

УДК 581.1

СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И СОСТАВА ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ У *SYNECHOCYSTIS* SP. SAUVAGEAU И *DESERTIFILUM THARENSE* DADHEECH ET KRIENITZ

© Н.В. Загоскина*, М.А. Синетова, П.В. Лапшин, Д.А. Лось

Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН,
ул. Ботаническая, 35, Москва, 127276, Россия, nzagoskina@mail.ru

Фенольные соединения относятся к веществам вторичного (специализированного) метаболизма, состав и содержание которых наиболее изучены в высших растениях, в отличие от прокариот. В настоящей работе представлены данные по изучению накопления этих метаболитов в процессе роста цианобактерий *Synechocystis* sp. (*Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L, штамм IPPAS B-1400) и *Desertifilum tharense* (штамм IPPAS B-1220) из коллекции микроводорослей и цианобактерий IPPAS ИФР РАН, а также исследованию их состава. Для этого были использованы методы спектрофотометрического анализа, тонкослойной хроматографии, УФ-спектрометрии. Установлено более высокое накопление фенольных соединений у *Synechocystis* sp., которое почти вдвое превышало таковое у *D. tharense*. В период линейной фазы роста (3 сутки) оно было выше такового в стационарную фазу роста (10 сутки) у обеих культур. Выявлены отличия в составе фенольных соединений, присутствующих в этанольных экстрактах *Synechocystis* sp. и *D. tharense* (4 и 7 веществ соответственно). Установлено наличие в них конъюгатов *n*-оксибензойной и *n*-кумаровой кислот – метаболитов начальных этапов биогенеза фенольных соединений.

Ключевые слова: *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L, *Desertifilum tharense*, фенольные соединения, содержание, состав.

Для цитирования: Загоскина Н.В., Синетова М.А., Лапшин П.В., Лось Д.А. Сравнение содержания и состава фенольных соединений у *Synechocystis* sp. Sauvageau и *Desertifilum tharense* Dadheech et Krienitz // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 177–185. DOI: 10.14258/jcprm.20240112643.

Введение

Фенольные соединения, или полифенолы, являются одними из наиболее распространенных веществ вторичного (специализированного) метаболизма, биосинтез которых характерен для различных организмов – от прокариот до эукариот [1]. При этом содержание и состав этих веществ более разнообразен у высших растений, что является следствием их эволюционного развития, а также «расширения» функциональной роли полифенолов [2, 3].

Фенольные соединения чрезвычайно разнообразны по своей структуре и представлены оксибензойными кислотами, фенилпропаноидами, флавоноидами, изофлавоноидами, стильбенами, бензохинонами, нафтохинонами и антрахинонами, а также олиго- и полимерными формами – проантоцианидинами, лигнинами, меланинами и другими соединениями [4]. Функциональная роль этих вторичных метаболитов разнообразна и связана с регуляцией таких физиологических процессов в растениях, как фотосинтез, дыхание, гормональный баланс, окислительно-восстановительные процессы [2, 4, 5]. Известна и их важная роль при взаимодействии со средой обитания: привлечение насекомых-опылителей, аллелопатия, защита против растительноядных потребителей и других стрессовых воздействий [4–6].

Отличительной чертой многих фенольных метаболитов является высокая антиоксидантная активность, превышающая таковую «типичных» антиоксидантов, в том числе аскорбиновой кислоты и токоферола [7]. Для них характерны также противоопухолевые, противовоспалительные, кардиозащитные, капилляроукрепляющие, антимикробные и другие свойства [8].

* Автор, с которым следует вести переписку.

В последние годы отмечается значительный интерес к изучению образования фенольных соединений у различных представителей прокариот, в том числе сине-зеленых водорослей или цианобактерий [9–11]. Эти древнейшие обитатели нашей планеты представляют собой единственную среди прокариот группу оксигенных фототрофных организмов – «предков» пластид растений, а также «поставщиков» кислорода в биосферу [12]. Для цианобактерий характерен быстрый рост, высокая продуктивность биомассы, сохранение жизнеспособности практически в любой среде обитания и при различных экологических условиях, а также способность к образованию различных метаболитов, успешно используемых во многих сферах деятельности человека [13–15].

К числу наиболее изученных одноклеточных цианобактерий относится *Synechocystis* sp. PCC 6803, которую можно рассматривать как модельный объект для изучения различных метаболических процессов у фотосинтезирующих организмов [16]. Это обусловлено простотой ее культивирования в лабораторных условиях, сходным с растениями фотосинтетическим аппаратом и строением мембран [13, 17]. Имеются сведения о липидном обмене *Synechocystis* sp. PCC 6803, взаимодействии с тяжелыми металлами, устойчивости к стрессовым воздействиям [17–19]. Что касается фенольных соединений, то сообщалось о наличии в ней одного из представителей фенилпропаноидов – *n*-кумаровой кислоты [10, 20].

О нитчатой (многоклеточной) цианобактерии *Desertifilum tharense*, широко распространенной в теплых пресных водоемах или в почвах пустынь на юге Европы и Азии, а также в Африке, данные немногочисленны. Имеются сведения о ее морфологических характеристиках, росте и онтогенезе, составе липидов и образовании веществ-токсикантов [21, 22]. Данные о фенольных соединениях отсутствуют.

В связи со всем вышеизложенным цель работы – изучение содержания фенольных соединений на различных этапах роста *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L и *Desertifilum tharense*, а также их состава.

Экспериментальная часть

Штаммы цианобактерий *Synechocystis* sp. Sauvageau (*Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L – штамм IPPAS B-1400, далее именуемая как *Synechocystis* sp.) и *Desertifilum tharense* Dadheech et Krienitz (штамм IPPAS B-1220, далее именуемая как *D. tharense*) получены из коллекции микроводорослей и цианобактерий IPPAS ИФР РАН. Их выращивали в условиях интенсивного культивирования в специальной установке, разработанной в лаборатории [23]. Культивирование каждого штамма производили в четырех сосудах с 250 мл среды BG-11 [24] с добавлением 20 мМ буфера HEPES-NaOH (pH 7.5) при температуре 32 °С, постоянном освещении (110 мкмоль квантов света м⁻² с⁻¹) и с аэрацией стерильной газовоздушной смесью, обогащенной CO₂ до концентрации 1.5–2%. Для исследования отбирали из каждого сосуда по 125 мл культуры (суммарный объем пробы 500 мл) в период линейной и стационарной фаз роста (3 и 10 сутки, соответственно). Пробы центрифугировали 10 мин (6000 g, 22 °С), осадок ресуспендировали в дистиллированной воде и переносили в пластиковые пробирки объемом 50 мл.

Для определения сухой массы цианобактерий отбирали по три аликвоты суспензии каждой культуры, количественно переносили в предварительно просушенные и взвешенные стеклянные стаканчики. Материал высушивали до постоянного веса 24 ч при 80 °С и взвешивали на аналитических весах. Сухую массу пробы рассчитывали, вычитая массу тары из массы тары с пробой.

Для извлечения фенольных соединений, клетки культуры цианобактерий осаждали центрифугированием (6000 g, 20 мин) и полученный осадок подвергали трехкратной экстракции 96% этанолом при 45 °С [25]. Экстракты объединяли и использовали для спектрофотометрического определения суммарного содержания фенольных соединений с реактивом Фолина-Чокольтеу [26]. Калибровочную кривую строили по галловой кислоте. Содержание суммы фенольных соединений выражали в мг-экв. галловой кислоты/г сухой массы.

Для изучения состава фенольных соединений, извлекаемых этанолом из биомассы цианобактерий, применяли метод тонкослойной хроматографии на целлюлозе (пластинки «Merck», Германия). Растворитель: *n*-бутанол-уксусная кислота-вода (4 : 1 : 5, верхняя фаза). Предварительную идентификацию веществ проводили на ультрамикроскопе («DESAGA UVIS», Голландия) по специфической ярко-голубой или синей флуоресценции в УФ-свете (длина волны 254 или 366 нм). Использовали также качественные реакции на фенольные соединения со смесью 1%-ных водных растворов FeCl₃ и K₃[Fe(CN)₆], а также с диазотированным *para*-нитроанилином и 20% раствором Na₂CO₃ [27, 28]. В качестве стандартов-метчиков применяли *n*-оксисбензойную, *n*-кумаровую, кофейную, ванилиновую, протокатеховую, галловую и сиреневую кислоты («Sigma», USA).

Спектры поглощения этанольных экстрактов цианобактерий измеряли на спектрофотометре «Spectord 40» (Германия) в пределах длин волн 200–450 нм [27].

Все определения проводили в двух биологических и трех аналитических повторностях. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью программ Microsoft Excel 2010 и SigmaPlot 12.2. На графике представлены средние арифметические значения определений и их стандартные ошибки (\pm SEM). Различия считались достоверными при $P < 0.05$ (тест Тьюки) и обозначены различными латинскими буквами.

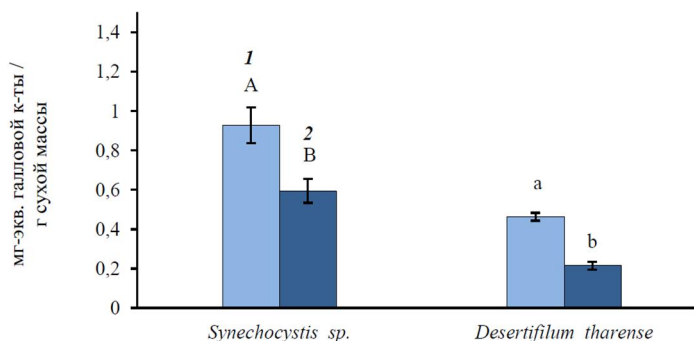
Результаты и обсуждение

Определение суммарного содержания фенольных соединений в экстрактах, полученных из исследуемого организма, считается критерием их способности к биосинтезу этих представителей вторичного метаболизма [25, 27]. Как следует из представленных на рисунке 1 данных, их накопление у *Synechocystis* sp. на всех этапах роста было почти вдвое выше, чем у *D. tharense*. Это свидетельствует о более высокой продуктивности одноклеточной цианобактерии в отношении образования фенольных соединений относительно многоклеточной (нитчатой) формы. При этом в линейную фазу роста (3 суток) их накопление в цианобактериях статистически достоверно превышало таковое в стационарную фазу роста (10 суток): у *Synechocystis* sp. и *D. tharense* на 40% и почти 50% соответственно. Это согласуется с известным для растений фактом о более высокой способности молодых активно растущих тканей к образованию этих соединений вторичного метаболизма [4, 5]. Нельзя исключать и возможность деградации и выделения фенольных соединений из клеток цианобактерий в среду культивирования, что отмечалось у двух линий *Synechocystis* sp. PCC 6803 – syn407 и syn001 [20]. Эти процессы могут усиливаться на более поздних стадиях их онтогенеза, когда число клеток в сосудах повышается и эффективность их метаболических процессов снижается [15].

Следующей нашей задачей был анализ спектров поглощения этанольных экстрактов, полученных из клеток цианобактерий, что позволяет провести первичную оценку наличия в них фенольных соединений, а также выяснить сходство/отличия их состава [27]. Для этого был использован интервал длин волн от 210 нм до 450 нм, где регистрируются основные и дополнительные максимумы поглощения большинства полифенолов. Согласно полученным данным, в этанольных экстрактах двух видов цианобактерий доминирующим был максимум поглощения при 260 нм (рис. 2). Это соответствует основному максимуму поглощения (235–270 нм) оксибензойных кислот [27, 29]. Кроме того, в экстрактах, полученных из *Synechocystis* sp. различного возраста, отмечался хорошо выраженный максимум при 332 нм и незначительный – при 376 нм, а у культуры более позднего срока выращивания (10 суток) еще один – при 295 нм (рис. 2А). В спектре поглощения этанольных экстрактов *D. tharense* также имелся хорошо выраженный основной максимум при 260 нм и еще один – при 320 нм (рис. 2Б). Все это свидетельствует о некоторых отличиях в спектрах поглощения этанольных экстрактов, полученных из двух штаммов цианобактерий, что, возможно обусловлено различиями состава, присутствующих в них метаболитов фенольной природы, как это характерно для многих растительных объектов [4, 5, 7]. Аналогичная тенденция, судя по немногочисленным данным, характерна и для цианобактерий [10].

Изучение состава фенольных соединений этанольных экстрактов цианобактерий, проводили на основании данных тонкослойной хроматографии на целлюлозе (рис. 3А). Это позволило установить наличие веществ, флуоресцирующие голубым и ярко-голубым цветом при 254 нм и 366 нм, что свидетельствует об их принадлежности к фенольным соединениям [27, 29].

Рис. 1. Суммарное содержание фенольных соединений в этанольных экстрактах цианобактерий *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L и *Desertifilum tharense* различного возраста (1 и 2 – 3 и 10 суток, соответственно). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия на уровне $P < 0.05$



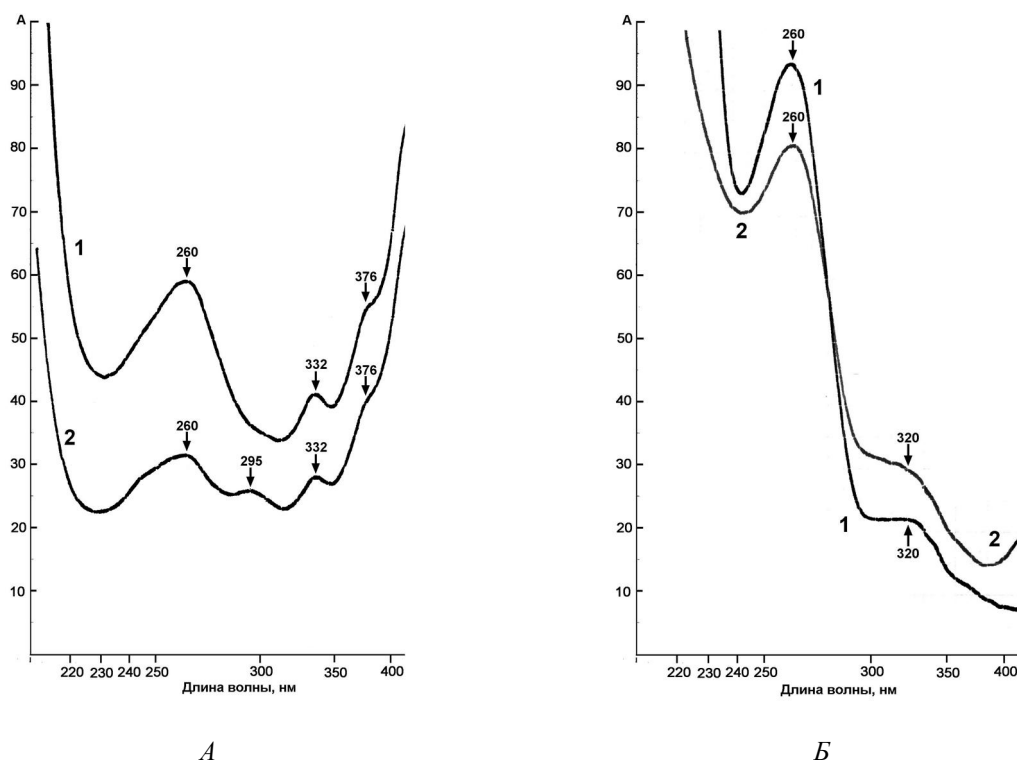


Рис. 2. Спектры поглощения этанольных экстрактов, полученных из цианобактерий *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L (А) и *Desertifilum tharense* (Б) различного возраста (3 и 10 суток – линии 1 и 2, соответственно). Стрелками указаны длины волн, соответствующие максимумам

Обработка хроматограмм классическим реагентом на все классы фенольных соединений, а именно смесью хлорного железа и красной кровяной соли, показало их наличие в этанольных экстрактах (синее окрашивание) (рис. 3 Б). При этом значения Rf этих соединений у *D. tharense* в большинстве случаев были выше, а спектр разнообразнее по сравнению с таковым у *Synechocystis* sp. (табл.). Следует также отметить, что в фенольном комплексе *D. tharense* доминировали два соединения (Rf = 0.37 и 0.47), тогда как у *Synechocystis* sp. – одно (Rf = 0.25). Состав этих метаболитов у *D. tharense* не изменялся по мере роста культур, тогда как у *Synechocystis* sp. более позднего срока выращивания (10 суток) отмечено наличие еще одного вещества фенольной природы с Rf = 0.36 (рис. 3Б).

Согласно данным по флуоресценции, взаимодействию с классическим реагентом на фенольные соединения и спектров поглощения этанольных экстрактов цианобактерий можно предположить наличие в их составе биогенетически ранних соединений фенольной природы, а именно оксибензойных кислот и фенилпропаноидов, как это отмечалось в немногочисленных исследованиях [10, 20]. Это согласуется и с представлениями о биогенезе этих метаболитов, формирование которых происходит на его начальных этапах при участии шикиматного и фенилпропаноидного путей [4, 5, 30]. Следует также отметить, что большинство представителей оксибензойных кислот формируют конъюгаты с углеводами и крайне редко присутствуют в клетках растений в свободной форме [4]. Вероятно, аналогичный процесс может происходить и в цианобактериях. Что касается фенилпропаноидов – биогенетических предшественников многих классов фенольных соединений, то они либо используются в этих процессах, либо вступают во взаимодействие с сахарами, полисахаридами клеточных стенок, ациклическими и алициклическими кислотами и некоторыми другими соединениями [4, 30].

Для выяснения этого вопроса хроматограммы обрабатывали реагентом на эти классы фенольных соединений, а именно диазотированным *para*-нитроанилином и 20% раствором Na₂CO₃ [26, 27, 29]. При взаимодействии с ним фенольные метчики-стандарты окрашиваются в разный цвет (от розового до фиолетового), что облегчает их идентификацию (данные не представлены). Согласно этим реакциям, можно предположить наличие в этанольных экстрактах цианобактерий *n*-оксибензойной и *n*-кумаровой кислот (синее и розово-коричневое окрашивание соответственно) (рис. 4).

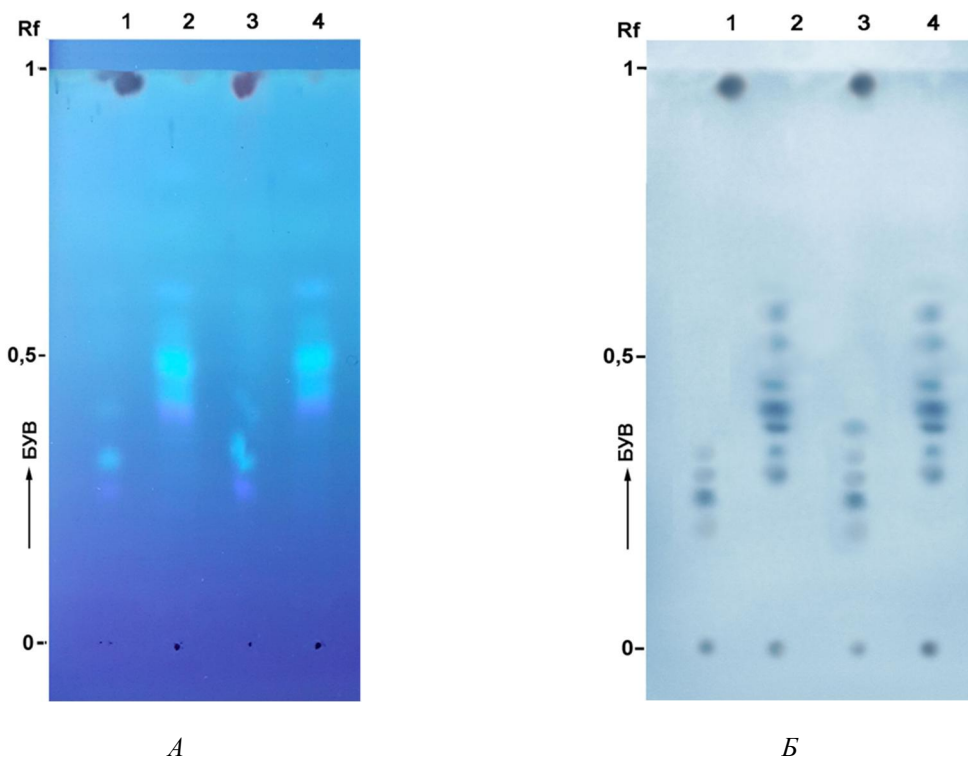


Рис 3. Хроматограммы (ТСХ на целлюлозе, растворитель: БУВ (*n*-бутанол – уксусная кислота – вода; 4 : 1 : 5, верхняя фаза)) этанольных экстрактов цианобактерий *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L (1, 3) и *Desertifilum tharense* (2, 4) различного возраста (1, 2 – 3 сутки; 3, 4 – 10 сутки). *A* – флюоресценция в УФ свете (366 нм), *B* – проявление смесью 1%-ных водных растворов FeCl_3 и $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (на все классы фенольных соединений)

Фенольные соединения в этанольных экстрактах цианобактерий*

Цианобактерия	Значения R_f^{**}	Флюоресценция в УФ свете		Проявление		Идентификация
		254 нм	366 нм	Реактив 1	Реактив 2	
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803 GT-L	0.21	+	+	+	–	ФС
	0.25	+	+	+	+	ФС – конъюгат <i>n</i> -кумаровой кислоты
	0.28	–	–	+	–	ФС
	0.33	–	–	+	+	ФС – конъюгат <i>n</i> -оксибензойной кислоты
<i>Desertifilum tharense</i>	0.29	–	+	+	–	ФС
	0.34	+	+	+	–	ФС
	0.37	+	+	+	+	ФС – конъюгат <i>n</i> -кумаровой кислоты
	0.47	–	–	+	+	ФС – конъюгат <i>n</i> -оксибензойной кислоты
	0.52	+	+	+	–	ФС
	0.62	–	–	+	–	ФС
	0.72	–	+	+	–	ФС

* Данные получены на основании исследования состава фенольных соединений методом тонкослойной хроматографии на целлюлозе. ** Растворитель: БУВ (*n*-бутанол – уксусная кислота – вода; 4 : 1 : 5, верхняя фаза). Реактив 1 – смесь 1%-ных водных растворов FeCl_3 и $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Реактив 2 – диазотированный *n*-нитроанилин и 20% раствор Na_2CO_3 . ФС – фенольное соединение (не идентифицировано).

Следует отметить, что значения R_f соединений, взаимодействующих с диазотированным *para*-нитроанилином, не совпадают с таковыми метчиков-стандартов этих фенольных соединений, что предполагает их присутствие в виде конъюгатов с другими соединениями, как это отмечалось в литературе [4]. Различия в значениях R_f конъюгатов *n*-оксибензойной и *n*-кумаровой кислот в экстрактах *Synechocystis* sp. и *D. tharense* свидетельствуют об отличиях в их структуре, что представляет большой интерес для последующих исследований.

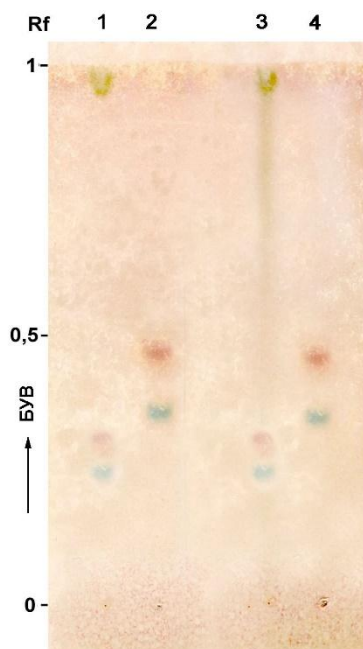


Рис. 4. Хроматограмма (ТСХ на целлюлозе, растворитель: БУВ (*n*-бутанол – уксусная кислота – вода; 4 : 1 : 5, верхняя фаза)) этанольных экстрактов цианобактерий *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L (1, 3) и *Desertifilum tharense* (2, 4) различного возраста (1, 2 – 3 сутки; 3, 4 – 10 сутки). Проявление диазотированным *para*-нитроанилином и 20% раствор Na_2CO_3

Выводы

Проведено определение содержания и состава фенольных соединений у одноклеточной цианобактерии *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L и термотолерантной нитчатой (многоклеточной) цианобактерии *Desertifilum tharense* из коллекции микроводорослей и цианобактерий ИРРАС ИФР РАН. Установлено, что для *Synechocystis* sp. характерна более высокая способность к их накоплению по сравнению с *D. tharense*. При этом в обоих случаях в период линейной фазы роста (3 сутки) количество этих соединений вторичного метаболизма было выше относительно стационарной фазы (10 сутки), как это часто отмечалось и для молодых активно растущих тканей растений.

Выявлены различия в составе фенольных соединений, извлекаемых этанолом из *Synechocystis* sp. и *D. tharense*, согласно данным спектральных характеристик экстрактов, тонкослойной хроматографии, УФ-спектрометрии и качественных реакций. В фенольном комплексе *Synechocystis* sp. было четыре соединения, флюоресцирующие в УФ-свете и дающие реакцию на полифенолы, тогда как у *D. tharense* – 7. Установлено наличие среди конъюгатов *n*-оксибензойной и *n*-кумаровой кислот – метаболитов начальных этапов биогенеза фенольных соединений.

Полученные данные свидетельствуют об образовании фенольных соединений у таких представителей цианобактерий, как *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L и *Desertifilum tharense*, что еще раз подтверждает «универсальность» биосинтеза этих вторичных метаболитов у различных организмов, начиная от прокариот и завершая эукариотами, то есть на различных этапах эволюционного развития.

Благодарности

Авторы благодарны Николаевой Татьяне Николаевне, знания и опыт которой внесли большой вклад в изучение фенольных соединений различных организмов – цианобактерий, лишайников, высших растений.

Финансирование

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 21-74-30003 (Лось Д.А.), а также при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № 122042600086-7, № 122042700043-9).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Лукнер М. Вторичный метаболизм у микроорганизмов, растений и животных. М., 1979. 548 с.
2. Landia M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S.I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review // BBA – Bioenergetics. 2020. Vol. 1861. 148131. DOI: 10.1016/j.bbabi.2019.148131.
3. Wen W., Alseekh S., Fernie A.R. Conservation and diversification of flavonoid metabolism in the plant kingdom // Current opinion in plant biology. 2020. Vol. 55. Pp. 100–108. DOI: 10.1016/j.pbi.2020.04.004.
4. Запрометов М.Н. Фенольные соединения: Распространение, метаболизм и функции в растениях. М., 1993. 272 с.
5. Cheyner V., Comte G., Davis K.M., Lattanzio V., Martens S. Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology // Plant Physiology and Biochemistry. 2013. Vol. 72. Pp. 1–20.
6. Singh S., Kaur I., Kariyat R. The multifunctional roles of polyphenols in plant-herbivore interactions // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22(3). 1442. DOI: 10.3390/ijms22031442.
7. Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity // Food Chemistry. 2022. Vol. 383. 132531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132531.
8. Prabhu S., Molath A., Choksi H., Kumar S., Mehra R. Classifications of polyphenols and their potential application in human health and diseases // Int. J. Physiol. Nutr. Phys. Educ. 2021. Vol. 6(1). Pp. 293–301.
9. Jerez-Martel I., García-Poza S., Rodríguez-Martel G., Rico M., Afonso-Olivares C., Gómez-Pinchetti J.L. Phenolic profile and antioxidant activity of crude extracts from microalgae and cyanobacteria strains // J. Food Quality. 2017. Vol. 4. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2017/2924508.
10. Del Mondo A., Smerilli A., Ambrosino L., Albini A., Noonan D.M., Sansone C., Brunet C. Insights into phenolic compounds from microalgae: structural variety and complex beneficial activities from health to nutraceuticals // Critical Reviews in Biotechnology. 2021. Vol. 41. Pp. 155–171. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874284.
11. Krylova J., Kurashov E. Potential applications of the low-molecular-weight metabolome of *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, 1892 (Cyanophyceae: Merismopediaceae) // Algae Biotechnology: Integrated Algal Engineering for Bioenergy, Bioremediation, and Biomedical Applications. Elsevier, 2022. Pp. 347–376. DOI: 10.1016/B978-0-323-90476-6.00021-2.
12. Шестаков С.В., Карбышева Е.А. О происхождении и эволюции цианобактерий // Успехи современной биологии. 2017. Т. 137. №1. С. 4–19.
13. Цоглин Л.Н., Пронина Н.А. Биотехнология микроводорослей. М., 2012. 184 с.
14. Будагаева В.Г., Раднагуруева А.А., Лаврентьева Е.В., Бархутова Д.Д., Оленников Д.Н. Углеводы микробных матов щелочных гидротерм Прибайкалья // Химия растительного сырья. 2018. №1. С. 45–51. DOI: 10.14258/jcrpm.2018012168.
15. Zahra Z., Choo Da H., Lee H., Parveen A. Cyanobacteria: review of current potentials and applications // Environments. 2020. Vol. 7. 13. DOI: 10.3390/environments7020013.
16. Зинченко В.В., Глазер В.М., Кряжов С.В., Лучкин П.В., Бабыкин М.М., Белавина Н.В., Лось Д.А. Создание коллекций мутантов для исследования генетического контроля адаптации к стрессовым факторам у *Synechocystis* sp. PCC 6803 // Экологическая генетика. 2008. Т. 6 (3). С. 33–41.
17. Лось Д.А. Сенсорные системы цианобактерий. М., 2010. 217 с.
18. Sinetova M.A., Los D.A. Systemic analysis of transcriptomics of *Synechocystis*: common stress genes and their universal triggers // Molecular BioSystems. 2016. Vol. 12. Pp. 3254–3258.
19. Lai Y.S., Zhou Y., Eustance E., Straka L., Wang Z., Rittmann B.E. Cell disruption by cationic surfactants affects bioproduct recovery from *Synechocystis* sp. PCC 6803 // Algal Res. 2018. Vol. 3. Pp. 250–255.
20. Gao E-B., Kyere-Yeboah K., Wu J., Qiu H. Photoautotrophic production of p-coumaric acid using genetically engineered *Synechocystis* sp. Pasteur Culture Collection 6803 // Algal Research. 2021. Vol. 54. 102180. DOI: 10.1016/j.algal.2020.102180.
21. Gonzalez-Resendiz L., Johansen J.R., Leon-Tejera H., Sanchez L., Segal-Kischinevzky C., Escobar-Sanchez V., Morales M. A bridge too far in naming species: a total evidence approach does not support recognition of four species in *Desertifilum* (Cyanobacteria) // J. Phycol. 2019. Vol. 55. Pp. 898–911.
22. Sinetova M.A., Bolakhan K., Sidorov R.A., Mironov K.S., Skrypnik A.N., Kupriyanova E.V., Zayadan B.K., Shumskaya M.A., Los D.A. Polyphasic characterization of the thermotolerant cyanobacterium *Desertifilum* sp. strain IPPAS B-1220 // FEMS Microbiol. Lett. 2017. Vol. 364(4). fnx027. DOI: 10.1093/femsle/fnx027.
23. Gabrielyan D.A., Sinetova M.A., Gabrielyan A.K., Bobrovnikova L.A., Bedbenov V.S., Starikov A.Y., Zorina A.A., Gabel B.V., Los D.A. Laboratory system for intensive cultivation of microalgae and cyanobacteria // Rus. J. Plant Physiol. 2023. Vol. 70(2). Pp. 202–213. DOI: 10.1134/S1021443722602737.
24. Stanier R.Y., Kunisawa R., Mandel M., Cohen-Bazire G. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order *Chlorococcales*) // Bacteriol. Rev. 1971. Vol. 35. Pp. 171–205.
25. Olenichenko N.A., Zagoskina N.V. Response of winter wheat to cold: production of phenolic compounds and L-phenylalanine ammonia lyase activity // Applied Biochemistry and Microbiology. 2005. Vol. 41. Pp. 600–603. DOI: 10.1134/S0003683808050141.
26. Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Загоскина Н.В. Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина-Дениса и реактивом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 291–299. DOI: 10.14258/jcrpm.2021028250.

27. Запрометов М.Н. Основы биохимии фенольных соединений. М., 1974. 215 с.
28. Zagoskina N.V., Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zavarzin A.A., Zavarzina A.G. Water-soluble phenolic compounds in lichens // *Microbiology*. 2013. Vol. 82. Pp. 445–452. DOI: 10.1134/S0026261713030132.
29. Harborne J.B. *Phytochemical methods*. London, 1984. 288 p.
30. Vogt T. Phenylpropanoid biosynthesis // *Molecular plant*. 2010. Vol. 3(1). Pp. 2–20. DOI: 10.1093/mp/ssp106.

Поступила в редакцию 7 марта 2023 г.

После переработки 6 июня 2023 г.

Принята к публикации 2 октября 2023 г.

Zagoskina N.V.* , Sinetova M.A., Lapshin P.V., Los D.A. COMPARISON OF THE PHENOLIC COMPOUNDS CONTENT AND COMPOSITION IN *SYNECHOCYSTIS* SP. SAUVAGEAU AND *DESERTIFILUM THARENSE* DADHEECH ET KRIENITZ

K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences, Botanicheskay st., 35, Moscow, 127276, Russia, e-mail: nzagoskina@mail.ru

The content and composition of phenolic compounds in *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L and *Desertifilum tharense* were studied for the first time. A spectrophotometric method was used to determine the phenolic compounds content, thin-layer chromatography and UV spectrometry to study their composition. A higher accumulation of these secondary metabolites was found in *Synechocystis* sp., which was almost twice as high as that in *Desertifilum tharense*. In both cases, the higher content of phenolic compounds was observed in the linear phase of cyanobacteria growth (3 days). *Synechocystis* sp. and *Desertifilum tharense* characterized by the formation of phenolics (4 and 7 compounds, respectively), which contain *p*-oxybenzoic or *p*-coumaric acids – the initial stages' metabolites of the phenolic compounds biogenesis.

Keywords: *Synechocystis* sp. PCC 6803 GT-L, *Desertifilum tharense*, phenolic compounds, content, composition.

For citing: Zagoskina N.V., Sinetova M.A., Lapshin P.V., Los D.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 1, pp. 177–185. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240112643.

References

1. Lukner M. *Vtorichnyy metabolizm u mikroorganizmov, rasteniy i zhivotnykh*. [Secondary metabolism in microorganisms, plants and animals]. Moscow, 1979, 548 p. (in Russ.).
2. Landia M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S.I. *BBA – Bioenergetics*, 2020, vol. 1861, 148131. DOI: 10.1016/j.bbabo.2019.148131.
3. Wen W., Alseekh S., Fernie A.R. *Current opinion in plant biology*, 2020, vol. 55, pp. 100–108. DOI: 10.1016/j.pbi.2020.04.004.
4. Zaprometov M.N. *Fenol'nyye soyedineniya: Rasprostraneniye, metabolizm i funktsii v rasteniyakh*. [Phenolic compounds: Distribution, metabolism and functions in plants]. Moscow, 1993, 272 p. (in Russ.).
5. Cheynier V., Comte G., Davis K.M., Lattanzio V., Martens S. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, vol. 72, pp. 1–20.
6. Singh S., Kaur I., Kariyat R. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22(3), 1442. DOI: 10.3390/ijms22031442.
7. Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B. *Food Chemistry*, 2022, vol. 383, 132531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132531.
8. Prabhu S., Molath A., Choksi H., Kumar S., Mehra R. *Int. J. Physiol. Nutr. Phys. Educ.*, 2021, vol. 6(1), pp. 293–301.
9. Jerez-Martel I., García-Poza S., Rodríguez-Martel G., Rico M., Afonso-Olivares C., Gómez-Pinchetti J.L. *J. Food Quality*, 2017, vol. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2017/2924508.
10. Del Mondo A., Smerilli A., Ambrosino L., Albini A., Noonan D.M., Sansone C., Brunet C. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, vol. 41, pp. 155–171. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874284.
11. Krylova J., Kurashov E. *Algae Biotechnology: Integrated Algal Engineering for Bioenergy, Bioremediation, and Biomedical Applications*. Elsevier, 2022, pp. 347–376. DOI: 10.1016/B978-0-323-90476-6.00021-2.
12. Shestakov S.V., Karbysheva Ye.A. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2017, vol. 137, no. 1, pp. 4–19. (in Russ.).
13. Tsoglin L.N., Pronina N.A. *Biotekhnologiya mikrovdorosley*. [Biotechnology of microalgae]. Moscow, 2012, 184 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

14. Budagayeva V.G., Radnaguruyeva A.A., Lavrent'yeva Ye.V., Barkhutova D.D., Olennikov D.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 1, pp. 45–51. DOI: 10.14258/jcprm.2018012168. (in Russ.).
15. Zahra Z., Choo Da H., Lee H., Parveen A. *Environments*, 2020, vol. 7, 13. DOI: 10.3390/environments7020013.
16. Zinchenko V.V., Glazer V.M., Kryazhov S.V., Luchkin P.V., Babykin M.M., Belavina N.V., Los' D.A. *Ekologicheskaya genetika*, 2008, vol. 6 (3), pp. 33–41. (in Russ.).
17. Los' D.A. *Sensornyye sistemy tsianobakteriy*. [Sensory systems of cyanobacteria]. Moscow, 2010, 217 p. (in Russ.).
18. Sinetova M.A., Los D.A. *Molecular BioSystems*, 2016, vol. 12, pp. 3254–3258.
19. Lai Y.S., Zhou Y., Eustance E., Straka L., Wang Z., Rittmann B.E. *Algal Res.*, 2018, vol. 3, pp. 250–255.
20. Gao E-B., Kyere-Yeboah K., Wu J., Qiu H. *Algal Research*, 2021, vol. 54, 102180. DOI: 10.1016/j.algal.2020.102180.
21. Gonzalez-Resendiz L., Johansen J.R., Leon-Tejera H., Sanchez L., Segal-Kischinevzky C., Escobar-Sanchez V., Morales M. *J. Phycol.*, 2019, vol. 55, pp. 898–911.
22. Sinetova M.A., Bolakhan K., Sidorov R.A., Mironov K.S., Skrypnik A.N., Kupriyanova E.V., Zayadan B.K., Shumskaya M.A., Los D.A. *FEMS Microbiol. Lett.*, 2017, vol. 364(4), fnx027. DOI: 10.1093/femsle/fnx027.
23. Gabrielyan D.A., Sinetova M.A., Gabrielyan A.K., Bobrovnikova L.A., Bedbenov V.S., Starikov A.Y., Zorina A.A., Gabel B.V., Los D.A. *Rus. J. Plant Physiol.*, 2023, vol. 70(2), pp. 202–213. DOI: 10.1134/S1021443722602737.
24. Stanier R.Y., Kunisawa R., Mandel M., Cohen-Bazire G. *Bacteriol. Rev.* 1971, vol. 35, pp. 171–205.
25. Olenichenko N.A., Zagoskina N.V. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2005, vol. 41, pp. 600–603. DOI: 10.1134/S0003683808050141.
26. Nikolayeva T.N., Lapshin P.V., Zagoskina N.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 291–299. DOI: 10.14258/jcprm.2021028250. (in Russ.).
27. Zaprometov M.N. *Osnovy biokhimii fenol'nykh soyedineniy*. [Fundamentals of biochemistry of phenolic compounds]. Moscow, 1974, 215 p. (in Russ.).
28. Zagoskina N.V., Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zavarzin A.A., Zavarzina A.G. *Microbiology*, 2013, vol. 82, pp. 445–452. DOI: 10.1134/S0026261713030132.
29. Harborne J.B. *Phytochemical methods*. London, 1984, 288 p.
30. Vogt T. *Molecular plant*, 2010, vol. 3(1), pp. 2–20. DOI: 10.1093/mp/ssp106.

Received March 7, 2023

Revised June 6, 2023

Accepted October 2, 2023

Сведения об авторах

Загоскина Наталья Викторовна – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, руководитель группы фенольного метаболизма растений, nzagoskina@mail.ru

Синетова Мария Андреевна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией экофизиологии микроводорослей (с Коллекцией IPPAS), ведущий научный сотрудник, maria.sinetova@mail.ru

Лапшин Петр Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель группы суккулентных растений, p.lapsin@mail.ru

Лось Дмитрий Анатольевич – доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор, директор, заведующий отделом молекулярных биосистем, losda@ippras.ru

Information about authors

Zagoskina Natalya Viktorovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Head of the Plant Phenolic Metabolism Group, nzagoskina@mail.ru

Sinetova Maria Andreevna – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Ecophysiology of Microalgae (with the IPPAS Collection), Leading Researcher, maria.sinetova@mail.ru

Lapshin Petr Vladimirovich – Candidate of Biological Sciences, senior researcher, head of the group of succulent plants, p.lapsin@mail.ru

Los Dmitry Anatolyevich – Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director, Head of the Department of Molecular Biosystems, losda@ippras.ru