

ПРИМЕНЕНИЕ ЯНТАРНОЙ КИСЛОТЫ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

А. А. ЗМУШКО, Т. А. КРАСИНСКАЯ

РУП «Институт плодоводства»,
ул. Ковалёва, 2, аг. Самохваловичи, Минский район, 223013, Беларусь,
e-mail: belhort@it.org.by

АННОТАЦИЯ

Янтарная кислота – универсальный промежуточный метаболит цикла Кребса. Она имеет два основных эффекта на растения. Первый – стимулирующий (повышение урожайности), второй – защитное влияние на растения, подвергнутые действию различных стрессоров. Янтарная кислота используется для предпосевной обработки семян и вегетирующих растений. Использование небольших доз (10 мг/л) янтарной кислоты переводит энергетический обмен в растениях в новое стационарное состояние, в котором метаболические процессы протекают интенсивнее. Янтарная кислота применяется и в культуре *in vitro*: на этапах пролиферации, укоренения и адаптации к условиям *ex vitro*. Отмечено, что янтарная кислота способствует усилению облиственности, улучшает общее состояние микропоголов, снижает уровень витрификации и хлороз тканей. Янтарная кислота может облегчать прохождение растениями этапа адаптации *ex vitro*.

Ключевые слова: янтарная кислота, ризогенез, культура *in vitro*, адаптация к условиям *ex vitro*.

Янтарная кислота в традиционном растениеводстве. Янтарная кислота – универсальный промежуточный метаболит цикла трикарбоновых и дикарбоновых кислот (цикла Г. А. Кребса), образующийся путем окислительного декарбоксилирования из α -кетоглютаровой (щавелевоуксусной) кислоты [1].

Она имеет два основных эффекта на растения. Первый – стимулирующий (повышение урожайности) [2–4], второй – защитное влияние на растения, подвергнутые действию различных стрессоров [5, 6]. При применении янтарной кислоты происходит увеличение прироста биомассы проростков пшеницы, картофеля, огурцов, валерианы, стимулируется рост корневой системы, улучшаются всхожесть и урожайность. Использование небольших доз (10 мг/л) янтарной кислоты переводит энергетический обмен в растениях в новое стационарное состояние, в котором метаболические процессы протекают интенсивнее [2–4].

Янтарная кислота и ее соли являются одним из доступных по соотношению цена/качество регуляторов роста для предпосевной обработки семян и вегетирующих растений [7].

Передозировка янтарной кислотой не опасна, поскольку ее избыток используется растением и микроорганизмами как продукт питания. Препарат стабилизирует жизнедеятельность естественной микрофлоры почвы, что особенно важно для восстановления плодородия и очистки участков, загрязненных токсичными органическими веществами [8].

Под воздействием растений и живых клеток препарат разлагается на воду и углекислый газ, т. е. идеально и экологически чисто утилизируется [8].

Обработка семян. Перспективным подходом к контролю над болезнями растений является иммунизация на ранних стадиях онтогенеза, которая позволяет с самого начала развития индуцировать в растениях достаточно высокий уровень неспецифической устойчивости [9].

Один из самых важных периодов в жизни любого растения – это первые 15–20 сут после посева. Воздействуя на растения в этой стадии онтогенеза или до посева путем обработки семян определенными биологически активными веществами, можно индуцировать изменение их метаболизма в сторону, неблагоприятную для патогенов. Исследователи указывают на достаточно широкое антистрессовое свойство возникающей устойчивости. В результате у растений повышается не только иммунитет к патогенам, но и выносливость к засухе, холоду, перепадам температуры, ускоряется заживление ран. Таким образом, применение иммунокорректоров основано не на подавлении фитопатогенов, а на повышении общего адаптивного иммунного потенциала растений [9].

Имеется достаточно данных в отношении ростостимулирующей активности янтарной кислоты и ее производных при обработке семян, что, в свою очередь, повышает энергию прорастания и всхожесть [1, 10]. Янтарная кислота легко всасывается при замачивании семян. Предпосевная обработка семян янтарной кислотой в концентрации 10^{-3} М стабильно повышает урожай различных культур на 20–30 % [8].

По данным Н. А. Дроздова [11], предпосевная обработка семян зерновых культур раствором янтарной кислоты повышает всхожесть, увеличивает число продуктивных стеблей, число зерен в колосе, массу зерна. Как указывает А. А. Барбарян [12], благодаря обработке семян стимуляторами роста на основе янтарной кислоты на 3–4 дня ускоряется появление всходов и на 2,5–13,2 % повышается полевая всхожесть семян [10, 12].

Ю. Е. Андрианова и др. изучали влияние предпосевной обработки семян янтарной кислотой на величину и качество урожая пшеницы, капусты, свеклы, лука и амаранта. Было обнаружено, что янтарная кислота повышает урожай за счет усиления ростовых процессов и практически не изменяет качество продукции, за исключением свеклы (сахаристость свеклы столовой «Бордо» повышается на 1,7%) [5].

Установлена возможность использования растворов янтарной кислоты для активации процесса прорастания зерна амаранта [1].

Обработка вегетирующих растений. Янтарная кислота используется и для обработки вегетирующих растений. Е. Н. Гущина и Л. Д. Шаманская указывают, что применение янтарной кислоты в качестве стимулятора роста при размножении облепихи сорта Алтайская зелеными черенками обеспечивает увеличение выхода саженцев и повышение их качества [13]. С. Л. Белопуховым было показано, что обработка янтарной кислотой в концентрации 10^{-4} ... 10^{-1} М растений льна-долгунца сорта Могилевский при их высоте 3–12 см оказывала ростстимулирующее действие и приводила к повышению качества волокна [7].

Стимуляция ризогенеза. А. Л. Верещагин и др. изучали ризогенную активность растворов янтарной кислоты с концентрацией 10^{-11} М в сочетании с ультразвуковым облучением с частотой 22 кГц в ультразвуковом аппарате «Волна» на одревесневших черенках винограда сорта «Амирхан». Полученные данные свидетельствовали о весьма существенном стимулировании ростовых процессов массы корней черенков винограда до 300 % по сравнению с контролем при увеличении скорости роста побегов до 1500–1700 % [14].

Использование смесей с включением янтарной кислоты. В практике растениеводства с целью повышения устойчивости и продуктивности культур все большее внимание уделяется многокомпонентным препаратам [15].

Янтарная кислота входит в состав жидкого микроудобрения Наномикс – водорастворимый комплекс органически связанных хелатированных микроэлементов Fe, Mn, Zn, Cu, Co, B, Mo (Mg, Ca, S) с добавкой природных «энергетических» кислот (янтарной, яблочной, винной и лимонной) и их биологически активных производных (сукцинатов, малатов, тартратов и цитратов) [16].

С. Л. Белопухов, А. В. Захаренко отмечали, что янтарная кислота включалась в состав защитно-стимулирующих комплексов, которые увеличивали продуктивность льна-долгунца [17].

Препараты на основе хитозана. Янтарная кислота также используется в препаратах на основе хитозана. Это вещество индуцирует в растении жасмонатный и салицилатный пути образования антипатогенных веществ, т. е. является индуктором устойчивости растений к болезням [9]. Применение биологического удобрения с гуминовыми веществами в комплексе с адаптогеном сукцинатом хитозана увеличило урожайность листовых салатов для сортов: Лолло Росса – на 17,6 %, Эвридика – на 14,7; Рубин – на 31,9, Шоколадный лист – на 45,0, Барбадос – на 21,7 % [18].

Отсутствие стимулирующего эффекта. Данные о ростстимулирующих свойствах янтарной кислоты не всегда подтверждались. Это может объясняться рядом причин.

Во-первых, обычно при синтезе янтарной кислоты в качестве катализаторов использовали соли тяжелых металлов. В результате препараты янтарной кислоты содержали примеси тяжелых металлов, нивелирующих ростстимулирующие эффекты янтарной кислоты [5].

Во-вторых, пространственное расположение карбонильных групп существенным образом сказывается на биологической активности препаратов янтарной кислоты. Трансоидные конфор-

меры янтарной кислоты более активны, чем скошенные конформеры [14]. Следовательно, важно подбирать такое разведение янтарной кислоты, чтобы в растворе преобладали трансoidные конформеры. Влияние разведения отчетливо видно в опыте А. Л. Верещагина и др. При предпосевной обработке семян редиса сорта «Жара» янтарной кислотой в концентрации 10^{-7} М была получена урожайность в 173 % (к контролю), а в концентрации 10^{-15} М – 350 % (к контролю) [14].

В третьих, отчетливое влияние на реакцию растения на янтарную кислоту оказывает его генотип. Эффект от применения янтарной кислоты может быть неоднозначным. Например, стимулирующий эффект производных янтарной кислоты (сукцинатов) на урожайность озимой пшеницы зависел от способа их применения, дозы и восприимчивости сорта. Л. А. Кононенко и др. изучали влияние отходов фармацевтической промышленности, содержащих высокие концентрации производных янтарной кислоты (сукцинат-иона – 5,75 %), на продуктивность озимой пшеницы. Было установлено, что применяемые типы обработки сукцинатами отрицательно влияли на урожайность растений сорта Остистое Белогорье. Сорта Звонница, Чураевка и Московская 39 положительно реагировали только на внесение препарата в почву. При этом увеличение урожайности по данным сортам произошло на 10, 5 и 4 % соответственно. Сорт Элвис оказался чувствительным только к предпосевной обработке семян [19].

Янтарная кислота в культуре *in vitro*. Развитие безвирусного питомниководства неразрывно связано с применением биотехнологических приемов для производства посадочного материала. В частности, используется метод микроразмножения растений [20].

Используемые в культуре *in vitro* регуляторы роста – это дорогостоящие синтезированные вещества. Кроме того, они являются токсически опасными веществами для человека: ГК умеренно опасна, бензиладенин (БА) токсичен [20].

Янтарная кислота применяется на таких стадиях клонального микроразмножения, как этап собственно микроразмножения, этап ризогенеза и этап адаптации растений к условиям *ex vitro*.

Этап микроразмножения.

Вытягивание микропобегов. Л. Л. Бунцевич, Е. Н. Беседина, М. А. Костюк установили, что сукцинат калия и сукцинат натрия в концентрации 4 мг/л стимулируют линейный рост (вытягивание) микропобегов эксплантов сливы сорта Стенли *in vitro* [21]. М. А. Винтер утверждает, что препараты группы янтарной кислоты заметно повышают выход микропобегов сливы длиной более 15 мм, что позволяет использовать данные вещества на этапе, предшествующем ризогенезу, для получения побегов длиной более 15–20 мм, укоренение которых проходит более эффективно [20].

Облиственность. Одной из основных характеристик ростовых процессов является формирование облиственности, важной для микрорастения как аппарат фотосинтеза, с учетом пазушных почек, формирующихся в основании каждого листа, в качестве потенциала последующего побегообразования. Л. Л. Бунцевич, Е. Н. Беседина, М. А. Костюк установили, что янтарная кислота при добавлении в питательную среду способствует развитию существенно большего числа листьев (в среднем 7,7 шт.) у эксплантов сливы сорта Стенли *in vitro* по сравнению с БА (6,3 шт., НСР 0,8) [21]. М. А. Винтер также утверждает, что добавление в питательную среду янтарной кислоты в концентрации 4 мг/л способствовало увеличению количества листьев на микропобегах сливы домашней на 32–37 % [20].

Общее состояние микропобегов. Использование БАВ на основе янтарной кислоты оказывает положительное влияние на общее состояние микропобегов сливы домашней, растения имеют более насыщенную зеленую окраску [20]. На средах с препаратами сукцинат натрия, сукцинат калия, янтарная кислота развиваются здоровые, крупные, интенсивно окрашенные микропобеги сливы, превосходящие по морфометрическим параметрам контроль (среда с БА – 1 мг/л, ИМК – 0,1, ГК – 0,5 мг/л). Препараты сукцинат натрия, сукцинат калия, янтарная кислота в концентрации 4,0 мг/л проявили себя как регуляторы роста, благоприятно влияющие на регенерацию эксплантов и качественное состояние микропобегов сливы [22].

Хлороз. Одним из негативных следствий некомплементарности питательных сред и эксплантов является хлороз тканей. Л. Л. Бунцевич, Е. Н. Беседина, М. А. Костюк отмечали, что при добавлении в питательную среду янтарной кислоты (4 мг/л) количество хлорозировавших побе-

гов существенно снижается и составляет только 5 %. При сочетании одного пассажа с янтарной кислотой и следующего пассажа с БА хлоротичные побеги отсутствуют вовсе [21]. М. А. Винтер также отмечает, что при использовании БАВ группы янтарной кислоты уровень хлороза ниже, чем в стандартном варианте [20].

Витрификация. Отмечается, что янтарная кислота, сукцинат калия и сукцинат натрия улучшают общее состояние микропобегов, в том числе снижают уровень витрификации тканей микропобегов [21]. М. А. Винтер утверждает, что на питательных средах с янтарной кислотой, сукцинатами калия и натрия витрификация тканей микропобегов эксплантов сливы отсутствовала полностью, тогда как в стандартном варианте (БА – 1 мг/л, ГК – 0,5 мг/л) появлялись витрифицированные побеги [20].

Этап укоренения. На этапе ризогенеза микропобегов сливы домашней БАВ группы янтарной кислоты вводились в питательную среду $\frac{1}{2}$ Мурасиге–Скуга в концентрации 4 мг/л дополнительно к стандартно используемой ИМК – 0,5 мг/л. Установлено, что сукцинат натрия в концентрации 4 мг/л оказывает положительное влияние на эффективность ризогенеза сливы, укореняемость побегов увеличивается на 6–13 %, повышается количество корней на 8–18 %, их суммарная длина увеличивается на 8–26 % [20].

Этап адаптации *ex vitro*. Этап адаптации к условиям *ex vitro* – стрессовый для растений. Можно предположить, что обработка растений янтарной кислотой (миметиком салициловой) должна облегчать прохождение данного этапа, так как салициловая кислота усиливает устойчивость растений к ряду физиологических стрессов [23, 24]. Было действительно показано, что янтарная кислота может облегчать прохождение растениями этапа адаптации *ex vitro*.

А. В. Кильчевский и др. отмечают, что добавление янтарной кислоты в среду для ризогенеза в условиях *in vitro* в концентрации 0,01 и 0,05 мг/л способствовало повышению приживаемости растений вишни и земляники садовой при переносе в нестерильные условия [25]. Т. А. Красинской, Н. В. Кухарчик, В. В. Матусевичем было отмечено позитивное влияние и поствливание янтарной кислоты, внесенной непосредственно в субстрат для адаптации, на адаптационные процессы растений рода *Prunus* L. [26, 27].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмалько, Н. А. Биохимические процессы при проращивании зерна амаранта / Н. А. Шмалько // Вестн. Куб. гос. технол. ун-та. – 1997. – № 2. – С. 42–56.
2. Никитина, Е. В. Янтарная кислота и ее соли как индивидуальные антиоксиданты и генопротекторы / Е. В. Никитина, Н. К. Романова // Вестн. Казанского технол. ун-та. – 2010. – № 10. – С. 375–381.
3. Влияние янтарной кислоты на продуктивность сельскохозяйственных растений и рост биотехнологически ценных культур / Ю. Е. Андрианова [и др.] // Янтарная кислота в медицине, пищевой промышленности, сельском хозяйстве : сб. науч. ст. / Пушин. науч. центр Рос. акад. наук [и др.] ; науч. ред. М. Н. Кондрашова [и др.]. – Пушино, 1997. – С. 219–231.
4. Влияние янтарной кислоты на некоторые фотосинтетические и продукционные процессы в растениях гороха / И. М. Карташов [и др.] // Янтарная кислота в медицине, пищевой промышленности, сельском хозяйстве : сб. науч. ст. / Пушин. науч. центр Рос. акад. наук [и др.] ; науч. ред. М. Н. Кондрашова [и др.]. – Пушино, 1997. – С. 240–245.
5. Влияние янтарной кислоты на урожай и качество сельскохозяйственных культур / Ю. Е. Андрианова [и др.] // Агрехимия. – 1996. – № 8/9. – С. 117–122.
6. Янтарная кислота – миметик салициловой кислоты / И. А. Тарчевский [и др.] // Физиология растений. – 1999. – Т. 46, № 1. – С. 23–28.
7. Белопухов, С. Л. Влияние янтарной кислоты на качество волокна льна-долгунца / С. Л. Белопухов // Агрехимия. – 2005. – № 3. – С. 60–66.
8. Верещагин, А. Л. Применение интермедиатов цикла Кребса / А. Л. Верещагин, В. В. Кропоткина // Влияние сверхмалых доз интермедиатов цикла Кребса на рост и развитие ряда двудольных растений / А. Л. Верещагин, В. В. Кропоткина ; Федеральное агентство по образованию, Бийский технол. ин-т, Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Бийск, 2010. – Гл. 1, § 2. – С. 11–22.
9. Поликсенова, В. Д. Индуцированная устойчивость растений к патогенам и абиотическим стрессовым факторам (на примере томата) / В. Д. Поликсенова // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2009. – № 1. – С. 48–60.
10. Влияние производных янтарной кислоты на содержание белка в зерне у различных сортов озимой пшеницы / Л. А. Кононенко [и др.] // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 3. – С. 46–50.
11. Дроздов, Н. А. Применение янтарной кислоты на посевах зерновых / Н. А. Дроздов, И. М. Соколовский // Бюл. Гл. бот. сада. – 1970. – Вып. 77. – С. 49–53.

12. Барбарян, А. А. Изучение стимулирующего действия химических препаратов на урожай и качество семян озимой пшеницы в условиях Араратской равнины : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.05 / А. А. Барбарян. – Эчмиадзин, 1983. – 16 с.
13. Гущина, Е. Н. Использование янтарной кислоты в качестве стимулятора роста при выращивании саженцев облепихи / Е. Н. Гущина, Л. Д. Шаманская // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 7. – С. 12–14.
14. Биологическая активность сверхмалых концентраций ряда природных органических кислот – интермедиатов цикла Кребса / А. Л. Верещагин [и др.] // Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнология. – 2012. – № 2 (3). – С. 72–75.
15. Влияние микроудобрения реаком, салициловой и янтарной кислот на адаптацию растений проса к неблагоприятным условиям среды / Т. О. Ястреб [и др.] // Агробиология. – 2012. – № 4. – С. 60–67.
16. Турганбаев, Т. А. Влияние подкормки микроудобрениями на продуктивность льна масличного в сухостепном Приуралье / Т. А. Турганбаев, Т. Е. Адильханова, А. Р. Зейнешева // Вавиловские чтения – 2014 : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 127-й годовщине со дня рожд. акад. Н. И. Вавилова, Саратов, 25–27 нояб. 2014 г. / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова ; редкол.: Н. И. Кузнецов [и др.]. – Саратов, 2014. – С. 216–219.
17. Белопухов, С. Л. Роль защитно-стимулирующих комплексов в льноводстве / С. Л. Белопухов, А. В. Захаренко // Достижения науки и техники АПК. – 2008. – № 9. – С. 27–28.
18. Панин, С. И. Выращивание листовых салатов с применением биологических стимуляторов роста и развития / С. И. Панин // Проблемы и перспективы инновационного развития агротехнологий : материалы XX Междунар. науч.-произв. конф., Белгород, 23–25 мая 2016 г. / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Департ. науч.-технол. политики и образования ; Белгород. гос. аграр. ун-т им. В. Я. Горина. – Белгород, 2016. – Т. 1. – С. 45–46.
19. Влияние производных янтарной кислоты на продуктивность озимой пшеницы / Л. А. Кононенко [и др.] // Зерновое хоз-во России. – 2010. – № 3 (9). – С. 9–12.
20. Винтер, М. А. Совершенствование приемов оздоровления и клонального микроразмножения сливы домашней на основе оценки адаптивного потенциала сортов : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.08 / М. А. Винтер. – Краснодар, 2018. – 170 с.
21. Бунцевич, Л. Л. Изучение препарата Л-1, янтарной кислоты и ее солей в качестве стимуляторов роста эксплантов растений *in vitro* / Л. Л. Бунцевич, Е. Н. Беседина, М. А. Костюк // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности // АПК – продукты здорового питания. – 2015. – № 4. – С. 64–69.
22. Воздействие ранее не применявшихся в клональном микроразмножении регуляторов роста на микропобеги сливы *in vitro* / Л. Л. Бунцевич [и др.] // Науч. журн. Кубанского гос. агр. ун-та. – 2016. – № 115 (01). – С. 1–8.
23. Тютюрев, С. Л. Экологически безопасные индукторы устойчивости растений к болезням и физиологическим стрессам / С. Л. Тютюрев // Вестн. защиты растений. – 2015. – № 1 (83). – С. 3–13.
24. Horváth, E. Induction of Abiotic Stress Tolerance by Salicylic Acid Signaling / E. Horváth, G. Szalai, T. Janda // J. of Plant Growth Regulation. – 2007. – Vol. 26, Iss. 3. – P. 290–300.
25. Кильчевский, А. В. Использование регуляторов роста-адаптагенов при переносе микрорастений земляники и вишни в условиях *in vivo* / А. В. Кильчевский, Т. В. Никонович, В. В. Французенок // Актуальные проблемы генетики : материалы 2-й конф. Моск. об-ва генетиков и селекционеров им. Н. И. Вавилова, Москва, 20–21 фев. 2003 г. – М., 2003. – Т. 2. – С. 135–136.
26. Красинская, Т. А. Янтарная кислота – адаптоген к условиям *ex vitro* при адаптации растений рода *Prunus* Mill. / Т. А. Красинская // Radostim 2011. Фитогормоны, гуминовые вещества и другие биорациональные пестициды в сельском хозяйстве. Конференция молодых ученых : сб. материалов 7-й Междунар. конф., Минск, 2–4 нояб. 2011 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т биоорг. химии. – Минск, 2011. – С. 96–99.
27. Krasinskaya, T. The Effect of ion exchange substrate and succinic acid on *ex vitro* adaptation of the cherry rootstock 'VSL-2' (*Prunus fruticosa* Pall. × *P. lannesiana* Carr.) / Т. Krasinskaya, N. Koukhartchik, V. Matushevich // Acta Horticulturae. – 2008. – Vol. 795, № 1. – P. 401–408.

APPLICATION OF SUCCINIC ACID IN CROP GROWING

A. A. ZMUSHKO, T. A. KRASINSKAYA

Summary

Succinic acid is a universal intermediate metabolite in the Krebs cycle. It has two main effects on plants. The first is stimulation (increased yield), the second is a protective effect on plants exposed to various stressors. Succinic acid is used for presowing treatment of seeds and vegetative plants. The use of low doses (10 mg/l) of succinic acid transforms the metabolism in plants into a new stationary state where metabolic processes proceed more intensively. Succinic acid is also used *in vitro* at the stages of proliferation, rooting and adaptation to *ex vitro* conditions. It is noted that succinic acid contributes to the strengthening of foliage, improves the health of micro shoots, reduces the level of vitrification and tissue chlorosis. Succinic acid can facilitate the *ex vitro* adaptation phase of plants.

Keywords: succinic acid, rhizogenesis, *in vitro*, adaptation to *ex vitro* conditions.

Поступила в редакцию 10.06.2019 г.