еловой древесной зелени // Химия растительного сырья. 2006. N 2. С. 47–49.
18. Crisan M., Grozav M., Kurunczi L., Iliu G., Berteau C.M. Inhibitory effect of some synthetic monoethanolamine salt of *para*-substituted benzoic acids and corresponding benzoic acids on cucumber seed germination // Journal of Plant Interactions. 2007. Vol. 2. P. 53–61. <https://doi.org/10.1080/1742-9140701422496>
19. Guikema J., Freeman L., Fleming E.Y. Effect of gabaculine on pigment biosynthesis in normal and nutrient deficient cell of *Anacystis nidulans* // Plant Physiology. 1986. Vol. 82. Issue 1. P. 280–284. <https://doi.org/10.1104/pp.82.1.280>

REFERENCES

1. Ginak AI, Suleimankadiyev SE, Suleimankadiyeva AE. Growth-regulating activity of 2-substituted thiazolidines on sunflower sprouts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Herald of Volgograd State Technical Institute University*. 2008;1:98–101. (In Russian)
2. Ol'shevskaya VA, Cherepanov IA, Spiridonov YuA, Spiridonova GS, Makarenkov AV, Samarskaya AS, et al. Herbicidal activity of carboranes, sydnone imine and ferrocene derivatives. *Agrokimiya*. 2017;4:16–21 (In Russian)
3. Cherepanov IS. Spectral characteristics and biological activity of synthetic humic-like substances on the basis of carbohydrates. *Journal of Physics:*

Conference Series. 2019;1399(5):055001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055001>

4. Butler HJ, McAinsh MR, Adams S, Martin FL. Application of vibrational spectroscopy techniques to non-destructively monitor plant health and development. *Analytical Methods*. 2015;7:4059–4070. <https://doi.org/10.1039/c5ay00377f>

5. Turker-Kaya S, Huck CW. A review of mid-infrared and near-infrared imaging: principles, concepts and application in plant tissue analysis. *Molecules*. 2017;22(1):168. <https://doi.org/10.3390/molecules22010168>

6. Dmitrieva ED, Siundiukova KV, Akatova EV, Leont'eva MM, Volkova EM, Muzafarov EN. Biological activity of humic substances sapropel Upa river Tula region. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2017;1:137–144 (In Russian) <https://doi.org/10.14528/jcpm2017011418>

7. Stewart D. Fourier transform infrared microspectroscopy of plant tissues. *Applied Spectroscopy*. 1996;50(3):357–365. <https://doi.org/10.1366/0003702963906384>

8. Buensanteai N, Sompong M, Saengchan C, Thumanu K. The cellular components of cucumber seedlings after primed with plant growth promoting rhizobacteria, *Bacillus subtilis* Bs008. *African Journal of Microbiology Research*. 2014;8(10):1006–1011. <https://doi.org/10.5897/AJMR12.1856>

9. Wu J, Guo J, Hu Y, Gong H. Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6:453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00453>

10. Thumanu K, Sompong M, Phansak P, Nontapot K, Buensanteai N. Use of infrared microspectroscopy to determine leaf biochemical composition of cassava in response to *Bacillus subtilis* CaSUT007. *Journal of Plant Interactions*. 2015;10(1):270–279. <https://doi.org/10.1080/17429145.2015.1059957>

11. Rico CM, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresday JL. Differential effect of cerium oxide nanoparticles on rice, wheat and barley root: a Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. *Applied Spectroscopy*. 2015;69(2):287–295. <https://doi.org/10.1366/14-07495>

12. Chu H-L, Lu T-Y, Lin S-Y. Effect of cyanide concentration on the secondary structures of protein in the crude homogenates of the fish gill tissue. *Aquatic Toxicology*. 2001;55(3–4):171–176. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00177-1](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00177-1)

13. Yang J, Yen H. Early salt stress effect on the changes in chemical composition in leaves of Ice plant and Arabidopsis. A Fourier transform infrared spectroscopy study. *Plant Physiology*. 2002;130:1032–1042.

14. Mouille G, Robin S, Lecomte M, Pagant S, Hofte H. Classification and identification of *Arabidopsis* cell wall mutants using Fourier-transform infrared (FTIR) microspectroscopy. *The Plant Journal*. 2003;35(3):393–404. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01807.x>

15. Gorgulu ST, Dogan M, Severcan F. The characterization and differentiation of higher plants by Fourier transformed infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*. 2007;61(3):300–308. <https://doi.org/10.1366/000370207780220903>

16. Chapados C, Lemieux S, Carpentier R. Protein and chlorophyll in photosystem II probed by infrared spectroscopy. *Biophysical Chemistry*. 1991;39(3):225–239. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(91\)80001-8](https://doi.org/10.1016/0301-4622(91)80001-8)

17. Antonov VI, Yagodin VI. Spectral characteristics of chlorophyll preparations from fit-tree wood greens. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2006; 2:47–49 (In Russian)

18. Crisan M, Grozav M, Kurunczi L, Ilia G, Bertea CM. Inhibitory effect of some synthetic monoethanolamine salt of *para*-substituted benzoic acids and corresponding benzoic acids on cucumber seed germination. *Journal of Plant Interactions*. 2007;02:53–61. <https://doi.org/10.1080/17429140701422496>

19. Guikema J, Freeman L, Fleming EY. Effect of gabaucine on pigment biosynthesis in normal and nutrient deficient cell of *Anacystis nidulans*. *Plant Physiology*. 1986;82(1):280–284. <https://doi.org/10.1104/pp.82.1.280>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Черепанов Игорь Сергеевич,

к.х.н., доцент,
Удмуртский государственный университет,
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1,
Российская Федерация,
✉ e-mail: cherchem@mail.ru

Журавлева Алина Андреевна,

студентка,
Удмуртский государственный университет,
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1,
Российская Федерация,
e-mail: cherchem@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor S. Cherepanov,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Udmurt State University,
1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034,
Russian Federation,
✉ e-mail: cherchem@mail.ru

Alina A. Zhuravleva,

Student,
Udmurt State University,
1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034,
Russian Federation,
e-mail: cherchem@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 25.12.2020.
Одобрена после рецензирования 29.01.2021.
Принята к публикации 28.02.2021.*

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

*The article was submitted 25.12.2020.
Approved after reviewing 29.01.2021.
Accepted for publication 28.02.2021.*