

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ МЕТИЛЖАСМОНАТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА, ПОДВЕРГНУТЫХ ДЕЙСТВИЮ НИЗКОЙ ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

А. А. Игнатенко, В. В. Таланова, Н. С. Репкина, А. Ф. Титов

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Изучено влияние экзогенного метилжасмоната (МЖ) на растения огурца (*Cucumis sativus* L.), подвергнутые 3-суточному воздействию температуры 4 °С. Показано, что температура 4 °С оказывает на проростки повреждающий эффект, вызывая значительное увеличение выхода электролитов и необратимое ингибирование ростовых процессов. Одновременно с этим в листьях проростков отмечено усиление перекисного окисления липидов, регистрируемое по накоплению малонового диальдегида (МДА). Обработка растений МЖ (1 мкМ), проведенная за сутки до начала холодного воздействия, оказывала защитное действие, о чем, в частности, свидетельствовало снижение уровня МДА в листьях. Кроме того, на протяжении всего периода воздействия на растения холода в этом варианте опыта зафиксирован существенно меньший выход электролитов из тканей листьев, а их размеры у обработанных МЖ проростков превышали таковые в варианте с воздействием холода без предобработки МЖ. Сделан вывод, что МЖ способен снижать негативный эффект низкой повреждающей температуры на растения, и обсуждаются некоторые возможные механизмы его защитного действия.

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; метилжасмонат; низкая повреждающая температура; выход электролитов; рост; малоновый диальдегид.

A. A. Ignatenko, V. V. Talanova, N. S. Repkina, A. F. Titov. METHYL JASMONATE EFFECT ON THE TOLERANCE OF CUCUMBER PLANTS EXPOSED TO LOW DAMAGING TEMPERATURE

The effect of exogenous methyl jasmonate (MJ) on cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) exposed for 3 days to 4 °C was studied. It was shown that a temperature of 4 °C has a damaging effect on seedlings, causing a significant increase in electrolyte leakage and irreversible inhibition of growth processes. Along with this, an increase in lipid peroxidation was observed in the leaves of the seedlings, as indicated by the accumulation of malondialdehyde (MDA). MJ treatment (1 μM) of plants one day before the onset of cold exposure had a protective effect evidenced, in particular, by a decrease in the MDA level in the leaves. In addition, the leakage of electrolytes from leaf tissues in this case was

significantly lower throughout the entire period of exposure to cold, and leaf sizes in seedlings treated with MJ exceeded those in the variant with exposure to cold without MJ pretreatment. It is concluded that MJ can reduce the detrimental effect of low damaging temperature on plants, and the possible mechanisms of this protective effect are briefly discussed.

Key words: *Cucumis sativus* L.; methyl jasmonate; low damaging temperature; electrolyte leakage; growth; malondialdehyde.

Введение

Жасмоновую кислоту (ЖК) и ее производные, в частности метилжасмонат (МЖ), относят к эндогенным регуляторам роста и развития растений [Тарчевский, 2002; Васюкова, Озерцовская, 2009; Wasternack, 2014]. Жасмонаты синтезируются по оксипиноловому пути и обнаружены практически во всех органах растений [Dar et al., 2015]. К настоящему времени установлено их участие в регуляции таких процессов, как цветение, созревание плодов, формирование луковиц, клубней и корнеклубней, рост корней, движение листьев, накопление антоцианов и образование этилена, запуск программы старения и др. [Васюкова, Озерцовская, 2009; Wasternack, 2014; Per et al., 2018]. Обнаружено также, что жасмонаты участвуют в активизации защитных реакций при повреждении растений фитофагами и инфицировании некротрофными патогенами [Wasternack, 2014; Dar et al., 2015]. Выявлено, что протекторное действие ЖК и ее производных в этом случае обусловлено индуцированным под их влиянием синтезом широкого спектра защитных соединений, таких как ингибиторы протеиназ и трипсина, дефензины, лектины, тионины, фитоалексины, экстенсины, алкалоиды, фенольные соединения и др. [Тарчевский, 2002; Samota et al., 2017].

В последние годы обнаружено положительное влияние экзогенных жасмонатов на устойчивость растений, подвергнутых действию неблагоприятных факторов абиотической природы, включая низкие температуры [Hu et al., 2013; Shahzad et al., 2015; Per et al., 2018]. Однако их участие в повышении холодоустойчивости исследовано главным образом на плодах растений. В частности, появились сведения о положительном влиянии экзогенной ЖК и ее производных на состояние плодов в условиях их низкотемпературного (в особенности длительного) хранения. Так, показано существенное снижение степени холодового повреждения плодов томата [Min et al., 2018], лимона [Siboza et al., 2014], манго [González-Aguilar et al., 2000], граната [Sayyari et al., 2011], абрикоса [Ezzat

et al., 2017], банана [Zhao et al., 2013] и др. в результате их обработки жасмонатами. В гораздо меньшей степени исследовано участие жасмонатов в ответной реакции интактных растений на низкотемпературные воздействия [Li et al., 2012; Hu et al., 2013; Saydpour, Sayyari, 2016]. Остается также открытым вопрос относительно механизмов защитного действия этих фитогормонов и их соотносительного вклада в процесс низкотемпературной адаптации растений.

Цель данного исследования заключалась в изучении влияния экзогенного МЖ на реакцию типичного представителя теплолюбивых растений огурца *Cucumis sativus* L. на действие низкой положительной температуры (4 °С), которая при продолжительном (сутки и более) воздействии оказывает на него повреждающий эффект.

Материалы и методы

Опыты проводили на проростках *Cucumis sativus* L. гибрида F1 Зозуля. Растения выращивали в рулонах фильтровальной бумаги в течение 7 сут на модифицированном питательном растворе Кнопа, содержащем 3,15 мМ NH₄NO₃, 1,55 мМ KH₂PO₄, 1,55 мМ MgSO₄, 24 мкМ H₃BO₃, 21 мкМ FeC₆H₅O₇, 10 мкМ MnSO₄, 3,1 мкМ CuSO₄, 2,55 мкМ (NH₄)₂MoO₄, 1,55 мкМ ZnSO₄ и 5 мМ Ca(OH)₂, pH 6,2–6,4, в контролируемых условиях при температуре воздуха 22 °С, его относительной влажности 60–70 %, освещенности ФАР 180 мкмоль/м²·с и фотопериоде 14 ч. По достижении недельного возраста растения в рулонах фильтровальной бумаги помещали на раствор МЖ (Sigma-Aldrich, США) и через 1 сут подвергали действию температуры 4 °С в камере искусственного климата (БКШ-73, Россия), сохраняя прочие условия неизменными. Выбор температуры и продолжительности (3 сут) ее действия был сделан на основании результатов предыдущих исследований [Титов и др., 2006]. Концентрация МЖ (1 мкМ) была также выбрана на основании предварительных опытов [Игнатенко, 2019]. Контролем служили не обработанные МЖ растения огурца.

О холодоустойчивости растений судили по изменению выхода электролитов из высечек семядольных листьев [Гришенкова, Лукаткин, 2005], который регистрировали с помощью кондуктометра (HANNA, Италия).

Для измерения ростовых показателей и расчета площади листовой пластинки использовали общепринятые способы [Практикум..., 1990].

Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) в листьях оценивали с помощью метода, основанного на способности малонового диальдегида (МДА) реагировать с тиобарбитуровой кислотой, образуя окрашенный комплекс [Stewart, Bewley, 1980].

Повторность в пределах одного варианта опыта 5-кратная, при анализе ростовых показателей – 15-кратная. Каждый опыт повторяли не менее 3 раз. Статистическую значимость различий между средними значениями устанавливали с помощью дисперсионного анализа (LSD-тест) с использованием программы Statgraphics Plus (version 2.1). На рисунках и в таблице представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки. В работе обсуждаются величины, статистически значимые при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Одной из главных причин повреждения растений, особенно теплолюбивых, при действии низких температур является нарушение натив-

ной структуры и, как следствие, функциональной активности клеточных мембран [Чиркова, 2002; Лось, 2005]. В результате этого повышается их проницаемость и усиливается выход из клеток ионов и органических веществ [Лукаткин, 2002], который обычно оценивают по выходу электролитов [Гришенкова, Лукаткин, 2005]. В наших опытах показано, что температура 4 °С оказывает сильный повреждающий эффект на растения огурца, о чем можно судить по резкому увеличению выхода электролитов из тканей листьев уже через сутки низкотемпературного воздействия и в еще большей степени к концу опыта (почти на порядок через 2–3 сут) по сравнению с исходным уровнем (рис. 1).

Предобработка МЖ оказывала защитное действие на проростки огурца, подвергнутые действию температуры 4 °С, которое проявлялось в существенном снижении экзосмоса электролитов (по сравнению с необработанными проростками). Полученные нами данные согласуются с результатами других авторов, которые зафиксировали снижение повреждающего эффекта низких температур на целостность мембран клеток с помощью экзогенных жасмонатов. Например, уменьшение выхода электролитов при обработке плодов МЖ в условиях длительного (20 сут и более) низкотемпературного хранения обнаружено у манго [González-Aguilar et al., 2000], граната [Sayyari et al., 2011], персика [Jin et al., 2013] и томата

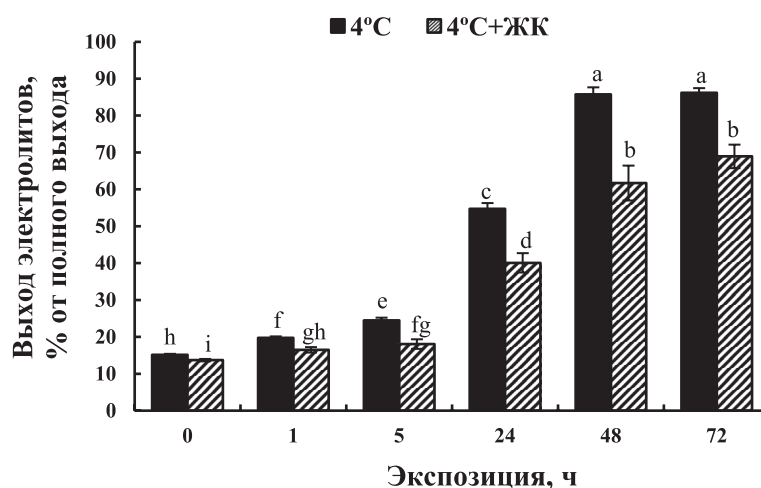


Рис. 1. Влияние МЖ (1 мкМ) на выход электролитов из семядольных листьев огурца, подвергнутых действию температуры 4 °С.

Здесь и далее латинскими буквами отмечены статистически значимые различия между средними значениями при $p < 0,05$

Fig. 1. The effect of MJ (1 µM) on the electrolytes leakage from the cotyledon leaves of cucumber exposed to temperature of 4 °C.

Here and Fig. 2 different Latin letters indicate statistically significant differences between the average values at $p < 0.05$

Влияние МЖ (1 мкМ) на размер семядольных листьев огурца, подвергнутых действию температуры 4 °С
 The effect of MJ (1 μM) on the size of cotyledon leaves of cucumber exposed to temperature of 4 °C

Экспозиция, сут Exposition, days	Длина семядольных листьев, см Length of cotyledon leaves, cm		Площадь семядольных листьев, см ² Area of cotyledon leaves, cm ²	
	4 °C	4 °C + МЖ 4 °C + MJ	4 °C	4 °C + МЖ 4 °C + MJ
0	3,16 ± 0,02b	3,22 ± 0,02a	4,01 ± 0,05b	4,15 ± 0,05a
1	2,89 ± 0,03e	3,03 ± 0,03c	3,46 ± 0,10d	3,70 ± 0,07c
2	2,84 ± 0,02e	2,92 ± 0,04de	3,05 ± 0,06f	3,20 ± 0,05e
3	2,70 ± 0,06f	2,86 ± 0,05e	2,76 ± 0,06g	3,03 ± 0,06ef

[Zhang et al., 2016]. Что касается других частей и органов растений, то имеются лишь единичные данные о снижении негативного воздействия холода под влиянием МЖ на плазмалемму клеток растений огурца [Saydpour, Sayyari, 2016] и риса [Lee et al., 1996]. Также известно, что МЖ оказывает защитное действие и на мембраны органелл клеток, в частности хлоропластов и митохондрий, препятствуя их разрушению под воздействием низкой температуры [Li et al., 2012].

Как известно, одной из неспецифических реакций растений на действие низких температур является торможение ростовых процессов [Чиркова, 2002]. Более того, у холодостойких растений, в частности озимых злаков, первоначальное торможение роста является необходимым условием для успешного осуществления низкотемпературной адаптации, которое в дальнейшем может сменяться частичным возобновлением ростовых процессов в случае увеличения продолжительности низкотемпературного воздействия [Венжик и др., 2012] или после его прекращения [Шибеева и др., 2019]. В отличие от этого при охлаждении теплолюбивых растений восстановление ростовых процессов происходит значительно медленнее (и только в случае действия закаливающих температур) или не происходит вообще (при повреждающих воздействиях) [Игнатенко и др., 2016; Шибеева и др., 2019]. В наших опытах остановка ростовых процессов, фиксируемая по изменению длины и площади семядольных листьев, отмечена уже через 1 сут низкотемпературного воздействия (табл.). В дальнейшем возобновление роста не происходило, а некоторое уменьшение длины и площади семядольных листьев огурца с увеличением экспозиции при 4 °C связано с потерей тургора и сморщиванием листовой пластины, а также со стандартным способом измерения линейных параметров листа (табл.). Укажем, что в контрольном варианте, в котором растения находились при оптимальной температуре (22 °C), прирост длины и площади семядольных листьев был зафикси-

рован уже через 1 сут. К концу опыта (3 сут) размеры листьев увеличились относительно исходного уровня на 20 % (длина) и 30 % (площадь).

Под влиянием экзогенного МЖ длина и площадь семядольных листьев растений, подвергнутых действию температуры 4 °C, снижались в меньшей степени, чем в варианте с температурой 4 °C, но без МЖ (табл.). Отметим, что о сходном защитном эффекте МЖ ранее сообщалось в работе Li с соавт. [2012], которые показали, что у обработанных МЖ и подвергнутых действию температуры 8 °C растений огурца не происходит значительного снижения сырой и сухой биомассы листьев, как это наблюдалось в варианте без предобработки МЖ. Как показывают исследования, влияние экзогенных жасмонатов на ростовые процессы растений как в обычных, так и в неблагоприятных условиях в значительной степени обусловлено их участием в регуляции гормонального баланса [Шакирова и др., 2008]. Не исключено, что и в нашем опыте проявление защитного эффекта МЖ в отношении роста огурца в условиях низкотемпературного стресса было связано с его участием в регуляции содержания других фитогормонов, однако это требует специальной проверки.

Как отмечалось выше, одной из главных причин повреждения растений при действии низких температур является нарушение структуры клеточных мембран [Чиркова, 2002; Лось, 2005]. Последнее, в частности, обусловлено действием на них активных форм кислорода (АФК), вызывающих ПОЛ плазмалеммы и мембран органелл, что приводит к утечке клеточного содержимого и смерти клетки [Лукаткин, 2002]. Усиление генерации АФК обнаружено при действии на растения различных стресс-факторов, в том числе низких температур [Li et al., 2012; Колупаев и др., 2018; Min et al., 2018]. В наших опытах оказалось, что как кратковременное (часы), так и более длительное (дни) действие температуры 4 °C на проростки огурца вызывало накопление МДА в листьях. К концу опыта (3 сут) его уровень значительно возрастал и превышал ис-

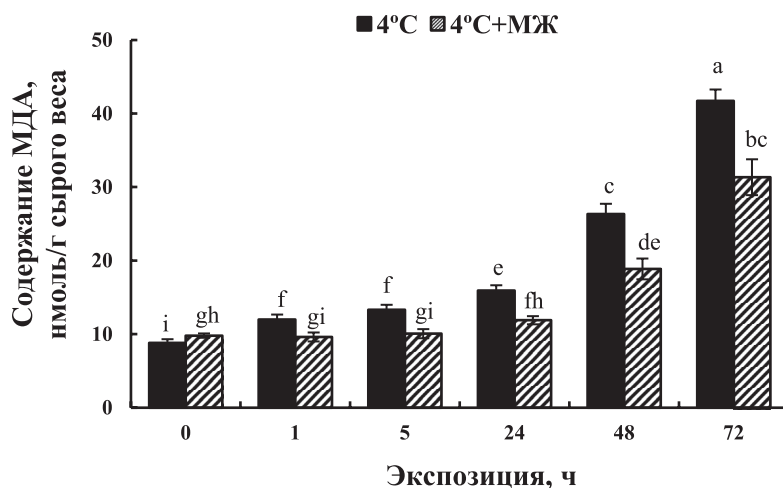


Рис. 2. Влияние МЖ (1 мкМ) на содержание МДА в семядольных листьях огурца, подвергнутого действию низкой температуры 4 °С
 Fig. 2. The influence of MJ (1 μM) on the MDA content in the cotyledon leaves of cucumber exposed to temperature of 4 °C

ходный уровень более чем в 4 раза (рис. 2). Вероятно, это явилось одной из причин повреждения клеточных мембран, в результате которого они утрачивали избирательную проницаемость, о чем свидетельствует высокая корреляция между уровнем МДА и выходом электролитов из тканей листьев ($r = 0,89$).

Предобработка МЖ растений огурца, находящихся в оптимальных температурных условиях (22 °С), вызывала незначительное увеличение содержания МДА (рис. 2), что, вероятно, было обусловлено некоторым усилением продукции АФК в клетках. Так, например, в работе Карпец с соавт. [2014] показано, что под влиянием ЖК в колеоптилах пшеницы наблюдалось повышение генерации супероксидного радикала. Как известно, кратковременное и небольшое повышение содержания АФК в клетках может выступать в качестве сигнала, активизирующего защитно-приспособительные реакции растений, в том числе усиление работы антиоксидантной системы [Prasad et al., 1994; Foyer, Noctor, 2009; Bhattacharjee, 2014; Колупаев и др., 2018]. Это, в свою очередь, способствует снижению уровня окислительного стресса, косвенным подтверждением чего служат данные, характеризующие динамику содержания МДА в листьях растений, обработанных МЖ, при их помещении в низкотемпературные условия. Так, в течение всего периода действия температуры 4 °С уровень МДА в их листьях был ниже, чем у необработанных проростков (рис. 2). Более того, в условиях холодового стресса МЖ препятствовал интенсивному развитию ПОЛ, о чем говорит отсутствие повышения содержания МДА в начальный период (часы и 1 сут)

действия температуры 4 °С, в отличие от варианта без обработки МЖ (рис. 2). Однако отметим, что при продолжительном действии (2 и 3 сут) температуры 4 °С даже в присутствии МЖ в листьях проростков происходило значительное увеличение содержания МДА, что, по всей видимости, и приводило к необратимому нарушению структуры клеточных мембран и, как следствие, к усиленной утечке растворенных веществ из клеток, их обезвоживанию и гибели. Предположительно, гибель растений огурца в условиях продолжительного действия температуры 4 °С могла быть обусловлена прежде всего усилением окислительных процессов в клетках и тканях корня, который у теплолюбивых растений отличается высокой чувствительностью к холоду [Балагурова и др., 2001; Попов и др., 2010; Титов, Таланова, 2011].

Таким образом, на основании полученных данных можно заключить, что предобработка растений огурца МЖ уменьшает повреждающий эффект низкой температуры, вызывая активизацию защитно-приспособительных механизмов. Последнее, в частности, находит свое выражение в меньшем торможении ростовых процессов под влиянием низкой температуры и снижении уровня окислительного стресса.

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук». Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания (0218-2019-0074).

Литература

- Балагурова Н. И., Акимова Т. В., Титов А. Ф. Влияние локального охлаждения проростков огурца и пшеницы на различные виды устойчивости листа и корня // Физиология растений. 2001. Т. 48. С. 113–118.
- Васюкова Н. И., Озерецковская О. Л. Жасмонатзависимая защитная сигнализация в тканях растений // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 643–653.
- Венжик Ю. В., Титов А. Ф., Таланова В. В., Мирославов Е. А., Котеева Н. К. Структурно-функциональная реорганизация фотосинтетического аппарата растений пшеницы при холодной адаптации // Цитология. 2012. Т. 54, № 12. С. 916–924.
- Гришенкова Н. Н., Лукаткин А. С. Определение устойчивости растительных тканей к абиотическим стрессам с использованием кондуктометрического метода // Поволжский экологический журнал. 2005. № 1. С. 3–11.
- Игнатенко А. А. Участие антиоксидантной системы в регуляции холодоустойчивости растений пшеницы и огурца салициловой кислотой и метилжасмонатом: Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2019. 191 с.
- Игнатенко А. А., Репкина Н. С., Титов А. Ф., Таланова В. В. Реакция растений огурца на низкотемпературные воздействия разной интенсивности // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 11. С. 57–67. doi: 10.17076/eb440
- Карпец Ю. В., Колупаев Ю. Е., Луговая А. А., Обозный А. И. Влияние экзогенной жасмоновой кислоты на про-/антиоксидантную систему колелоптилей пшеницы в связи с устойчивостью к гипертермии // Физиология растений. 2014. Т. 61, № 3. С. 367–375. doi: 10.7868/S0015330314020067
- Колупаев Ю. Е., Горелова Е. И., Ястреб Т. О. Механизмы адаптации растений к гипотермии: роль антиоксидантной системы // Вісник Харківського Національного Аграрного Університету. Серія Біологія. 2018. Вип. 1(43). С. 6–33.
- Лось Д. А. Молекулярные механизмы холодоустойчивости растений // Вестник РАН. 2005. Т. 75, № 4. С. 338–345.
- Лукаткин А. С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордовск. ун-та, 2002. 208 с.
- Попов В. Н., Антипина О. В., Трунова Т. И. Перекисное окисление липидов при низкотемпературной адаптации листьев и корней теплолюбивых растений табака // Физиология растений. 2010. Т. 57, № 1. С. 153–156.
- Практикум по физиологии растений / Под ред. Н. Н. Третьякова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
- Тарчевский И. А. Сигнальные системы клеток растений. М.: Наука, 2002. 294 с.
- Титов А. Ф., Таланова В. В. Локальное действие высоких и низких температур на растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 166 с.
- Титов А. Ф., Акимова Т. В., Таланова В. В., Топчиева Л. В. Устойчивость растений в начальный период действия неблагоприятных температур. М.: Наука, 2006. 143 с.
- Чиркова Т. Ф. Физиологические основы устойчивости растений. СПб: Изд-во СПб ун-та, 2002. 244 с.
- Шакирова Ф. М., Сахабутдинова А. Р., Ишдавлетова Р. С., Ласточкина О. В. Влияние предобработки метилжасмонатом на устойчивость проростков пшеницы к солевому стрессу // Агрехимия. 2008. № 7. С. 26–32.
- Шибяева Т. Г., Икконен Е. Н., Шерудило Е. Г., Титов А. Ф. Влияние ежесуточных кратковременных понижений температуры на теплолюбивые и холодостойкие растения // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 4. С. 266–276. doi: 10.1134/S0015330319040122
- Bhattacharjee S. Membrane lipid peroxidation and its conflict of interest: the two faces of oxidative stress // Current Science. 2014. Vol. 107, no. 11. P. 1811–1823.
- Dar T. A., Uddin M., Khan M. M. A., Hakeem K. R., Jaleel H. Jasmonates counter plant stress: a review // Environ. Exp. Bot. 2015. Vol. 115. P. 49–57. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.02.010
- Ezzat A., Ammar A., Szabó Z., Nyéki J., Holb I. J. Postharvest treatments with methyl jasmonate and salicylic acid for maintaining physico-chemical characteristics and sensory quality properties of apricot fruit during cold storage and shelf-life // Pol. J. Food Nutr. Sci. 2017. Vol. 67, no. 2. P. 159–166. doi: 10.1515/pjfn-2016-0013
- Foyer C. H., Noctor G. Redox regulation in photosynthetic organisms: signaling, acclimation and practical implications // Antioxid. Redox Signal. 2009. Vol. 11. P. 861–906. doi: 10.1089/ars.2008.2177
- González-Aguilar G. A., Fortiz J., Cruz R., Baez R., Wang C. Y. Methyl jasmonate reduces chilling injury and maintains postharvest quality of mango fruit // J. Agric. Food Chem. 2000. Vol. 48, no. 2. P. 515–519. doi: 10.1021/jf9902806
- Hu Y., Jiang L., Wang F., Yu D. Jasmonate regulates the INDUCER OF CBF EXPRESSION-C-REPEAT BINDING FACTOR/DRE BINDING FACTOR1 cascade and freezing tolerance in Arabidopsis // Plant Cell. 2013. Vol. 25. P. 2907–2924. doi: 10.1105/tpc.113.112631
- Jin P., Zhu H., Wang J., Chen J., Wang X., Zheng Y. Effect of methyl jasmonate on energy metabolism in peach fruit during chilling stress // J. Sci. Food Agric. 2013. Vol. 93, no. 8. P. 1827–1832. doi: 10.1002/jsfa.5973
- Lee T. M., Lur H. S., Lin V. H., Chu C. Physiological and biochemical changes related to methyl jasmonate induced chilling tolerance of rice *Oryza sativa* L. // Plant Cell Environ. 1996. Vol. 19. P. 65–74.
- Li D. M., Guo Y. K., Li Q., Zhang J., Wang X. J., Bai J. G. The pretreatment of cucumber with methyl jasmonate regulates antioxidant enzyme activities and protects chloroplast and mitochondrial ultrastructure in chilling-stressed leaves // Sci. Hortic. 2012. Vol. 143. P. 135–143.
- Min D., Li F., Zhang X., Cui X., Shu P., Dong L., Ren C. SIMYC2 involved in methyl jasmonate-induced tomato fruit chilling tolerance // J. Agric. Food Chem. 2018. Vol. 66, no. 12. P. 3110–3117. doi: 10.1021/acs.jafc.8b00299
- Per T. S., Khan M. I. R., Anjuma N. A., Masooda A., Hussaina S. J., Khana N. A. Jasmonates in plants under

abiotic stresses: Crosstalk with other phytohormones matters // *Environ. Exp. Bot.* 2018. Vol. 145. P. 104–120. doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.11.004

Prasad T. K., Anderson M. D., Martin B. A., Stewart C. R. Evidence for chilling-induced oxidative stress in maize seedlings and a regulatory role for hydrogen peroxide // *Plant Cell.* 1994. Vol. 6. P. 65–74.

Samota M. K., Bhatt L., Garg N., Geat N. Defense induced by jasmonic acid: a review // *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 2017. Vol. 6, no. 5. P. 2467–2474. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.276

Saydpour F., Sayyari M. Impact of methyl jasmonate on enhancing chilling tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings // *J. Crop Production and Processing.* 2016. Vol. 6. P. 47–59.

Sayyari M., Babalar M., Kalantari S., Martínez-Romero D., Guillén F., Serrano M., Valero D. Vapour treatments with methyl salicylate or methyl jasmonate alleviated chilling injury and enhanced antioxidant potential during postharvest storage of pomegranates // *Food Chem.* 2011. Vol. 124. P. 964–970. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.07.036

Shahzad R., Waqas M., Khan A. L., Hamayun M., Kang S.-M., Lee I.-J. Foliar application of methyl jasmonate induced physio-hormonal changes in *Pisum sativum* under diverse temperature regimes // *Plant Physi-*

ol. Biochem. 2015. Vol. 96. P. 406–416. doi: 10.1016/j.plaphy.2015.08.020

Siboza X. I., Bertlinga I., Odindo A. O. Salicylic acid and methyl jasmonate improve chilling tolerance in cold-stored lemon fruit (*Citrus limon*) // *J. Plant Physiol.* 2014. Vol. 171, no. 18. P. 1722–1731. doi: 10.1016/j.jplph.2014.05.012

Stewart R. R. C., Bewley J. D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes // *Plant Physiol.* 1980. Vol. 65. P. 245–248.

Wasternack C. Action of jasmonates in plant stress responses and development – applied aspects // *Bio-technol. Adv.* 2014. Vol. 32, no. 1. P. 31–39.

Zhang W., Zhang H., Ning L., Li B., Bao M. Quantitative proteomic analysis provides novel insights into cold stress responses in petunia seedlings // *Front Plant Sci.* 2016. Vol. 7. Art. 136. doi: 10.3389/fpls.2016.00136

Zhao M. L., Wang J. N., Shan W., Lu W. J. Induction of jasmonate signalling regulators MaMYC2s and their physical interactions with MalCE1 in methyl jasmonate-induced chilling tolerance in banana fruit // *Plant Cell Environ.* 2013. Vol. 36, no. 1. P. 30–51. doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02551.x

Поступила в редакцию 07.02.2020

References

Balagurova N. I., Akimova T. V., Titov A. F. Vliyaniye lokal'nogo okhlazhdeniya prorstkov ogurtsa i pshenitsy na razlichnye vidy ustoichivosti lista i kornya [The effect of local chilling of cucumber and wheat seedlings on various types of leaf and root tolerance]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2001. Vol. 48. P. 113–118.

Chirkova T. F. Fiziologicheskie osnovy ustoichivosti rastenii [Physiological basis of plant tolerance]. St. Petersburg: Izd-vo SPb. un-ta, 2002. 244 p.

Grishenkova N. N., Lukatkin A. S. Opredeleniye ustoichivosti rastitel'nykh tkanei k abioticheskim stressam s ispol'zovaniem konduktometricheskogo metoda [Determination of plant tissue tolerance to abiotic stresses using the conductometric method]. *Povolzhskii ekol. zhurn.* [Povolzhskiy J. Ecol.]. 2005. No. 1. P. 3–11.

Ignatenko A. A. Uchastie antioksidantnoi sistemy v regulyatsii kholodoustoichivosti rastenii pshenitsy i ogurtsa salitsilovoi kislotoi i metilzhasmonatom [The participation of the antioxidant system in the regulation of cold tolerance of wheat and cucumber plants by salicylic acid and methyl jasmonate]: PhD (Cand. of Biol.) thesis. St. Petersburg, 2019. 191 p.

Ignatenko A. A., Repkina N. S., Titov A. F., Talanova V. V. Reaktsiya rastenii ogurtsa na nizkotemperaturnye vozdeistviya raznoi intensivnosti [The response of cucumber plants to low temperature impacts of varying intensity]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KaRC RAS]. 2016. No. 11. P. 57–67. doi: 10.17076/eb440

Karpets Yu. V., Kolupaev Yu. E., Lugovaya A. A., Oboznyi A. I. Vliyaniye ekzogennoi zhasmonovoi kisloty na pro-/antioksidantnyuyu sistemu koleoptilei pshenitsy v svyazi s ustoichivost'yu k gipertermii [The effect of exogenous jasmonic acid on the pro-/antioxidant system

of wheat coleoptiles due to hyperthermia tolerance]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2014. Vol. 61, no. 3. P. 367–375. doi: 10.7868/S0015330314020067

Kolupaev Yu. E., Gorelova E. I., Yastreb T. O. Mekhanizmy adaptatsii rastenii k gipotermii: rol' antioksidantnoi sistemy [Mechanisms of plant adaptation to hypothermia: the role of the antioxidant system]. *Visnik Kharkivsk'ogo Natsional'nogo Agrarnogo Universitetu. Ser. Biol.* [Bull. Kharkov National Agrarian Univ. Biol. Ser.]. 2018. No. 1(43). P. 6–33.

Los' D. A. Molekulyarnye mekhanizmy kholodoustoichivosti rastenii [Molecular mechanisms of plant cold tolerance]. *Vestnik RAN* [Herald RAS]. 2005. Vol. 75, no. 4. P. 338–345.

Lukatkin A. S. Kholodovoe povrezhdenie teplolyubivykh rastenii i oksitel'nyi stress [Cold damage of thermophilic plants and oxidative stress]. Saransk: Izd-vo Mordovsk. un-ta, 2002. 208 p.

Popov V. N., Antipina O. V., Trunova T. I. Perekisnoe okislenie lipidov pri nizkotemperaturnoi adaptatsii list'ev i kornei teplolyubivykh rastenii tabaka [Lipid peroxidation at the low-temperature adaptation of leaves and roots of thermophilic tobacco plants]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2010. Vol. 57, no. 1. P. 153–156.

Praktikum po fiziologii rastenii [Plant physiology workshop]. Ed. N. N. Tret'yakov. 3rd ed. rev. upd. Moscow: Agropromizdat, 1990. 271 p.

Shakirova F. M., Sakhabutdinova A. R., Ishdavletova R. S., Lastochkina O. V. Vliyaniye predobrabotki metilzhasmonatom na ustoichivost' prorstkov pshenitsy k solevomu stressu [The effect of pretreatment with methyl jasmonate on the tolerance of wheat seedlings to salt stress]. *Agrokhim.* [Eurasian Soil Sci.]. 2008. No. 7. P. 26–32.

- Shibaeva T. G., Ikkonen E. N., Sherudilo E. G., Titov A. F. Vliyaniye ezhesutochnykh kratkovremennykh ponizhenii temperatury na teplolyubivye i kholodostoi- kie rasteniya [The effect of daily short-term tempera- ture drops on thermophilic and cold-resistant plants]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2019. Vol. 66, no. 4. P. 266–276. doi: 10.1134/S0015330319040122
- Tarchevskii I. A. Signal'nye sistemy kletok rastenii [Plant cell signaling systems]. Moscow: Nauka, 2002. 294 p.
- Titov A. F., Talanova V. V. Lokal'noe deistvie vysokikh i nizkikh temperatur na rasteniya [Local effects of high and low temperatures on plants]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 166 p.
- Titov A. F., Akimova T. V., Talanova V. V., Topchie- va L. V. Ustoichivost' rastenii v nachal'nyi period deist- viya neblagopriyatnykh temperature [Plant tolerance in the initial period of exposure to adverse tempera- tures]. Moscow: Nauka, 2006. 143 p.
- Vasyukova N. I., Ozeretskovskaya O. L. Zhasmo- natzavisimaya zashchitnaya signalizatsiya v tkanyakh rastenii [Jasmonate-dependent protective signaling in plant tissues]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2009. Vol. 56, no. 5. P. 643–653.
- Venzhik Yu. V., Titov A. F., Talanova V. V., Mirosla- vov E. A., Koteeva N. K. Strukturno-funksional'naya reorganizatsiya fotosinteticheskogo apparata rastenii pshenitsy pri kholodovoi adaptatsii [Structural and func- tional reorganization of the photosynthetic apparatus of wheat plants during cold adaptation]. *Tsitologiya* [Cell and Tissue Biol.]. 2012. Vol. 54, no. 12. P. 916–924.
- Bhattacharjee S. Membrane lipid peroxidation and its conflict of interest: the two faces of oxidative stress. *Cur- rent Science*. 2014. Vol. 107, no. 11. P. 1811–1823.
- Dar T. A., Uddin M., Khan M. M. A., Hakeem K. R., Jaleel H. Jasmonates counter plant stress: a review. *En- viron. Exp. Bot.* 2015. Vol. 115. P. 49–57. doi: 10.1016/j. envexpbot.2015.02.010
- Ezzat A., Ammar A., Szabó Z., Nyéki J., Holb I. J. Postharvest treatments with methyl jasmonate and sali- cylic acid for maintaining physico-chemical characteris- tics and sensory quality properties of apricot fruit during cold storage and shelf-life. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* 2017. Vol. 67, no. 2. P. 159–166. doi: 10.1515/pjfn-2016- 0013
- Foyer C. H., Noctor G. Redox regulation in photo- synthetic organisms: signaling, acclimation and practi- cal implications. *Antioxid. Redox Signal.* 2009. Vol. 11. P. 861–906. doi: 10.1089/ars.2008.2177
- González-Aguilar G. A., Fortiz J., Cruz R., Baez R., Wang C. Y. Methyl jasmonate reduces chilling injury and maintains postharvest quality of mango fruit. *J. Ag- ric. Food Chem.* 2000. Vol. 48, no. 2. P. 515–519. doi: 10.1021/jf9902806
- Hu Y., Jiang L., Wang F., Yu D. Jasmonate regu- lates the INDUCER OF CBF EXPRESSION-C-REPEAT BINDING FACTOR/DRE BINDING FACTOR1 cascade and freezing tolerance in Arabidopsis. *Plant Cell*. 2013. Vol. 25. P. 2907–2924. doi: 10.1105/tpc.113.112631
- Jin P., Zhu H., Wang J., Chen J., Wang X., Zheng Y. Effect of methyl jasmonate on energy metabolism in peach fruit during chilling stress. *J. Sci. Food Ag- ric.* 2013. Vol. 93, no. 8. P. 1827–1832. doi: 10.1002/ jsfa.5973
- Lee T. M., Lur H. S., Lin V. H., Chu C. Physiological and biochemical changes related to methyl jasmonate induced chilling tolerance of rice *Oryza sativa* L. *Plant Cell Environ.* 1996. Vol. 19. P. 65–74.
- Li D. M., Guo Y. K., Li Q., Zhang J., Wang X. J., Bai J. G. The pretreatment of cucumber with methyl jas- monate regulates antioxidant enzyme activities and pro- tects chloroplast and mitochondrial ultrastructure in chilling-stressed leaves. *Sci. Hortic.* 2012. Vol. 143. P. 135–143.
- Min D., Li F., Zhang X., Cui X., Shu P., Dong L., Ren C. SIMYC2 involved in methyl jasmonate-induced tomato fruit chilling tolerance. *J. Agric. Food Chem.* 2018. Vol. 66, no. 12. P. 3110–3117. doi: 10.1021/acs. jafc.8b00299
- Per T. S., Khanb M. I. R., Anjuma N. A., Masooda A., Hussaina S. J., Khana N. A. Jasmonates in plants under abiotic stresses: Crosstalk with other phytohormones matters. *Environ. Exp. Bot.* 2018. Vol. 145. P. 104–120. doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.11.004
- Prasad T. K., Anderson M. D., Martin B. A., Stew- art C. R. Evidence for chilling-induced oxidative stress in maize seedlings and a regulatory role for hydrogen peroxide. *Plant Cell*. 1994. Vol. 6. P. 65–74.
- Samota M. K., Bhatt L., Garg N., Geat N. Defense induced by jasmonic acid: a review. *Int. J. Curr. Micro- biol. Appl. Sci.* 2017. Vol. 6, no. 5. P. 2467–2474. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.276
- Saydpour F., Sayyari M. Impact of methyl jasmonate on enhancing chilling tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings. *J. Crop Production and Process- ing*. 2016. Vol. 6. P. 47–59.
- Sayyari M., Babalar M., Kalantari S., Martínez-Rome- ro D., Guillén F., Serrano M., Valero D. Vapour treat- ments with methyl salicylate or methyl jasmonate alle- viated chilling injury and enhanced antioxidant poten- tial during postharvest storage of pomegranates. *Food Chem.* 2011. Vol. 124. P. 964–970. doi: 10.1016/j.food- chem.2010.07.036
- Shahzad R., Waqas M., Khan A. L., Hamayun M., Kang S.-M., Lee I.-J. Foliar application of methyl jas- monate induced physio-hormonal changes in *Pisum sa- tivum* under diverse temperature regimes. *Plant Physiol. Biochem.* 2015. Vol. 96. P. 406–416. doi: 10.1016/ j.plaphy.2015.08.020
- Siboza X. I., Bertlinga I., Odindo A. O. Salicylic acid and methyl jasmonate improve chilling tolerance in cold-stored lemon fruit (*Citrus limon*). *J. Plant Physiol.* 2014. Vol. 171, no. 18. P. 1722–1731. doi: 10.1016/ j.jplph.2014.05.012
- Stewart R. R. C., Bewley J. D. Lipid peroxidation as- sociated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiol.* 1980. Vol. 65. P. 245–248.
- Wasternack C. Action of jasmonates in plant stress responses and development – applied aspects. *Bio- technol. Adv.* 2014. Vol. 32, no. 1. P. 31–39.
- Zhang W., Zhang H., Ning L., Li B., Bao M. Quantita- tive proteomic analysis provides novel insights into cold stress responses in petunia seedlings. *Front Plant Sci.* 2016. Vol. 7. Art. 136. doi: 10.3389/fpls.2016.00136

Zhao M. L., Wang J. N., Shan W., Lu W. J. Induction of jasmonate signalling regulators MaMYC2s and their physical interactions with MalCE1 in methyl jasmonate-induced chilling tolerance in banana fruit. *Plant Cell*

Environ. 2013. Vol. 36, no. 1. P. 30–51. doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02551.x

Received February 07, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Игнатенко Анна Анатольевна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: angelina911@ya.ru
тел.: (8142) 762712

Таланова Вера Викторовна

главный научный сотрудник, д. б. н.
Институт биологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910

Репкина Наталья Сергеевна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт биологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: nrt9@ya.ru
тел.: (8142) 762712

Титов Александр Федорович

главный научный сотрудник лаб. экологической физиологии растений, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.
Институт биологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Ignatenko, Anna

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: angelina911@ya.ru
tel.: (8142) 762712

Talanova, Vera

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Repkina, Natalia

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nrt9@ya.ru
tel.: (8142) 762712

Titov, Alexander

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: titov@krc.karelia.ru