

Научная статья/Research Article

УДК 582.9:631.5

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-34-45

Алина Сергеевна Иваницких¹✉, Иван Германович Тараканов²

¹Федеральный научный агронженерный центр ВИМ, Москва, Россия

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

¹alinena@yandex.ru

²plantphys@rgau-msha.ru

**НАКОПЛЕНИЕ КВЕРЦЕТИНА И СТЕВИОЛГЛИКОЗИДОВ
В ЛИСТЬЯХ РАСТЕНИЙ *STEVIA REBAUDIANA* ПРИ ДОБАВЛЕНИИ К СПЕКТРУ
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ УФ-С ИЗЛУЧЕНИЯ**

Цель исследования – изучить влияние добавленного к основному излучению в области ФАР облучения растений УФ-С спектром на синтез и аккумуляцию стевиолгликозидов и кверцетина в листьях черенков стевии в процессе вегетативного размножения, а также у взрослых растений. Была проверена гипотеза о возможном увеличении синтеза вторичных метаболитов на примере кверцетина и стевиолгликозидов в листьях растущих черенков и взрослых растений стевии в трех вариантах светодиодного освещения с дополнением основного фотосинтетического потока фотонов излучением в области УФ-С спектра (длина волны 275 нм, мощность 50–60 мВт/м²). Содержание кверцетина и стевиолгликозидов определяли методом высокоеффективной жидкостной хроматографии. Добавление УФ-С спектра негативно влияло на рост и развитие побегов из черенков; наблюдали уменьшение по сравнению с контролем высоты и массы растений, а также площади листьев. Количество стевиолгликозидов у взрослых растений в варианте, близком к дневному свету (С14340К42ДК4), было наименьшим (2,23 %), а в варианте с УФ-С повышалось почти в два раза (4 %). В варианте С20320К53ДК7 с УФ-С было на 15 % больше и стало максимальным (5 %). Под диодами красно-синего спектра с большой долей дальнего красного (С2334К54ДК19) было равным, как и в варианте без внесения УФ-С (около 4 %). Получены данные о положительном влиянии УФ-С излучения, дополняющего основной поток ФАР, на накопление кверцетина в активно развивающихся листьях стевии и увеличении суммарного содержания стевиолгликозидов при облучении взрослых растений и черенков.

Ключевые слова: стевия, ультрафиолет, УФ-С, светодиоды, кверцетин, стевиолгликозиды, стевиозид, вторичные метаболиты

Для цитирования: Иваницких А.С., Тараканов И.Г. Накопление кверцетина и стевиолгликозидов в листьях растений *Stevia rebaudiana* при добавлении к спектру фотосинтетически активной радиации УФ-С излучения // Вестник КрасГАУ. 2026. № 1. С. 34–45. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-34-45.

Alina Sergeevna Ivanitskikh¹✉, Ivan Germanovich Tarakanov²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

¹alinena@yandex.ru

²plantphys@rgau-msha.ru

**QUERCETIN AND STEVIOL GLYCOSIDES ACCUMULATION IN *STEVIA REBAUDIANA* PLANTS
AS AFFECTED BY SUPPLEMENTARY TO THE MAIN PHOTOSYNTHETIC
PHOTON FLUX UV-C IRRADIATION**

The aim of the study is to investigate the effect of UV-C irradiation of plants, supplemented with the main PAR radiation, on the synthesis and accumulation of steviol glycosides and quercetin in the leaves of stevia cuttings during vegetative propagation, as well as in adult plants. The hypothesis of a possible in-

crease in the synthesis of secondary metabolites was tested using quercetin and steviol glycosides in the leaves of growing cuttings and adult stevia plants as an example under three variants of LED lighting with supplementation of the main photosynthetic photon flux with UV-C radiation (wavelength 275 nm, power 50–60 mW/m²). The content of quercetin and steviol glycosides was determined by high-performance liquid chromatography. The addition of UV-C spectrum negatively affected the growth and development of shoots from cuttings; a decrease in plant height and weight, as well as leaf area, was observed compared to the control. The amount of steviol glycosides in adult plants in the variant close to daylight (C14340K42ДК4) was the lowest (2.23 %), while in the variant with UV-C it increased almost twofold (4 %). In the variant C20320K53ДК7 with UV-C, it was 15 % higher and reached the maximum (5 %). Under red-blue spectrum diodes with a large proportion of far-red (C2334K54ДК19), it was the same as in the variant without the addition of UV-C (about 4 %). Data were obtained on the positive effect of UV-C radiation, supplementing the main PAR flux, on the accumulation of quercetin in actively developing stevia leaves and an increase in the total content of steviol glycosides during irradiation of adult plants and cuttings.

Keywords: stevia, ultraviolet, UV-C, LEDs, quercetin, steviol glycosides, stevioside, secondary metabolites

For citation: Ivanitskikh AS, Tarakanov IG. Quercetin and steviol glycosides accumulation in *Stevia rebaudiana* plants as affected by supplementary to the main photosynthetic photon flux UV-C irradiation. *Bulletin of KSAU*. 2026;(1):34-45. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-1-34-45.

Введение. В настоящее время УФ-С (до 280 нм) поглощается озоновым слоем Земли и не достигает поверхности, но данное излучение может использоваться в искусственных агрозоэко-системах и системах постеборочной обработки с целью повышения содержания целевых метаболитов. Применение УФ-спектра света для выращивания и обработки растениеводческой продукции относится к экологически чистому фактору воздействия [1].

Повышение содержания продуктов вторичного обмена в растениеводческой продукции важно для поддержания здоровья человека [2]. Изменение в составе растений может оказывать воздействие на развитие вредителей и болезней [3].

Световые факторы могут являться оптимальными, а могут и оказывать относительно неблагоприятное воздействие как на онтогенез растительного организма в целом, так и на процессы метаболизма на клеточном уровне [4, 5]. В растениях разные по природе виды воздействий – УФ-излучение, патогены и механические повреждения – часто ведут к активации ряда идентичных генов; воздействие одного фактора, с большой долей вероятности, отражается в устойчивости к другим неблагоприятным воздействиям [6].

Облучение биологических объектов УФ-С спектром радиации для подавления патогенной микрофлоры может применяться как при постеборочном воздействии на сами растения, так и на их плоды [7]. Обработка УФ-С может задер-

живать старение плодов, снижать скорость дыхания за счет инактивации ферментативной активности, повышения содержания перекиси водорода и способности поглощать свободные радикалы, способствует повышению уровня содержания глутатиона, аскорбиновой кислоты и фенольных соединений [8]. УФ-С снижает частоту и степень гниения плодов, потерю массы при длительном хранении, уровень перекисного окисления липидов, повышает содержание общего растворимого твердого вещества и титруемой кислотности в плодах [9] соединений группы флавоноидов, дубильных веществ, лигнина [10] псоралена, бергаптена [11], сахарозы, глюкозы, фруктозы [12], тетрагидроканнабинола [13] катехина, лютеолина, а также фенольных кислот: галловой, коричной и феруловой [14]. Фенольные соединения предположительно обладают защитными свойствами, и их содержание может быть увеличено в ответ на УФ-С воздействие [15]. Обработка плодов УФ-С стимулирует процессы лигнификации и суберинизации и биосинтез фенольных соединений в клеточной стенке.

В условиях засухи, дефицита питательных веществ чувствительность к УФ-С снижается, а при снижении интенсивности видимого спектра излучения чувствительность возрастает [16].

Воздействие УФ усиливает активность фенилаланин-аммиак-лиазы, фермент, который является ключевым в метаболизме фенилпропаноидов, вследствие чего биосинтез фенольных соединений увеличивается. Применение

УФ-С при воздействии носит регуляторный характер [17].

Ранее было показано, что существует возможность воздействия УФ-С на ценные компоненты вторичного биосинтеза стевии: содержание кверцетина и стевиолгликозидов [18]. Количество кверцетина может меняться при воздействии УФ на растение. Кверцетин выступает компонентом системы эндогенной защиты тканей растения от ультрафиолетового излучения, может действовать как антиоксидант [19]. Присутствие сравнительно высоких доз УФ-излучения преимущественно меняет фенотип растения, вызывая замедление роста, накопление общей биомассы и уменьшение площади листьев, хотя толщина листовых пластинок увеличивается. УФ оказывает влияние на устьица, делая их более устойчивыми к недостатку влаги, снижая у неустойчивых к УФ видов содержание хлорофилла [5].

Цель исследования – изучить влияние добавленного к основному излучению в области ФАР-облучения растений УФ-С спектром на синтез и аккумуляцию стевиолгликозидов и кверцетина в листьях черенков стевии в процессе вегетативного размножения, а также у взрослых растений.

Объекты и методы. Для черенкования использовали вегетативные побеги стевии от маточных растений возрастом 120 дней. Нарезали черенки с тремя междуузлиями, площадь листьев в двух верхних узлах при этом сокращали на 50 %. Нижний косой срез (без листьев) перед посадкой обрабатывали в порошке препарата «Корневин». Черенки для укоренения были высажены в 0,5-литровые полимерные горшки, наполненные нейтрализованным верховым торфом «Агробалт С» (ОАО «Росторфинвест»), первоначально нейтрализованным и заправленным удобрениями производителем. Для укоренения и сохранения влаги черенки укрывали прозрачной пленкой, через 14 дней пленка удалялась. На тридцатый день примерно 50 % черенков стевии отметили успешное развитие корневой системы и провели выбраковку непржившихся растений. Также в условиях проведения опыта на соответствующие варианты све-

товых режимов были помещены взрослые растения стевии с хорошо развитыми вегетативными побегами возрастом 120 дней.

Исследования проводили в климатической камере СК-ВИМ-8.8, изготовленной и расположенной в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. В камере автоматически поддерживались: влажность воздуха 50 %, температура днем – 22 °С, ночью – 19 °С, полив и подкормку проводили вручную; фотопериод – 16 ч. Относительно длинный день благоприятствовал преимущественно вегетативному развитию растений.

Камера оборудована шестью стеллажами, расположенными в два яруса, три полки в верхнем ярусе, три в нижнем. Полки отделены перегородками, образуя 6 отсеков. Облучение полок обеспечивалось комбинацией светодиодов с излучением в области ФАР. Верхние ярусы, без УФ-С, – основное базовое освещение (Л1, Л2, Л3), его интенсивность составила $140 \pm 8 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$, что является минимально достаточным для нормального развития растений (табл. 1, рис. 1–3).

Спектр оптического излучения Л1 (С14340К42ДК4) приближен к солнечному свету, имеет наибольшую долю зеленого спектра и взят за контроль. Спектр Л2 (С20320К53ДК7) имеет немного большую долю синего и красного спектров. Спектр Л3 (С2334К54ДК19) имеет еще большее излучение в области синего и красного и дальнего красного спектров. Измерения спектрального состава излучения и PPFD проводили спектрометром MK350D Compact Spectrometer (Taiwan).

На нижнем ярусе стеллажей облучатели были дополнены диодами УФ-С, со спектром (Л1+УФ-С, Л2+УФ-С, Л3+УФ-С). Облучатель УФ-С спектра представлял собой алюминиевый радиатор с прикрепленными печатными платами со светодиодами. Диоды УФ-С спектра были включены на 30-й день вегетации черенков и работали ежедневно в течение двух часов с периодом работы: 20 секунд – излучение, 120 секунд – пауза, интенсивность – 50 мВт/м². Одновременно с началом действия режимов с дополнительным УФ-С излучением на них наряду с расчлененными были перенесены и взрослые растения.

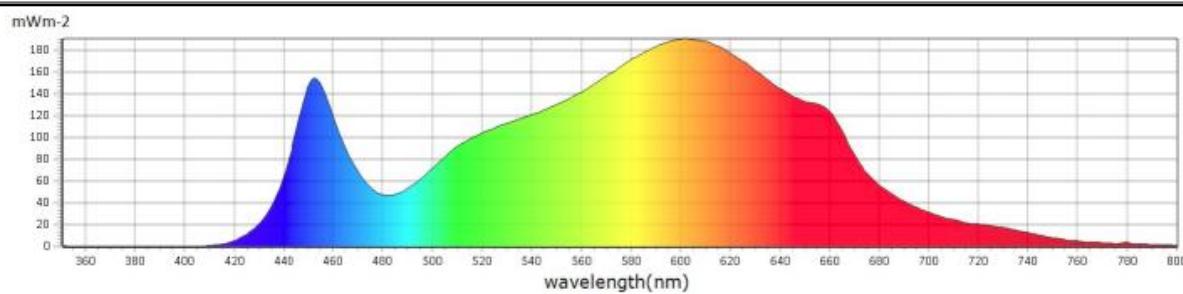


Рис. 1. Спектральный состав основного света Л1
Spectral composition of the main light L1

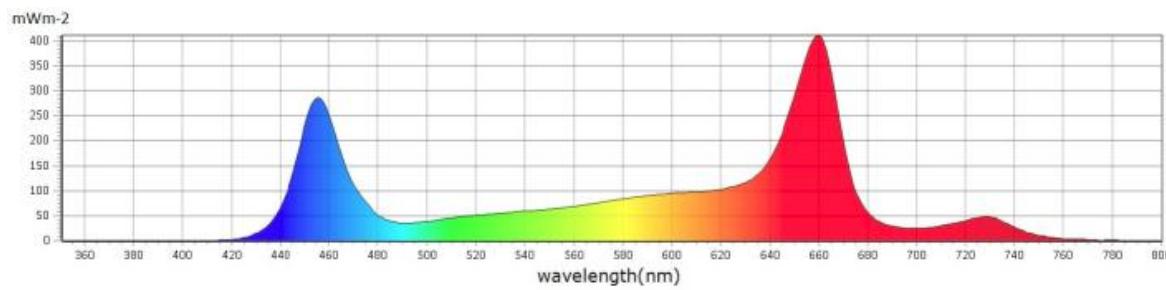


Рис. 2. Спектральный состав основного света Л2
Spectral composition of the main light L2

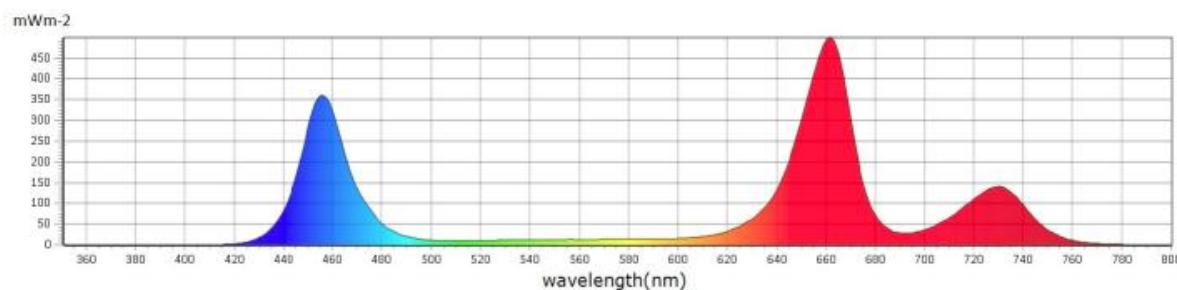


Рис. 3. Спектральный состав основного света Л3
Spectral composition of the main light L3

Таблица 1
Спектральные характеристики источников облучения
Spectral characteristics of radiation sources

Вариант освещения	Соотношение спектров в общем потоке фотонов, %					УФ-С 275 нм, мВт/м²
	ППФД, мкмоль м⁻²с⁻¹	Синий 400–500 nm	Зеленый 500–600 nm	Красный 600–700 nm	Дальний красный 700–800 nm	
Л1	140±8	14	40	42	4	–
Л1+УФ-С	140±8	14	40	42	4	50–60
Л2	140±8	20	20	53	7	–
Л2+УФ-С	140±8	20	20	53	7	50–60
Л3	140±8	23	4	54	19	–
Л3+УФ-С	140±8	23	4	54	19	50–60

Определение биометрических показателей. Для определения сырой и сухой биомассы, а также высоты и площади листьев отбирали по четыре растения из каждого варианта.

Высота растения определялась линейкой (ГОСТ 17435-72) и вычислялась как среднее среди вновь развитых в ходе эксперимента побегов из черенков.

Подсчет листьев выполнялся вручную, во внимание принимались хорошо развитые листья, размером более 1 см².

Определение площади листьев проводили на фотопланиметре Li-Cor LI-3100 (США).

Для определение сырой и сухой массы растения взвешивали на лабораторных весах GF-3000 (A&D Company, Япония). Для определения сухой массы растений использовали побеги и листья после высушивания в сушильном шкафу ПЭ-4630М (Россия) при температуре 105 °С.

Измерение биохимических показателей. Для определения собирали все листья с каждого растения отдельно, высушивали при 60 °С в течение 4 часов и измельчали в фарфоровой ступке.

Количественное определение кверцетина. Навеску массой 0,3 г помещали в коническую колбу, приливали 30 мл этилового спирта и 0,15 мл серной кислоты, на верх колбы помещали ходильник Димрота и кипятили при температуре 78,4 °С в течение 30 мин. После охлаждения доводили до объема 50 мл этиловым спиртом. Затем помещали в ультразвуковую ванну Elmasonic S10 на 5 мин. После отстаивания растворы фильтровали с помощью фильтровальной бумаги «синяя лента», а затем пропускали через шприцевую фильтрующую насадку (размер пор 0,45/25) и отбирали аликвоту объемом 1 мл и переносили в подписанную виалу.

Концентрацию кверцетина определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20AD со спектрофотометрическим детектором. Для идентификации пика и определения времени выхода компонента использовали стандартный образец кверцетина (Sigmaaldrich CAS 849061-97-8). Разделение проводили на обратнофазной колонке C18 Luna 250*4.6 мм. Детектирование проводилось при длине волны 358 нм. Скорость потока элюента составляет 1 мл/мин, градиент – 50 % ацетонитрила и 50 % сверхчистой деонизированной воды, объем вводимой пробы – 10 мкл. Температура хрома-

тографирования – 35 °С. Продолжительность анализа составляла 20 мин.

Количественное определение суммы стевиолгликозидов. Измельченную, предварительно высушеннную навеску листьев 0,05 г заливали 30 мл 50 %-го этанола и кипятили на водяной бане при температуре 82,8 °С 30 мин. После остывания экстракт доводили 50 % этанолом до 50 мл и помещался на 5 мин в ультразвуковую ванну. После чего фильтровали фильтровальной бумагой и пропускали через шприцевой фильтр, отбирали аликвоту объемом 1 мл в подписанную виалу и исследовали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе LC-20 (Shimadzu, Киото, Япония) с использованием обратнофазной колонки C18 Eclipse Plus C18, 4,6 × 150 мм, 5 мкм (Agilent, США). Определение проводили при следующих условиях: скорость потока – 1,0 мл/мин, градиент – 50 % ацетонитрила 50 % сверхчистой деонизированной воды, температура – 30 °С, время анализа – 20 мин, длина волны детектирования – 210 нм. Расчет содержания суммы стевиолгликозидов проводили относительно калибровки с использованием аналитического стандарта на стевиозид (Supelco, США). Затем производили расчет процента суммы стевиолгликозидов на сухую массу.

Статистический анализ. Все исследования проводили в четырех биологических и трех аналитических повторностях. Полученные экспериментальные данные были обработаны и получено графическое представление данных в MS Excel. Результаты выражали как среднее ± стандартное отклонение, различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,5$.

Результаты и их обсуждение. Вегетативное развитие выросших черенков стевии (увеличение высоты растений, сырой и сухой массы стебля и листьев, а также площади листьев) происходило более быстрыми темпами под источником излучения, наиболее приближенным по своим спектральным характеристикам к солнечному свету (Л1) (табл. 2). Дополнение базовых спектров облучения спектром УФ-С излучения тормозило ростовые процессы и снижало биометрические показатели растений во всех вариантах. Ранее было показано, что ультрафиолетовое облучение влияет на морфологию растений, что может выражаться в задержке роста растений, уменьшении площади листьев и общей биомассы, распределении ассимилян-

тов, направленных на перераспределение процессов онтогенеза. Чувствительность к ультрафиолету зависит от вида и даже сорта.

В вариантах с УФ-С излучением наблюдали у растений потемнение верхушечных листьев, целиком либо частичное. Ранее отмечалось, что защитной реакцией на травмирующее воздействие УФ-С является проявление хлороза, повреждение начинается с верхнего эпидермиса листьев, который темнеет, вследствие чего проникновение УФ радиации в мезофилл уменьшается [5].

Было отмечено, что обработка невысокими дозами УФ-Б повышает концентрацию хлорофилла, скорость переноса электронов по всей цепи, но снижает фотофосфорилирование, и как следствие, падает эффективность фотосинтеза. Чистая скорость фотосинтеза и устьичная проводимость снижаются, но у риса на 25-й день обработки становятся сравнимы с листьями без обработки, подверженными естественному старению. При проведении микроскопии в развивающихся листьях отмечено, что УФ замедлил развитие хлоропластов, в дальнейшем приведя к их разрушению, при этом мембранные хлоропласты набухли и разрушились, а в строме тилакоиды заняли параллельное положение относительно друг друга, что, возможно, способствовало более эффективному протеканию процесса фотосинтеза. Визуально отмечали накопление липидных капель и пластоглобул крахмала, что вызвано нарушением транспорта продуктов вторичного обмена [20].

В дальнейшем следует продолжить работу в оценке более эффективной дозы воздействия

УФ-С излучения, его времени воздействия на фотосинтетический листовой аппарат стевии, в меньшей степени приводящий к разрушению ассимиляционной ткани.

Процесс реакции растений на ультрафиолет напрямую связан с деструкцией Рубиско. Изменения в инактивации фермента происходят при структурных перестройках больших и малых субъединиц и в целом в четвертичной структуре, что влечет конформацию реакционных центров, расположенных на больших субъединицах, что приводит к снижению активности. Вероятно, происходит димеризация из-за образования ковалентных несульфидных связей между субъединицами. Молекулярная модификация, влекущая снижение активности Рубиско, наблюдается уже в первые 3 ч воздействия ультрафиолетом. При дальнейшем исключении стрессового фактора активность фермента восстанавливается, по-видимому, за счет синтеза и замены поврежденных участков. Фермент в большей степени поглощает в диапазоне УФ-С (250–260 нм), что приводит к его ингибированию на 60 % по сравнению с контрольными значениями, а при УФ 300 нм ингибирование составляет всего 25–35 %. Восстановление после временного воздействия ультрафиолета зависит от его волны и дозы, наиболее сильное приводит не только к изменению структуры Рубиско, но и нарушению его синтеза [21]. Исключение из спектра УФ приводило к повышению уровня Рубиско и увеличению его общей активности [22].

Таблица 2

Биометрические показатели черенков стевии в возрасте 74 дня
Biometric indicators of stevia cuttings at the age of 74 days

Вариант освещения	Высота растения, см	Сырая масса стебля, г	Сырая масса листьев, г	Площадь листовой поверхности, см ²	Сухая масса листьев, г	УППЛ, мг/см ²
Л1	29,4±2,3	8,1±0,5	15,3±1,8	653,6±15,3	2,5±0,2	3,8
Л1+УФ-С	22,4±4,2	7,5±0,7	12,4±1,2	558,0±17,3	2,1±0,1	3,7
Л2	25,4±2,1	7,9±0,5	14,6±1,6	642,4±23,8	2,2±0,2	3,4
Л2+УФ-С	21,8±1,5	6,9±0,5	8,5±1,7	389,2±31,2	1,1±0,1	2,8
Л3	18±1,5	5,8±0,3	10,4±0,5	499,2±15,8	1,3±0,1	2,6
Л3+УФ-С	16,5±2,3	4,2±0,2	5,4±0,7	237,6±16,7	0,9±0,1	3,7

В таблице 3 и на рисунке 4 представлено содержание кверцетина в листьях расчлененных растений стевии. Его количество увеличивалось в онтогенезе и было больше на 88-й день по сравнению с 74-м. Если сравнивать варианты с основным освещением (Л1, Л2, Л3) у черенков в возрасте 74 дня максимальное содержание кверцетина было отмечено в варианте Л3 (0,520 мг/100 г). На 88-й день под всеми источниками света, дополненными УФ-С спек-

трами с основным освещением (Л1, Л2, Л3) у черенков в возрасте 74 дня максимальное содержание кверцетина было отмечено в варианте Л3 (0,520 мг/100 г). На 88-й день под всеми источниками света, дополненными УФ-С спек-

тром, содержание кверцетина было выше, чем в соответствующих вариантах без дополнительного УФ-излучения.

Наиболее благоприятным для повышения уровня содержания кверцетина у взрослых растений был световой режим Л1, наиболее приближенный к спектру солнечного света. Максимальное содержание кверцетина в варианте Л1 составило 2,172 мг/100 г. У взрослых растений содержание кверцетина было меньше на 24 % под Л2, а под Л3 на 30 % по сравнению с Л1. А добавление УФ-С снижало содержание данного флавоноида в вариантах Л1+УФ-С (на 24 %) и Л2+УФ-С (на 59 %), но добавление УФ-С к Л3 практически не повлияло на содержание кверцетина и составило 1,5 мг/100 г.

Ультрафиолет вызывает повреждение ДНК ядерного, хлоропластного, митохондриального, вызывая цепочечные разрывы и окислительные повреждения, происходящие при репликации ДНК. Соединениями, помогающими преодолеть негативное воздействие УФ, являются флавоноиды, так как они способны поглощать УФ-излучение. Накопление флавоноидов происходит в основном эпидермисе, а также в тканях, подвергшихся воздействию УФ. Флавоноиды

могут подвергаться гликозилированию, метилированию, гидроксилированию, ацилированию или пренилированию. Также флавоноиды флавоноиды обладают антиоксидантными свойствами [23]. Биосинтез флавоноидов контролирует фоторецептор UVR8. Он же отвечает за само восприятие ультрафиолетового облучения, так же регулирует различные физиологические процессы: передача сигналов ауксина, ингибирование роста гипокотиля, расширение семядолей, термогенез. UVR8 в виде гомодимера находится в цитозоле, а при воздействии УФ диссоциирует в мономер, перемещается в ядро и влияет на фотоморфогенный ген COP1 [24].

Добавление УФ-С излучения к основному спектру для увеличения содержания кверцетина в активно растущих растениях оказывает высокую способность растений стевии к синтезу защитных соединений и возможности использовать УФ спектр для обогащения флавоноидами. Но снижение и отсутствие реакции в синтезе кверцетина у взрослых растений говорит о сниженном уровне ассимиляции в ответной реакции на добавление УФ в уже развитых листьях стевии.

Таблица 3

**Содержание кверцетина в черенках и взрослых растениях стевии
в зависимости от облучения, мг/100 г**

The content of quercetin in cuttings and adult stevia plants, depending on irradiation, mg/100 g

Вариант освещения	Расчлененные растения, 74 дня от высадки	Расчлененные растения, 88 дней от высадки	Взрослые растения
Л1	0,316±0,011	0,714±0,112	2,172±0,18
Л1+УФ-С	0,594±0,153	1,086±0,153	1,635±0,124
Л2	0,251±0,023	0,412±0,057	1,646±0,213
Л2+УФ-С	0,569±0,045	1,153±0,253	0,667±0,054
Л3	0,52±0,062	0,768±0,074	1,504±0,341
Л3+УФ-С	0,712±0,071	1,147±0,215	1,539±0,314

В таблице 4, на рисунке 5 приведено количественное содержание суммы стевиогликозидов. Из приведенных данных видно, что в возрасте 74 дня относительное содержание увеличилось при добавлении УФ-С в варианте

Л1+УФ-С, а на 88-й день – под Л2+УФ-С и Л3+УФ-С, что говорит о преимущественно положительном действии добавления УФ-С спектра на накопление стевиогликозидов в листьях активно растущих побегов.

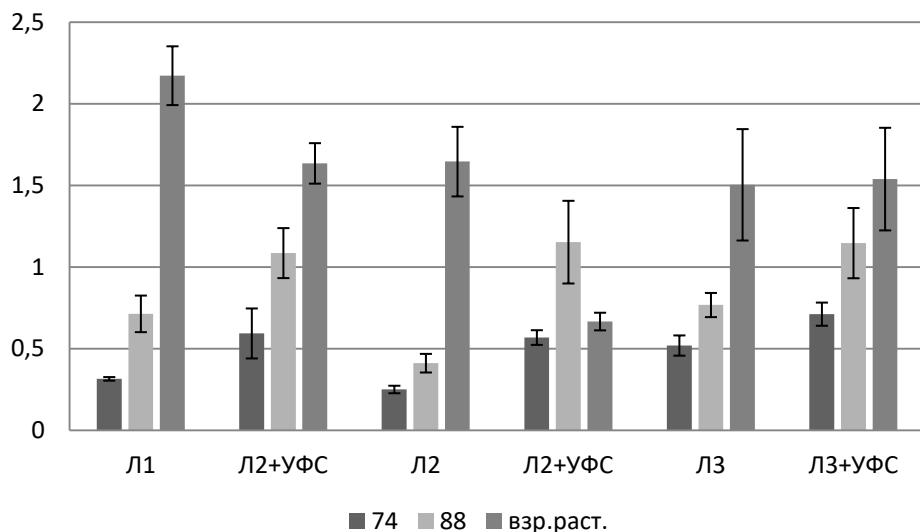


Рис. 4. Содержание кверцетина в черенках и взрослых растениях стевии
в зависимости от режима облучения, мг/100 г

The content of quercetin in cuttings and adult stevia plants, depending on irradiation, mg/100 g

Таблица 4

Содержание стевиолгликозидов в черенках и взрослых растениях стевии
в зависимости от облучения, %

The content of steviol glycosides in cuttings and adult stevia plants, depending on irradiation, %

Вариант освещения	74 дня	88 дней	Взрослые растения
Л1	1,51±0,08	1,98±0,10	2,23±0,11
Л1+УФ-С	1,82±0,09	1,76±0,09	4,02±0,20
Л2	1,64±0,08	1,85±0,09	4,32±0,22
Л2+УФ-С	1,59±0,08	1,99±0,10	5,00±0,25
Л3	1,85±0,09	1,88±0,09	4,02±0,20
Л3+УФ-С	1,82±0,09	2,16±0,11	4,09±0,20

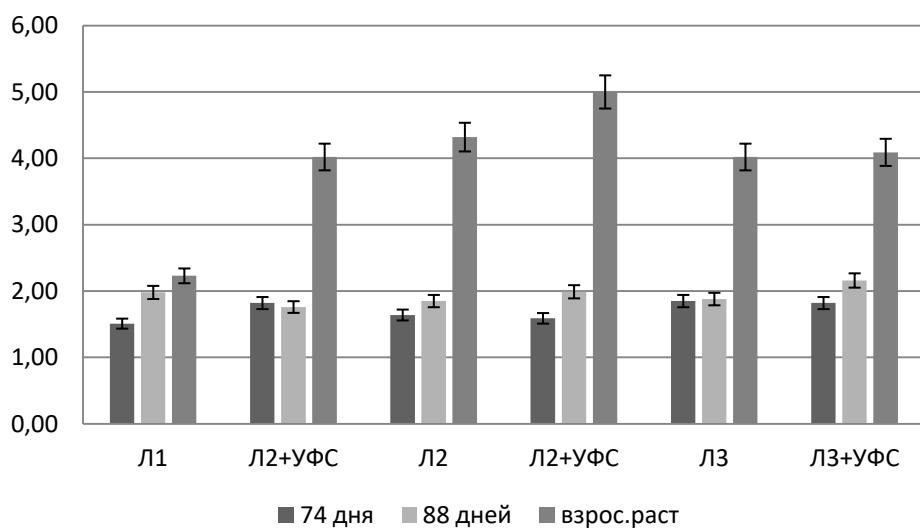


Рис. 5. Содержание стевиолгликозидов в черенках и взрослых растениях стевии
в зависимости от облучения, %

The content of steviol glycosides in cuttings and adult stevia plants, depending on irradiation, %

У взрослых растений минимальное содержание стевиолгликозидов наблюдали в варианте, наиболее близком к солнечному свету (Л1), оно составило 2,23 %. Добавление УФ-С спектра (Л1+УФ-С) увеличивало их количество почти в два раза и довело до 4 %. В варианте Л2+УФ-С по сравнению с Л2 содержание стевиолгликозидов было выше на 15 %. Но в Л3+УФ-С у взрослых растений, так же, как у черенков, на 74-й день разницу между вариантами выявить не удалось.

На сегодняшний день вопрос физиологических функций стевиольных гликозидов остается открытым. Значительные метаболические затраты на синтез стевиолгликозидов ставят под сомнение пользу, которую может получить *S. Rebaudiana*. Сходство молекулы стевиолгликозида с гибереллином подтверждается в стимулирующем действии на ряд культур при обработке экстрактами стевии, но эффект зависит от концентрации и окружающих условий среды, в частности, большое значение оказывает освещенность [25].

Повышение накопления стевиолгликозидов при добавлении в спектр УФ-С может усиливать защитные функции стевиолгликозидов в ответной реакции на травмирующее ультрафиолетовое облучение.

Заключение. Добавление к спектру фотосинтетически активной радиации УФ-С излучения повышает накопление кверцетина в активно развивающихся побегах из развивающихся черенков стевии и увеличивает сумму стевиолгликозидов при облучении взрослых растений. Добавленный к ФАР спектр УФ-С может использоваться в качестве экологически чистого фактора увеличения накопления вторичных метаболитов в доуборочной обработке растений стевии.

Благодарность: автор выражает признательность коллегам ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, руководителям лабораторий А.А. Смирнову, А.А. Дорохову, А.А. Гришину за разработку и производство камеры с экспериментальными условиями изучения.

Список источников

1. Ben-Yehoshua S., Mercier J. UV irradiation, biological agents, and natural compounds for controlling postharvest decay in fresh fruits and vegetables. In: *Environmentally friendly technologies for agricultural produce quality*. 2005. P. 265–299. DOI: 10.1201/9780203500361.sec2.
2. Le M., Xiao-Ming L. Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health // J. of the Science of Food and Agriculture. 2010. Vol. 90 (1). P. 2–12. DOI: 10.1002/jsfa.3785.
3. McCloud E., Berenbaum M. Stratospheric ozone depletion and plantinsect interactions: Effects of UVB radiation on foliage quality of *Citrus jambhiri* for *Trichoplusia ni* // J. Chem Ecol. 1994. Vol. 20 (3). P. 525–539. DOI: 10.1007/BF02059595.
4. Bijlsma R., Loeschke V. Environmental stress, adaptation and evolution: an overview // J. of Evolutionary Biology. 2005. Vol. 18 (4). P. 744–749. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2005.00962.x.
5. Teramura A. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth and yield of crop plants // J. Physiologia Plantarum. 1983. Vol. 58 (3). P. 415–427. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1983.tb04203.x.
6. Creelman R., Mullet J. Jasmonic acid distribution and action in plants: regulation during development and response to biotic and abiotic stress // Proc. Natl. Acad. Sci. 1995. Vol. 92 (10). P. 4114–4119. DOI: 10.1073/pnas.92. DOI 10.4114.
7. Eichholz I., Huyskens-Keil S., Keller A., et al. UV-B-induced changes of volatile metabolites and phenolic compounds in blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) // Food Chemistry. 2011. Vol. 126 (1). P. 60–64. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.10.071.
8. Pinto E. Phenolic compounds are dependent on cultivation conditions in face of UV-C radiation in 'Concord' grape juices (*Vitis labrusca*) // J. Food Science and Technology. 2021. Vol. 154 (2). DOI: 10.1016/j.jfst.2021.112681.
9. Dong B., Tang H., Zhu D., et al. Benzothiazole Treatment Regulates the Reactive Oxygen Species Metabolism and Phenylpropanoid Pathway of *Rosa roxburghii* Fruit to Delay Senescence During Low Temperature Storage // Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.753261.
10. Rozema J. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation // J. Trends in Ecology & Evolution. 1997. Vol. 12(1). P. 22–28. DOI: 10.1016/S0169-5347(96)10062-8.

11. McCloud E., Berenbaum M., Tuveson R.M., et al. Furanocoumarin content and phototoxicity of rough lemon (*Citrus jambhiri*) foliage exposed to enhanced ultraviolet-B (UVB) irradiation // J. Chem Ecol. 1992. Vol. 18 (7). P. 1125–1137. DOI: 10.1007/BF00980068.
12. Interdonato R., Rosa M., Nieva C., et al. Effects of low UV-B doses on the accumulation of UV-B absorbing compounds and total phenolics and carbohydrate metabolism in the peel of harvested lemons // Environmental and Experimental Botany. 2011. Vol. 70. P. 204–211. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.09.006.
13. Lydon J., Teramura A., Coffman B. UF-B radiation effects on photosynthesis, growth and cannabinoid production of two *cannabis sativa* chemotypes // Photochemistry and Photobiology. 1987. Vol. 46 (2). P. 201–206. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1987.tb04757.x.
14. Ghasemzadeh A. Improvement in Flavonoids and Phenolic Acids Production and Pharmaceutical Quality of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) by Ultraviolet-B Irradiation // Molecules. 2016. Vol. 21 (9). DOI: 10.3390/molecules21091203.
15. Charles M., Goulet A., Arul J. Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit: IV Biochemical modification of structural barriers // Postharvest Biology and Technology. 2008. Vol. 47 (1). P. 41–53. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.05.019.
16. Tevini M., Teramura A. Uv-b effects on terrestrial plants // J. Photochemistry and Photobiology. 1989. Vol. 50 (4). P. 479–487. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1989.tb05552.x.
17. Pluskota W., Michalczyk D., Górecki R. Control of phenylalanine ammonia-lyase gene promoters from pea by UV radiation // Acta Physiologiae Plantarum. 2005. Vol. 27 (2). P. 229–236. DOI: 10.1007/s11738-005-0027-1.
18. Semenova N., Ivanitskikh A., Uyutova N., et al. Effect of UV Stress on the Antioxidant Capacity, Photosynthetic Activity, Flavonoid and Steviol Glycoside Accumulation of *Stevia rebaudiana* Bertoni // Horticulturae. 2024. Vol. 10 (3). P. 210. DOI: 10.3390/horticulturae10030210.
19. Rozema J., Björn L., Bornman J., et al. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems—an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds // J. Photochem Photobiol. 2002. Vol. 66 (1). P. 2–12. DOI: 10.1016/s1011-1344(01)00269-x.
20. Yu G., Li W., Yuan Z., et al. The effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic and biochemical activities in super-high-yield hybrid rice Liangyoupeiji at the reproductive stage // J. Photosynthetica. 2013, Vol. 51 (1). P. 33–44. DOI: 10.1007/s11099-012-0081-z.
21. Lyubimov V. Dynamics of Reactivation of Rubisco Carboxylase Activity after Short-Term UV-Irradiation of Wheat Leaves // Russian Journal of Plant Physiology. 2024. Vol. 72 (103). DOI: 10.1134/S1021443725601387.
22. Bischof K., Kräbs G., Wiencke C., et al. Solar ultraviolet radiation affects the activity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase-oxygenase and the composition of photosynthetic and xanthophyll cycle pigments in the intertidal green alga *Ulva lactuca* L. // Planta An International Journal of Plant Biology. 2002. Vol. 215. P. 502–509 DOI: 10.1007/s00425-002-0774-9.
23. Ferreyra M., Serra P., Casati P. Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure // Plants & UVB Radiation. 2021. Vol. 173 (3). P. 736–749. DOI: 10.1111/ppl.13543.
24. Asik E., Kashif S., Oztas O. Plant tolerance mechanisms to DNA-damaging UV stress // J. of Experimental Botany. 2025. Vol. 272. DOI: 10.1093/jxb/eraf272.
25. Ceunen S., Geuns J. Steviol Glycosides: Chemical Diversity, Metabolism, and Function // J. Natural Products. 2013. Vol. 76. P. 1201–1228. DOI: 10.1021/np400203b.

References

1. Ben-Yehoshua S, Mercier J. UV irradiation, biological agents, and natural compounds for controlling postharvest decay in fresh fruits and vegetables. *Environmentally friendly technologies for agricultural produce quality*. 2005:265-299. DOI: 10.1201/9780203500361.sec2.
2. Le M, Xiao-Ming L. Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health. *J. of the Science of Food and Agriculture*. 2010. Vol. 90 (1). P. 2-12 DOI: 10.1002/jsfa.3785.

3. McCloud E, Berenbaum M. Stratospheric ozone depletion and plant-insect interactions: Effects of UV-B radiation on foliage quality of *Citrus jambhiri* for *Trichoplusia ni*. *J. Chem Ecol.* 1994;20(3):525-539. DOI: 10.1007/BF02059595.
4. Bijlsma R, Loeschke V. Environmental stress, adaptation and evolution: an overview. *J. of Evolutionary Biology.* 2005;18(4):744–749. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2005.00962.x
5. Teramura A. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth and yield of crop plants. *J. Physiologia Plantarum.* 1983;58(3):415-427. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1983.tb04203.x.
6. Creelman R, Mullet J. Jasmonic acid distribution and action in plants: regulation during development and response to biotic and abiotic stress. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1995;92(10):4114-4119. DOI: 10.1073/pnas.92. DOI 10.4114.
7. Eichholz I, Huyskens-Keil S, Keller A, et al. UV-B-induced changes of volatile metabolites and phenolic compounds in blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chemistry.* 2011;126(1):60-64. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.10.071.
8. Pinto E. Phenolic compounds are dependent on cultivation conditions in face of UV-C radiation in 'Concord' grape juices (*Vitis labrusca*). *J. Food Science and Technology.* 2021;154(2). DOI: 10.1016/j.jfst.2021.112681.
9. Dong B, Tang H, Zhu D, et al. Benzothiazole Treatment Regulates the Reactive Oxygen Species Metabolism and Phenylpropanoid Pathway of *Rosa roxburghii* Fruit to Delay Senescence During Low Temperature Storage. *Front Plant Sci.* 2021;12. DOI: 10.3389/fpls.2021.753261.
10. Rozema J. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *J. Trends in Ecology & Evolution.* 1997;12(1):22-28. DOI: 10.1016/S0169-5347(96)10062-8.
11. McCloud E, Berenbaum M, Tuveson R. Furanocoumarin content and phototoxicity of rough lemon (*Citrus jambhiri*) foliage exposed to enhanced ultraviolet-B (UVB) irradiation. *J. Chem Ecol.* 1992;18(7):1125-1137. DOI: 10.1007/BF00980068.
12. Interdonato R, Rosa M, Nieva C, et al. Effects of low UV-B doses on the accumulation of UV-B absorbing compounds and total phenolics and carbohydrate metabolism in the peel of harvested lemons. *Environmental and Experimental Botany.* 2011;70(2-3):204-211. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.09.006.
13. Lydon J, Teramura A, Coffman B. UV-B radiation effects on photosynthesis, growth and cannabinoid production of two *cannabis sativa* chemotypes. *Photochemistry and Photobiology.* 1987;46(2):201-206. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1987.tb04757.x.
14. Ghasemzadeh A. Improvement in Flavonoids and Phenolic Acids Production and Pharmaceutical Quality of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) by Ultraviolet-B Irradiation. *Molecules.* 2016;21(9). DOI: 10.3390/molecules21091203.
15. Charles M, Goulet A, Arul J. Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit: IV Biochemical modification of structural barriers. *Postharvest Biology and Technology.* 2008;47(1):41-53. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.05.019.
16. Tevini M, Teramura A. Uv-b effects on terrestrial plants. *J. Photochemistry and Photobiology.* 1989;50(4):479-487. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1989.tb05552.x.
17. Pluskota W, Michalczuk D, Górecki R. Control of phenylalanine ammonia-lyase gene promoters from pea by UV radiation. *Acta Physiologiae Plantarum.* 2005;27(2):229-236. DOI: 10.1007/s11738-005-0027-1.
18. Semenova N, Ivanitskikh A, Uyutova N, et al. Effect of UV Stress on the Antioxidant Capacity, Photosynthetic Activity, Flavonoid and Steviol Glycoside Accumulation of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Horticulturae.* 2024;10(3):210. DOI: 10.3390/horticulturae10030210.
19. Rozema J, Björn L, Bornman J, et al. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems—an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *J. Photochem Photobiol.* 2002;66(1):2-12. DOI: 10.1016/s1011-1344(01)00269-x.
20. Yu G, Li W, Yuan Z, et al. The effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic and biochemical activities in super-high-yield hybrid rice Liangyoupeijiu at the reproductive stage. *J. Photosynthetica.* 2013;51(1):33-44. DOI: 10.1007/s11099-012-0081-z.

21. Lyubimov V. Dynamics of Reactivation of Rubisco Carboxylase Activity after Short-Term UV-Irradiation of Wheat Leaves. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2024;72(103). DOI: 10.1134/S1021443725601387.
22. Bischof K, Kräbs G, Wiencke C, et al. Solar ultraviolet radiation affects the activity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase-oxygenase and the composition of photosynthetic and xanthophyll cycle pigments in the intertidal green alga *Ulva lactuca* L. *Planta An International Journal of Plant Biology*. 2002;215:502-509. DOI: 10.1007/s00425-002-0774-9.
23. Ferreyra M, Serra P, Casati P. Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. *Plants & UVB Radiation*. 2021;173(3):736-749. DOI: 10.1111/ppl.13543.
24. Asik E, Kashif S, Oztas O. Plant tolerance mechanisms to DNA-damaging UV stress. *J. of Experimental Botany*. 2025;272. DOI: 10.1093/jxb/eraf272.
25. Ceunen S, Geuns J. Steviol Glycosides: Chemical Diversity, Metabolism, and Function. *J. Natural Products*. 2013;76:1201-1228. DOI: 10.1021/np400203b.

Статья принята к публикации 06.10.2025 / The article accepted for publication 06.10.2025.

Информация об авторах:

Алина Сергеевна Иваницких, младший научный сотрудник, соискатель кафедры овощеводства
Иван Германович Тараканов, профессор кафедры физиологии растений, доктор биологических наук

Information about the authors:

Alina Sergeevna Ivanitskikh, Junior Researcher, Applicant for a degree at the Department of Vegetable Growing

Ivan Germanovich Tarakanov, Professor at the Department of Plant Physiology, Doctor of Biological Sciences

