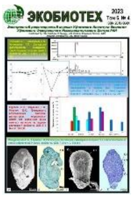
ЭКОБИОТЕХ
Ecobiotech Journal
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru



ДЕСТРУКЦИЯ ФИТОГОРМОНОВ БАКТЕРИЯМИ-СТИМУЛЯТОРАМИ РОСТА РАСТЕНИЙ

Стариков С.Н.*, Четверикова Д.В., Четвериков С.П.

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

*E-mail: senik0406@gmail.com

Фитогормоны являются регуляторами роста и развития растений, которые при различных условиях могут играть фундаментальную роль в их адаптации и выживании. Известно, что бактерии способны влиять на физиологию растений, продуцируя фитогормоны или снижая их концентрацию в растительных тканях и среде, разрушая или трансформируя. Изучение этих процессов важно для более глубокого понимания взаимодействий растений и микроорганизмов.

В данной работе описана способность бактерий, стимулирующих рост и развитие растений, разрушать фитогормоны (АБК, 6-БАП и ИУК) в культуральной среде с использованием их в качестве единственного источника углерода и энергии.

Было обнаружено, что большая часть отобранных штаммов могла расти на среде с АБК, 6-БАП и ИУК. Однако интенсивность роста на различных субстратах существенно отличалась. Так, например, штаммы *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D (2,4-D), *Pseudomonas sp.* RZ (RZ), *Pseudomonas plecoglossicida* CH5%2 (CH5%2) одинаково хорошо росли на всех субстратах, но результаты ВЭЖХ показали, что наиболее активный деструктор выбранных фитогормонов – штамм 2,4-D. Степень биодеструкции АБК, 6-БАП и ИУК этим штаммом за 10 суток культивирования составила 33%, 70% и 60%, соответственно.

Ключевые слова: фитогормоны ◆ деструкция ◆ бактерии ◆ ауксины ◆ абсцизовая кислота ◆ цитокинины

Поступила в редакцию: 17.11.2023

DESTRUCTION OF PHYTOHORMONES BY PLANT GROWTH-PROMOTING BACTERIA

Starikov S.N.*, Chetverikova D.V., Chetverikov S.P.

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

*E-mail: senik0406@gmail.com

Phytohormones serve as regulators of plant growth and development, playing a fundamental role in the adaptation and survival of plants under different conditions. It is well-known that bacteria have the ability to influence plant physiology by producing phytohormones or decreasing their concentration in plant tissues and the surrounding environment through degradation or transformation. Studying these processes is crucial for a deeper comprehension of plant-microorganism interactions.

This study presents the capability of bacteria that promote plant growth and development to degrade phytohormones (ABA, 6-BAP, and IAA) in a culture medium using them as the sole carbon and energy source.

It was discovered that a significant portion of the selected strains could thrive on a medium containing ABA, 6-BAP, and IAA. However, the growth intensity varied significantly among different substrates. For instance, strains *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D (2,4-D), *Pseudomonas sp.* RZ (RZ), and *Pseudomonas plecoglossicida* CH5%2 (CH5%2) exhibited equal growth rates on all substrates, but high-performance liquid chromatography (HPLC) results indicated that strain 2,4-D was the most efficient in the degradation of the aforementioned phytohormones. The extent of biodegradation of ABA, 6-BAP, and IAA by this strain during a 10-day cultivation period amounted to 33%, 70%, and 60%, respectively.

Keywords: phytohormones ◆ destruction ◆ bacteria ◆ auxins ◆ abscisic acid ◆ cytokinins

Принято в печать: 27.11.2023

Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-4-217-226 EDN: RRPNWT

ВВЕДЕНИЕ

Фитогормоны – это низкомолекулярные органические вещества, которые играют важную роль в регуляции роста и развития растений, контролируя все аспекты их жизнедеятельности. В настоящее время имеются данные о бактериях, обладающих способностью к биосинтезу фитогормонов и их воздействии на рост и развитие растений [Antonia et al., 1995; Glick et al., 2012; Asif et al., 2022, Orozco-Mosqueda et al., 2023]. Однако, помимо продукции фитогормонов, как полезные, так и патогенные бактерии способны к уменьшению их концентрации в растениях и среде путем деструкции или трансформации. Различные фитогормоны функционируют, активируя или деактивируя экспрессию растительных генов, которые помогают растению реагировать на ряд экологических проблем. Кроме того, растения могут использовать свойство почвенных бактерий разрушать и (или) синтезировать фитогормоны для поддержания их максимально эффективного уровня [Ma. del Carmen., 2020; Nascimento et al., 2019; Nascimento et al., 2021].

Целью настоящей работы было изучение способности ранее выделенных гербицидтолерантных и ростстимулирующих почвенных бактерий разрушать или трансформировать представителей наиболее распространенных групп фитогормонов – ауксинов, цитокининов и абсцизовой кислоты (АБК)

Индол-3-уксусная кислота (ИУК) – наиболее типичный представитель ауксинов. Этот гормон контролирует широкий спектр процессов, связанных с ростом и развитием растений, таких как деление и удлинение клеток, развитие плодов, старение, колонизацию корневых бактерий, дифференцировку сосудистых тканей, защиту от патогенов [Brown, 1994; Patten, Glick, 1996; Woodward, Bartel, 2005; Kazan et al., 2009; Grossmann, 2010; Zhao, 2010; McSteen, 2010; Duca et al., 2014; Duca et al., 2018; Du et al., 2020].

Способность бактерий разрушать ИУК является давно известным явлением. По-видимому, эта способность важна при установлении симбиотических отношений микроорганизмов с растениями и играет определенную роль в регуляции микробного сообщества [Syrova et al., 2022]. На сегодняшний день были охарактеризованы два разных набора бактериальных генов для катаболизма ИУК: кластер генов *iac*, который кодирует аэробный путь, с помощью которого ИУК превращается в катехол, и кластер генов *iaa*, который лежит в основе анаэробного превращения ИУК в 2-аминобензоил-КоА [Laird et al., 2020].

Позднее интерес исследователей сосредоточился на бактериях, способных к деструкции АБК. Абсцизовая кислота контролирует многие процессы, связанные с ростом и развитием растений, включая созревание эмбрионов, покой и прорастание семян; деление, удлинение и дифференциацию клеток; индукцию цветения; регуляцию стрессовых ответов у растений, таких как закрытие устьиц, задержка роста и замедление пожелтения листьев; также играет роль в развитии ксилемы и способствует биогенезу хлоропластов. [Dodd et al., 2003; LeNoble et al., 2004; Song et al., 2011; Yoshida et al., 2019; Brookbank et al., 2021].

Недавно штаммы *Rhodococcus sp.* P1Y и *Novosphingobium sp.* P6W были описаны как ризосферные бактерии, ассимилирующие АБК в качестве единственного источника углерода в периодической культуре и влияющие на концентрации АБК в корнях растений [Belimov et al., 2014; Yuzikhin et al., 2021; Yuzikhin et al., 2022].

Корреляции между ростом растений и концентрациями АБК в растениях позволили авторам предположить, что ризобактерии, метаболизирующие АБК, могут стимулировать рост через АБК-зависимый механизм. В работе Wang с соавторами исследовали влияние катаболизма АБК в растениях бактерией Rhodococcus qingshengii на поглощение растениями тяжелых металлов, в связи с фиторемедиацией загрязненных почв [Wang et al., 2021]. Однако все еще остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с метаболическими путями деструкции этого фитогормона и механизмами воздействия АБК-деградирующих бактерий на растения.

Цитокинины играют важную роль в клеточном делении и росте, а также в развитии листьев и бутонов. Они также могут влиять на дифференциацию и специализацию тканей, прорастание семян, верхушечное доминирование, удлинение корней, дифференцировку ксилемы и хлоропластов, старение листьев, передачу сигналов питания и взаимодействие растений с патогенами [Arkhipova et al., 2007; Großkinsky et al., 2016; Akhtar et al., 2020].

6-Бензиламинопурин (6-БАП) – является синтетическим цитокинином первого поколения, обладающим способностью стимулировать рост и развитие растений, способствуя цветению и увеличению урожайности плодов путем активации клеточного деления

Влияние микроорганизмов, способных утилизировать или трансформировать цитокинины (в том числе 6-БАП), на процессы роста и гормональный баланс растений остается неисследованным вопросом. В работе Dolgikh с соавторами *Rhizobium leguminosarum bv. viciae* CIAM1026 снижал количество iPA в корнях проростков гороха, однако способность этого штамма разрушать цитокинины не изучалась [Dolgikh et al., 2017].

Несмотря на уже полученные данные, ряд вопросов, связанных с деструкцией фитогормонов бактериями, стимулирующими рост и развитие растений, остаются недостаточно изученными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Способность к использованию фитогормонов в качестве единственного источника углерода и энергии оценивали по росту штаммов на твердой минеральной среде Раймонда [Raymond R.L., 1961] с добавлением ИУК, 6-БАП, АБК по 100 мг/л

Для исследования деструкции фитогормонов культурами бактерий их выращивали в конических колбах на термостатируемом шейкере (160 об/мин) при температуре 28 ºС в течение 4 суток в среде с добавлением фитогормонов. Использовали минеральную основу среды Раймонда [Raymond R.L., 1961], в которую после автоклавирования вносили ИУК, АБК или 6-БАП до конечной концентрации 100 мг/л. Культуральную жидкость подвергали центрифугированию при 8000 g с последующей ультрафильтрацией через кассеты с диаметром пор 1 кДа («SARTOCOON Slice Cassete», Германия).

Пробы анализировали в системе ВЭЖХ LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором SPD-M20A («Shimadzu», Япония). Для хроматографического разделения использовали колонку PerfectSil Target ODS-3 HD 5μm (150x4,6 mm) («MZ-Analysentechnik», Германия) В качестве подвижной фазы использовали 50%-ный раствор ацетонитрила в 0,1%-ной уксусной кислоте при скорости элюирования 0,4 мл/мин. Объем вводимой пробы – 5 мкл.

Анализ ВЭЖХ-МС проводили на жидкостном тандемном хромато-масс-спектрометре LCMS-IT-TOF (“Shimadzu”, Япония) с использованием ионизации электрораспылением (ESI) в режиме отрицательных ионов со следующими параметрами: высоковольтный зонд: -3,5 кВ; поток распыляющего газа: 1,5 л/мин; температура CDL: 50 °С; температура термоблока: 50 °С; давление газа-осушителя: 150 кПа; напряжение детектора TOF: 1,6 кВ. Раствор трифторуксусной кислоты использовался в качестве стандартного образца для настройки чувствительности и разрешения, а также для выполнения калибровки массового числа (ионная ловушка и времяпролетный анализатор).

Концентрацию ИУК, АБК и 6-БАП определяли по калибровочной кривой, построенной с использованием стандартов (Sigma-Aldrich, США), в интервале концентраций 50–100000 нг/мл.

Данные были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica (Statsoft) (версия 10) и MS Excel. На рисунках и таблицах данные представлены в виде среднего значения ± стандартной ошибки. Значимость различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента (MS Excel, $p \leq 0{,}05$) или ANOVA с тестом Дункана ($p \leq 0{,}05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве первого этапа отбора микроорганизмов-деструкторов фитогормонов все собранные сотрудниками лаборатории гербицидтолерантные и ростстимулирующие штаммы микроорганизмов были протестированы на способность расти на питательной среде с АБК, 6-БАП и ИУК в качестве единственного источника углерода. Штаммы микроорганизмов, у которых была выявлена эта способность, представлены в таблице 1. Большая часть отобранных на первом этапе штаммов микроорганизмов была способна одновременно расти на средах со всеми тремя перечисленными выше гормонами. Однако, интенсивность их роста на разных субстратах могла существенно отличаться. В целом, на питательной среде с ИУК наблюдался более активный рост микроорганизмов, чем на среде с 6-БАП. Некоторые культуры микроорганизмов, такие как 2,4-Д, RZ, CH5%2, одинаково хорошо росли на всех использованных нами питательных субстратах.

Таблица 1. Способность штаммов микроорганизмов к росту в минеральной среде Раймонда с фитогормонами в качестве источника углерода

Штамм микроорганизмов	Источник углерода			Происхождение штамма
	ИУК	АБК	6-БАП	
Pseudomonas plecoglossicida 2,4-D	+	+	+	почва «Химпром», Уфа
Pseudomonas sp. 5GCH	+	-	+	чернозем, Республика Башкортостан (РБ)
Pseudomonas protegens DA1.2	+	+	+	антропогенно-нарушенные почвы около нефтяной скважины, РБ
Enterobacter ludwigii BLK	+	-	+	чернозем, Балаково
Pseudomonas chlororaphis 4CH	-	-	+	чернозем, РБ
Bacillus siamensis MX3	+	+	+	почва с полигона испытания средств пожаротушения, РБ
Bacillus sp. 27X2	+	-	-	пашня, РБ
Pseudomonas sp. RZ	+	+	+	почва химзавода, РБ
Achromobacter piechaudii NG	+	-	-	почва химзавода, РБ
Pseudomonas plecoglossicida CH5%2	+	-	+	пашня, РБ
Pseudomonas avellanae 6CH2	-	-	-	почва химпредприятия, РБ
Pseudomonas plecoglossicida 6CH1	-	-	+	почва химпредприятия, РБ
Dietzia sp. MX5	+	+	+	отходы металлургии, загрязненные нефтепродуктами, РБ
Bacillus sp. GD	+	+	+	почва с полигона испытаний средств пожаротушения, РБ
Pseudomonas plecoglossicida DD4	+	+	+	почва с территории промышленного предприятия, РБ

Штамм микроорганизмов	Источник углерода			Происхождение штамма
	ИУК	АБК	6-БАП	
Pseudomonas mosselii 5(3)	+	-	+	почва, загрязненная пестицидами, РБ
Burkholderia vietnamensis 8CH	-	-	+	почва, Респ. Коми
Ensifer adhaerens M1	-	-	+	почва с территории хранения и испытания средств пожаротушения Мальдивская Республика
Pseudomonas sp. 9Glif	+	-	+	нефтезагрязненная почва, Респ.Коми
Enterobacter sp. UOM3	+	-	-	образец урбанозема, о. Джерба, Тунисская Республика

Примечание: + активный рост, - отсутствие роста.

Деструкцию фитогормонов исследовали, внося их как единственный источник углерода в минеральную среду для культивирования бактерий. В качестве контроля использовали аналогичную стерильную питательную среду без добавления бактериального инокулята. Концентрацию фитогормонов в питательной среде рассчитывали, интерпретируя результаты ВЭЖХ. На рис. 1-3 представлены типичные хроматограммы, которые были получены в процессе анализа культуральной среды, не инокулированной бактериями (а), инокулированной штаммом *P. plecoglossicida* 2,4-D (б). Основной пик на хроматограммах соответствует времени выхода изучаемых фитогормонов. Изменение хроматографического профиля и уменьшение высоты пика соответствует биологической деструкции фитогормонов изучаемыми бактериями.

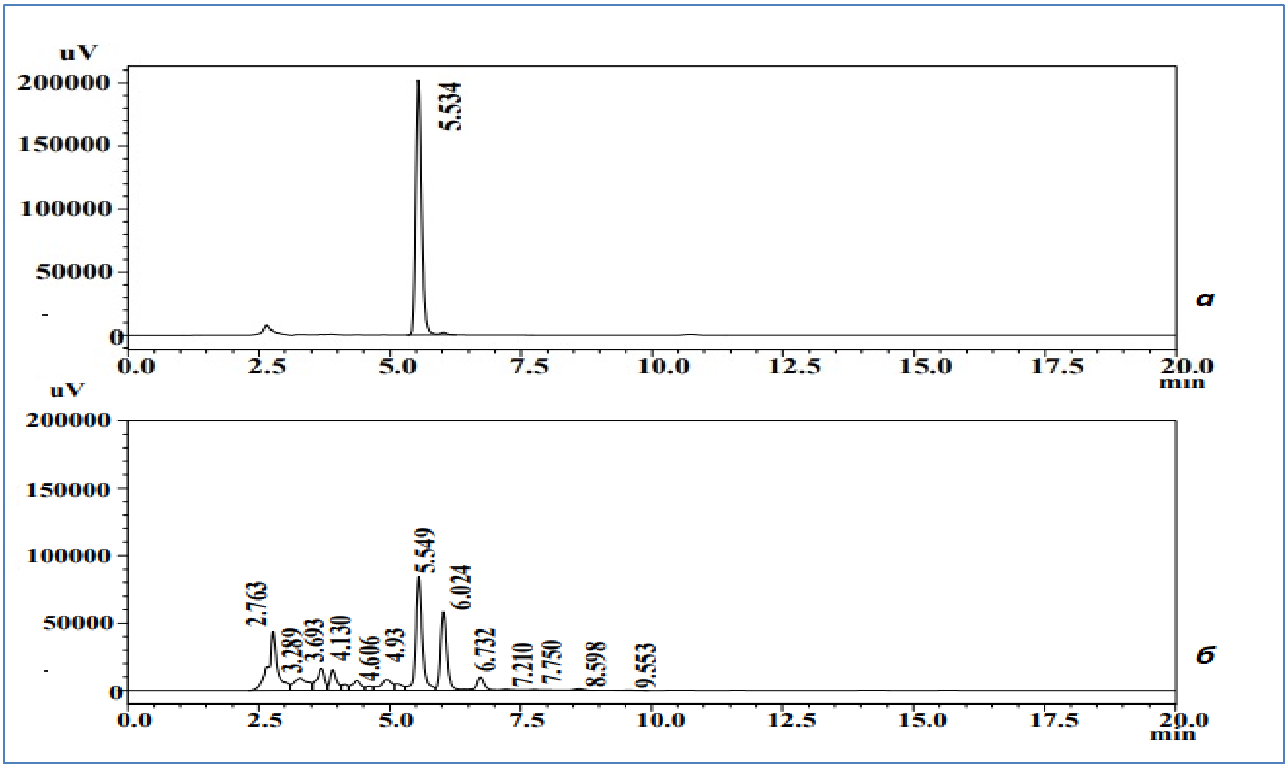


Рис. 1. Хроматографические профили деструкции ИУК (время выхода 5.52±0.03) в контроле без бактерий (а), с бактериями *P. plecoglossicida* 2,4-D (б).

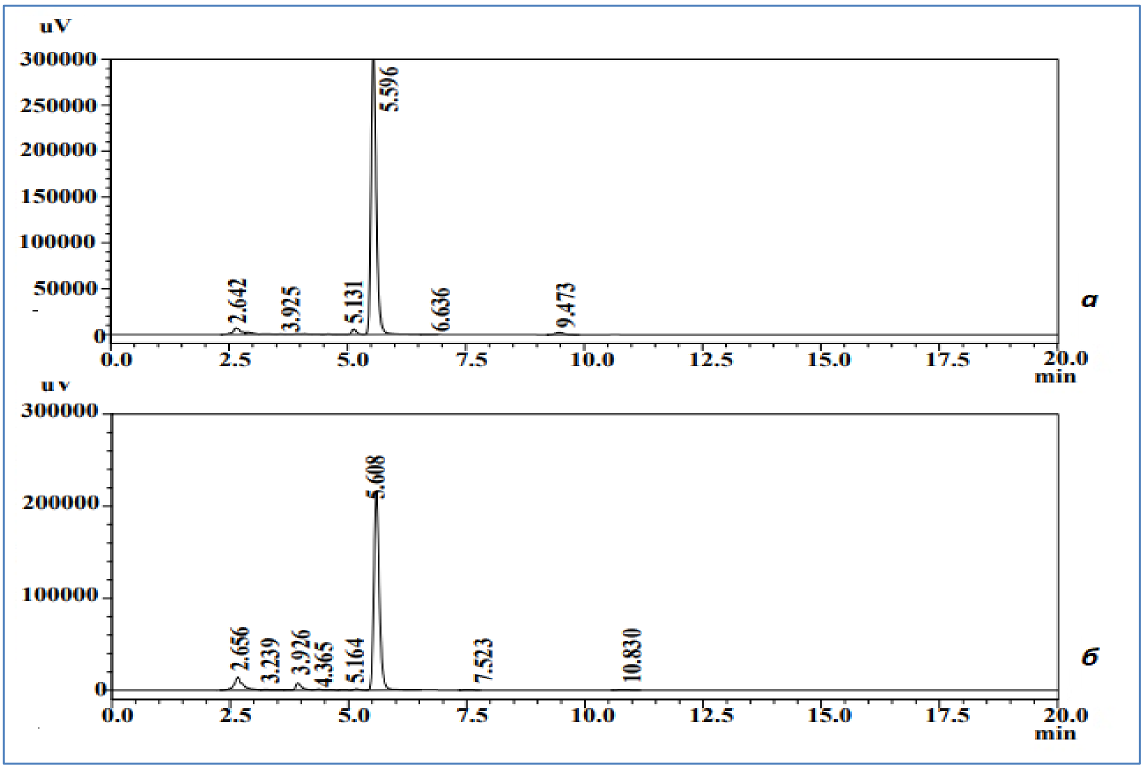


Рис. 2. Хроматографические профили деструкции АБК (время выхода 5.59±0.03) в контроле без бактерий (а) и бактериями *P. plecoglossicida* 2,4-D (б).

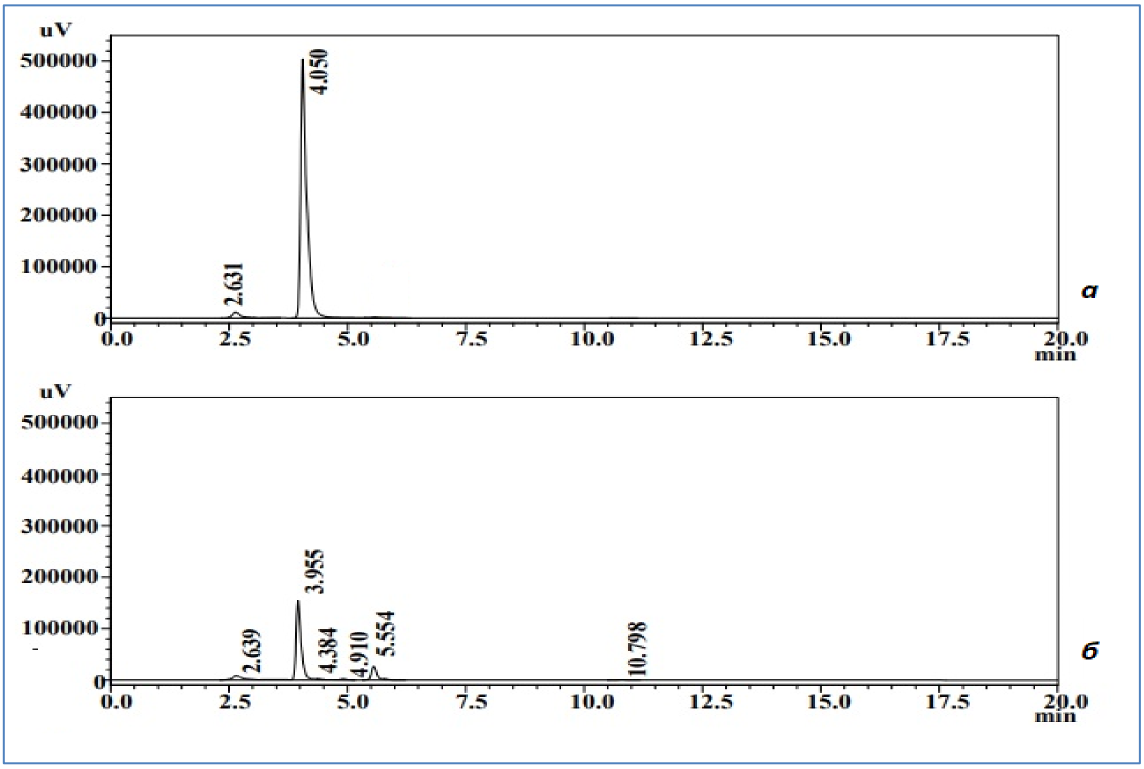


Рис. 3. Хроматографические профили деструкции 6-БАП (время выхода 3.95±0.05) в контроле без бактерий (а) и бактериями *P. plecoglossicida* 2,4-D (б).

Остаточное содержание ИУК в культуральной жидкости последовательно уменьшалось в процессе культивирования бактерий *P. plecoglossicida* 2,4-D, тогда как в контроле оно оставалось практически неизменным (рис. 4а). Наиболее активная деструкция ИУК бактериями наблюдалось в первые двое суток инкубации, степень биодеструкции к 10 суткам достигала 60%. Схожую ситуацию мы наблюдали и при деструкции (до 70%

за 10 суток) синтетического цитокинина (рис. 4б). Численность бактерий в среде при этом увеличивалась на два порядка. Степень биодеструкции другими штаммами этих фитогормонов была ниже 50% в равнозначных условиях.

Штамм 2,4-D также показал себя как активный деструктор АБК (рис. 4в). Но этот гормон при концентрации 100 мг/л разрушался микроорганизмами наименее полно (на 33%) относительно фитогормонов других типов. У других штаммов такой способности к разрушению АБК обнаружено не было, их рост на минимальной среде с АБК можно объяснить наличием примесей в использованных для приготовления среды реактивах, которые, возможно, послужили источником питания для них.

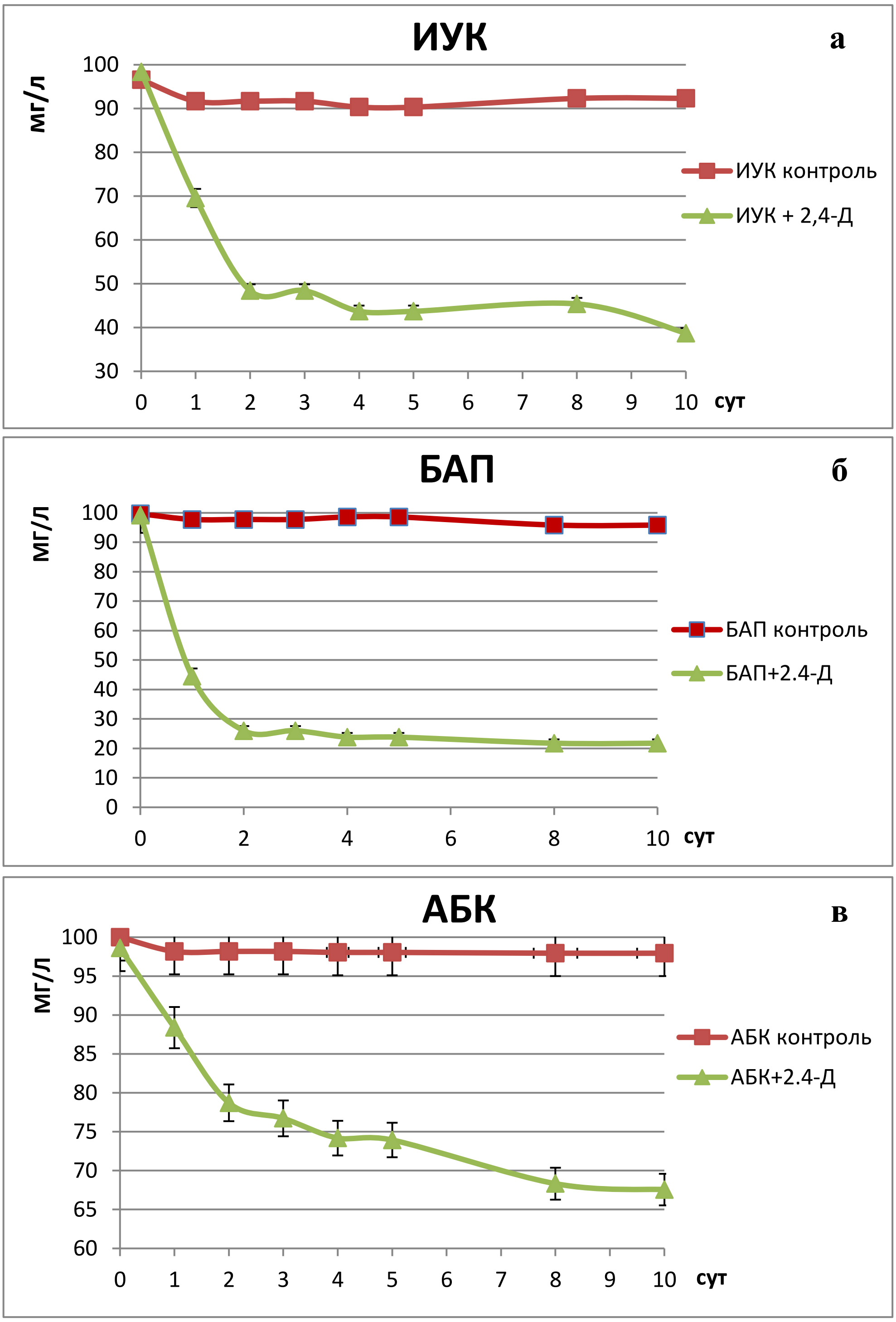


Рис. 4. Динамика снижения концентрации ИУК (а), 6- БАП (б) и АБК (в) в культуральной жидкости в процессе культивирования штамма бактерий *P. plecoglossicida* 2,4-D.

Таким образом, в результате исследования было показано, что, как правило, микроорганизмы-стимуляторы роста растений способны к росту в средах с АБК, 6-БАП и ИУК с различной степенью интенсивности. Но результатами ВЭЖХ нашло подтверждение хорошего роста на всех исследуемых фитогормонах только для штамма *P. plecoglossicida* 2,4-D. Этот активный микроорганизм был способен к их утилизации со степенью биодеструкции для АБК, 6-БАП и ИУК соответственно 33%, 70% и 60% за 10 суток культивирования.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Агидель» УФИЦ РАН в рамках ГЗ Минобрнауки России № 075-03-2021-607 от 29.12.2020 по теме №122031000309-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akhtar S.S., Mekureyaw M.F., Pandey C.; Roitsch T. Role of cytokinins for interactions of plants with microbial pathogens and pest insects // Frontiers in Plant Science. 2020. V. 10. 1777. DOI: 10.3389/fpls.2019.01777
2. Arkhipova T.N., Prinsen E., Veselov S.U. et al. Cytokinin producing bacteria enhance plant growth in drying soil // Plant and Soil. 2007. V. 292. P. 305-315. DOI: 10.1007/s11104-007-9233-5
3. Asif R., Yasmin R., Mustafa M. et al. Phytohormones as plant growth regulators and safe protectors against biotic and abiotic stress // Plant Horm. Recent Adv. New Perspect. Appl. 2022. P. 115-130. DOI: 10.5772/intechopen.102832
4. Belimov A. A., Dodd I. C., Safronova V. I. et al. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // Plant Physiology and Biochemistry. 2014. V. 74. P. 84-91. DOI: 10.1016/j.plaphy.2013.10.032
5. Brookbank B.P. Patel J. Gazzarrini S. Role of basal ABA in plant growth and development // Genes. 2021. V. 12 (12). 1936. DOI: 10.3390/genes12121936
6. Brown M. E. Seed and root bacterization // Annual review of phytopathology. 1974. V. 12 (1). P. 181-197.
7. Costacurta A., Vanderleyden J. Synthesis of phytohormones by plant-associated bacteria // Critical reviews in microbiology. 1995. V. 21 (1). P. 1-18. DOI: 10.3109/10408419509113531
8. Dodd I. C., Tan L. P., He J. Do increases in xylem sap pH and/or ABA concentration mediate stomatal closure following nitrate deprivation? // Journal of Experimental Botany. – 2003. V. 54 (385). P. 1281-1288. DOI: 10.1093/jxb/erg122
9. Dolgikh E. A., Shaposhnikov A. I., Dolgikh A. V.,A. et al. Identification of Pisum sativum L. cytokinin and auxin metabolic and signaling genes, and an analysis of their role in symbiotic nodule development // International Journal of Plant Physiology and Biochemistry. 2017. V. 9 (3). P. 22-35. DOI: 10.5897/IJPPB2017.0266
10. Du M., Spalding E. P., Gray W. M. Rapid auxin-mediated cell expansion // Annual review of plant biology. 2020. V. 71. P. 379-402. DOI: 10.1146/annurev-arplant-073019-025907
11. Duca D. R., Rose D. R., Glick B. R. Indole acetic acid overproduction transformants of the rhizobacterium Pseudomonas sp. UW4 // Antonie Van Leeuwenhoek. 2018. V. 111. P. 1645-1660. DOI: 10.1007/s10482-018-1051-7

12. Duca D., Lorv J., Patten C.L., Rose D. Indole-3-acetic acid in plant–microbe interactions // Antonie Van Leeuwenhoek. 2014. V. 106. P. 85-125. DOI: 10.1007/s10482-013-0095-y
13. Glick B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications // Scientifica. 2012. V. 2012. DOI: https://doi.org/10.6064/2012/963401
14. Glick, B.R. Beneficial Plant-Bacterial Interactions; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; ISBN 9783030443689.
15. Großkinsky D.K., Tafner R., Moreno M.V. et al. Cytokinin production by Pseudomonas fluorescens G20-18 determines biocontrol activity against Pseudomonas syringae in Arabidopsis. Sci Rep 6: 23310. 2016. DOI: 10.1038/srep23310
16. Grossmann K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action // Pest Management Science: formerly Pesticide Science. 2010. V. 66 (2). P. 113-120. DOI: 10.1002/ps.1860
17. Kazan K., Manners J. M. Linking development to defense: auxin in plant–pathogen interactions // Trends in plant science. 2009. V. 14 (7). P. 373-382. DOI: 10.1016/j.tplants.2009.04.005
18. LeNoble M. E., Spollen W. G., Sharp R. E. Maintenance of shoot growth by endogenous ABA: genetic assessment of the involvement of ethylene suppression // Journal of Experimental Botany. 2004. V. 55 (395). P. 237-245. DOI: 10.1093/jxb/erh031
19. McSteen P. Auxin and monocot development // Cold Spring Harbor perspectives in biology. 2010. V. 2(3). a001479. DOI: 10.1101/cshperspect.a001479
20. Nascimento F. X., Glick B. R., Rossi M. J. Isolation and characterization of novel soil-and plant-associated bacteria with multiple phytohormone-degrading activities using a targeted methodology // Access Microbiology. 2019. V. 1 (7). e000053. DOI: 10.1099%2Facmi.0.000053
21. Nascimento F. X., Glick B. R., Rossi M. J. Multiple plant hormone catabolism activities: an adaptation to a plant-associated lifestyle by Achromobacter spp // Environmental Microbiology Reports. 2021. V. 13 (4). P. 533-539. DOI: 10.1111/1758-2229.12987
22. Orozco-Mosqueda M. C., Santoyo G., Glick B. R. Recent advances in the bacterial phytohormone modulation of plant growth // Plants. 2023. V. 12. (3). 606. DOI: 10.3390/plants12030606
23. Patten C. L., Glick B. R. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid // Canadian journal of microbiology. 1996. V. 42 (3). P. 207-220. DOI: 10.1139/m96-032
24. Raymond, R. L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Development Industrial Microbiology. 1961. V. 2 (1) P. 23–32.
25. Santoro M.V., Zygadlo J., Giordano W., Banchio E. Volatile organic compounds from rhizobacteria increase biosynthesis of essential oils and growth parameters in peppermint (Mentha piperita) // Plant Physiology and Biochemistry. 2011. V. 49 (10). P. 1177-1182. DOI: 10.1016/j.plaphy.2011.07.016
26. Song W., Ma X., Tan H., Zhou J. Abscisic acid enhances resistance to Alternaria solani in tomato seedlings // Plant Physiology and Biochemistry. 2011. V 49 (7). P. 693-700. DOI: 10.1016/j.plaphy.2011.03.018
27. Syrova D. S., Shaposhnikov A. I., Yuzikhin O. S., Belimov A. A. Destruction and transformation of phytohormones by microorganisms // Applied Biochemistry and Microbiology. 2022. V. 58 (1). P. 1-18. DOI: 10.1134/S0003683822010094

28. Wang Y., Li Z., Wu J. et al. Abscisic acid-catabolizing bacteria: A useful tool for enhancing phytoremediation // Science of The Total Environment. 2022. V. 812. Article 151474. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151474
29. Woodward A. W., Bartel B. Auxin: regulation, action, and interaction // Annals of botany. 2005. V. 95 (5). P. 707-735. DOI: 10.1093/aob/mci083
30. Yuzikhin O. S., Gogoleva N. E., Shaposhnikov A. I. et al. Rhizosphere bacterium Rhodococcus sp. P1Y metabolizes abscisic acid to form dehydrovomifoliol // Biomolecules. 2021. V. 11(3). 345. DOI: 10.3390/biom11030345
31. Yuzikhin O. S., Shaposhnikov A. I., Konnova T. A. et al. Isolation and characterization of 1-hydroxy-2, 6, 6-trimethyl-4-oxo-2-cyclohexene-1-acetic acid, a metabolite in bacterial transformation of abscisic acid // Biomolecules. 2022. V. 12 (10). 1508. DOI: 10.3390/biom12101508
32. Zhao Y. Auxin biosynthesis and its role in plant development // Annual review of plant biology. 2010. V. 61. P. 49-64. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112308
33. Yoshida T., Christmann A., Yamaguchi-Shinozaki K. et al. Revisiting the basal role of ABA–roles outside of stress // Trends in Plant Science. 2019. V. 24. (7). P. 625-635. DOI: 10.1016/j.tplants.2019.04.008

Цитировать как
Стариков С.Н., Четверикова Д.В., Четвериков С.П. Деструкция фитогормонов бактериями-стимуляторами роста растений // Экобиотех, 2023, Т. 6 № 4. С. 217-226. DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-4-217-226 EDN: RRPNWT

Cited as
Starikov S.N., Chetverikova D.V., Chetverikov S.P. Destruction of phytohormones by plant growth-promoting bacteria. *Èkobioteh*. 2023, V. 6 (4). P. 217-226. DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-4-217-226 EDN: RRPNWT (In Rus.)