

11. Kumar, S.; Abedin, M.M.; Singh, A.K.; Das, S. Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. In *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture*; Springer Nature: Singapore, 2020; Volume 1, pp. 517–532.
12. Goncharuk, E.A.; Zubova, M.Y.; Nechaeva, T.L.; Kazantseva, V.V.; Gulevich, A.A.; Baranova, E.N.; Lapshin, P.V.; Katanskaya, V.M.; Aksenova, M.A.; Zagorskina, N.V. Effects of Hydrogen Peroxide on In Vitro Cultures of Tea (*Camellia sinensis* L.) Grown in the Dark and in the Light: Morphology, Content of Malondialdehyde, and Accumulation of Various Polyphenols. *Molecules* 2022, 27, 6674.
13. Sharma, P.; Gautam, A.; Kumar, V.; Khosla, R.; Guleria, P. Naringenin reduces Cd-induced toxicity in *Vigna radiata* (mungbean). *Plant Stress* 2021, 1, 100005.
14. Almas, H.I.; un-Nisa, Z.; Anwar, S.; Kausar, A.; Farhat, F.; Munawar, M.; Khalizadieh, R. Exogenous application of methionine and phenylalanine confers salinity tolerance in tomato by concerted regulation of metabolites and antioxidants. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2021, 21, 3051–3064.
15. Ding, J.U.; Sun, Y.; Xiao, C.L.; Shi, K.; Zhou, Y.H.; Yu, J.Q. Physiological basis of different allelopathic reactions of cucumber and figleaf gourd plants to cinnamic acid. *J. Exp. Bot.* 2007, 58, 3765–3773.
16. Hatamipoor, S.; Shabani, L.; Farhadian, S. Supportive effect of naringenin on NaCl-induced toxicity in *Carthamus tinctorius* seedlings. *Int. J. Phytoremediation* 2023, 25, 889–899.
17. Ozfidan-Konakci, C.; Yildiztugay, E.; Alp, F.N.; Kucukoduk, M.; Turkan, I. Naringenin induces tolerance to salt/osmotic stress through the regulation of nitrogen metabolism, cellular redox and ROS scavenging capacity in bean plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2020, 157, 264–275.
18. Kolupaev, Y.E.; Horielova, E.I.; Yastreb, T.O.; Ryabchun, N.I. State of antioxidant system in triticale seedlings at cold hardening of varieties of different frost resistance. *Cereal Res. Commun.* 2020, 48, 165–171.

Анализ воздействия антигололедных реагентов на ростовые процессы высших растений и синтез АФК в клетках корня

**Алексеева М. И.^{A*}, Черныш М. А.^A, Мацкевич В. С.^A,
Демидчик В. В.^A**

^A Белорусский государственный университет, кафедра клеточной биологии и биоинженерии растений, г. Минск, Беларусь. *E-mail: aliakseyeva_mi@mail.ru.

Основной причиной солевого стресса в городских условиях является использование антигололедных реагентов в зимний период времени в странах с холодным климатом. В состав антигололедных реагентов входят химические вещества, которые понижают температуру замерзания воды и затормаживают образование льда. Наиболее часто для этих целей используется NaCl из-за его доступности, низкой стоимости и невысокой токсичности для человека. Однако, в высоких концентрациях он токсичен для

большинства растений и вызывает так называемый солевой стресс, который оказывает влияние на растительные организмы на физиологическом, гистологическом, клеточном и молекулярном уровнях. В частности, он приводит к ограничению поглощения питательных веществ, нарушению ионного баланса деревьев и, в конечном итоге, к гибели придорожной растительности. Тем не менее, системных исследований с привлечением физико-химического и биологического анализа по этой проблеме не проведено. Реакция растений на NaCl детально исследована для растений засушливых регионов и включает изменения ионного, осмотического и электрического баланса растительной клетки. Подобные нарушения приводят к задержке роста и развития всего растительного организма. При высоких уровнях NaCl (>40 мМ) наступает состояние острой токсичности, проявляющееся в повреждении и отмирании клеток, и порой приводящее к гибели растения.

Целью данной работы являлись анализ содержания Na^+ и катионов других щелочноземельных металлов в пробах снега, собранных на разном расстоянии от автомобильных дорог после применения антигололедных обработок в г. Минске и Минском районе (метод пламенной спектрофотометрии), исследование роста и развития модельных видов высших растений в субстратах, изготовленных на основе данных проб (культуры *in vitro*) и исследование влияния NaCl на производство АФК в корнях растений. В качестве модельных объектов выступали *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh., *Forsythia intermedia* Zabel и *Betula pendula* Roth.

Элементный анализ исследуемых проб снега показал высокое содержание Na^+ . Его концентрация во всех пробах многократно превышала уровни K^+ и Ca^{2+} . На самом приближенном к трассе участке (1 м) она составила $365 \text{ мМ} \pm 28 \text{ мМ}$, в середине исследуемого диапазона расстояний (50 м) – $11,9 \pm 2,3 \text{ мМ}$ и на наиболее отдаленном (100 м) – $3,2 \pm 2,1 \text{ мМ}$. На втором месте по содержанию в тестируемых пробах оказался Ca^{2+} (на расстоянии 1 м: $18,7 \pm 1,3 \text{ мМ}$; 50 м: $0,4 \pm 0,1 \text{ мМ}$; 100 м: $0,125 \pm 0,001 \text{ мМ}$). На третьем месте – K^+ , его концентрация в пробе, отобранной на расстоянии 1 м, составляла $1,1 \pm 0,07 \text{ мМ}$, на расстоянии 50 м – $0,04 \pm 0,004 \text{ мМ}$ и на 100 м – $0,005 \pm 0,003 \text{ мМ}$. Известно, что такие низкие уровни Ca^{2+} и K^+ безвредны для высших растений. Соответственно, токсическое действие антигололедных обработок связано с содержанием Na^+ .

Ростовые тесты показали, что наиболее ингибирующее воздействие проб проявлялось в отношении форзиции промежуточной. Пробы, отобранные на расстоянии 1 и 5 м от автотрассы, полностью подавляли рост как побегов, так и корней данного растения, на расстоянии 25 м снижали скорость роста побегов на 43% и на 26% корня, на расстоянии 100 м не подавляли рост (рис. 1, панель а). Береза повислая и арабидопсис были

менее чувствительными к загрязнению, однако демонстрировали полное угнетение роста корней и побегов на фоне проб, отобранных на расстоянии 1 и 5 м от дороги (рис. 1, панель б, в). Рост корней березы повислой ингибировался пробами, отобранными на расстоянии 25 м, на 35%, побегов на 25%; а пробами, отобранными на расстоянии 50 м, рост корней и побегов подавлялся на 32% и 18%, соответственно. У арабидопсиса пробы, отобранные на расстоянии 25 м от дороги, ингибировали рост на 40%, а на 50 м – на 34%. Эти данные коррелировали с эффектом обработки NaCl на тестируемые виды растений.

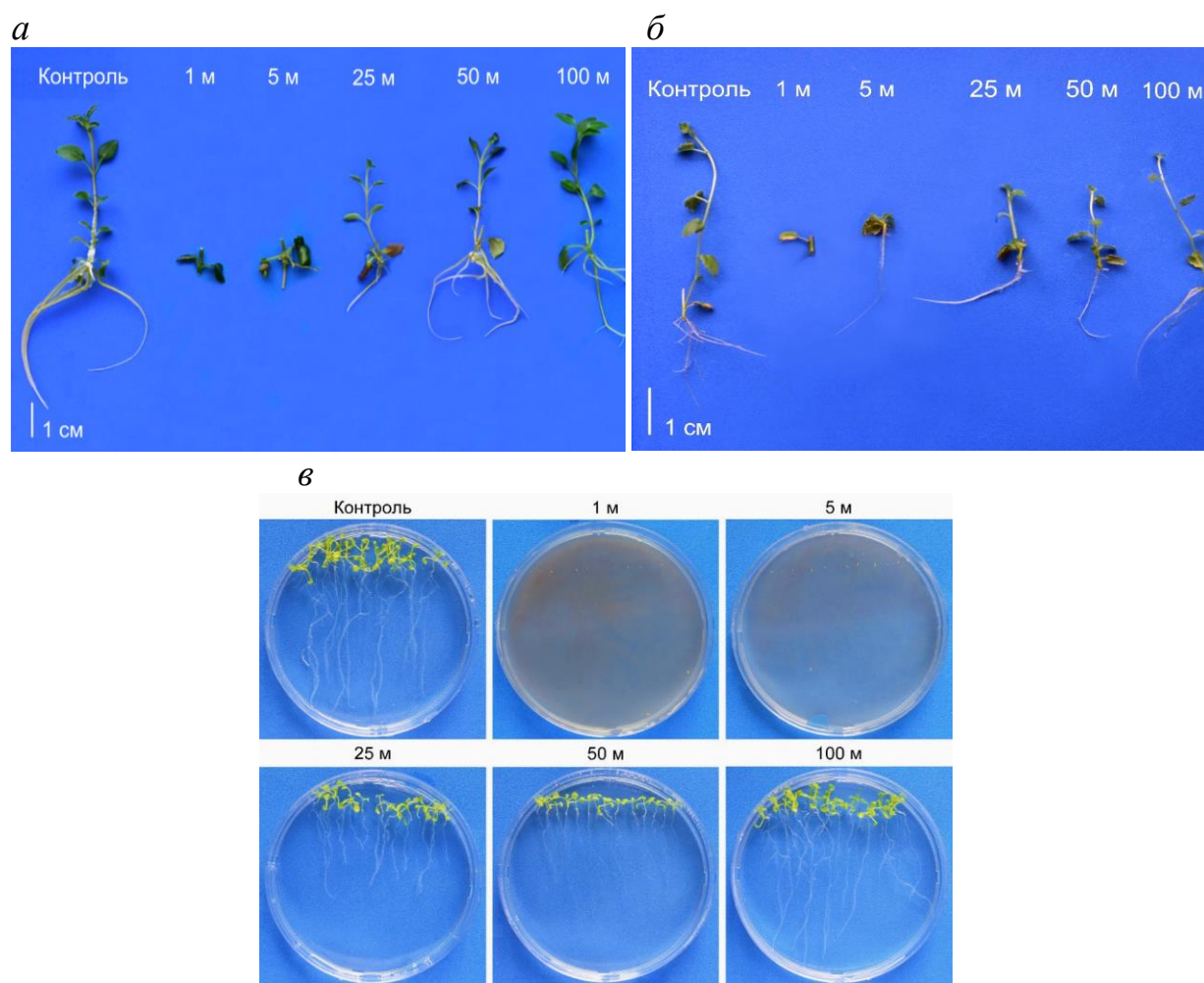


Рис. 1. Влияние антигололедных обработок на внешний вид и ростовые параметры модельных видов высших растений в культуре *in vitro*:
а – *Forsythia intermedia*; б – *Betula pendula*; в – *Arabidopsis thaliana*

Анализ генерации АФК в клетках корней *Arabidopsis thaliana* в ответ на засоление проводился при помощи метода эпифлуоресцентной микроскопии. Семидневные проростки подвергались воздействию 40-200 мМ

NaCl в течение 30-60 мин, после чего корни окрашивались 10 мин в 50 мкмоль/л 2,7-дихлородигидрофлуоресцеин диацетате (H₂DCFDA), промывались буфером (ммоль/л: 0,1 KCl, 0,1 CaCl₂, 1 Трис / 2 Мес, pH 6,0) и анализировались при помощи микроскопа Nikon Eclipse TS100 (фильтр FITC). Было показано, что интенсивность флуоресценции зонда в клетках корня арабидопсиса возрастала с увеличением концентрации соли. Максимальное увеличение свечения H₂DCFDA (в 2,4 раза по сравнению с контролем) в зоне всасывания вызывала обработка летальной концентрацией NaCl (200 ммоль/л) на протяжении 60 мин, после чего интенсивность флуоресценции снижалась. В кончиках корней достоверное увеличение интенсивности флуоресценции в 1,5 раза было отмечено на 45 мин, после чего интенсивность флуоресценции не изменялась. Совместная обработка 200 ммоль/л NaCl с антиоксидантами уменьшала интенсивность флуоресценции H₂DCFDA, при этом, наибольший протекторный эффект наблюдался при добавлении 1 мМ тиомочевины (интенсивность флуоресценции пробы снижалась на 53% по сравнению с обработкой солью). По-видимому, токсический эффект NaCl был обусловлен повышением уровня АФК, в первую очередь гидроксильных радикалов.

Изучение кинетики образования ковалентных аддуктов при взаимодействии вторичных метаболитов растений с белками пищи и организма человека в пептидной модельной системе

**Алхаже К.^{А*}, Голушко Н. И.^{А,Б}, Билова Т. Е.^{А,Б}, Ерофеева Н. О.^Б,
Соболева А. В.^А, Фролов А. А.^А**

^А *Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Лаборатория аналитической биохимии и биотехнологии, Москва, Российская Федерация.*

**E-mail: katrina.994.g@gmail.com*

^Б *Санкт-Петербургский государственный университет, Кафедра физиологии и биохимии растений, Санкт-Петербург, Российская Федерация.*

Гликирование белков и образующиеся в ходе этого процесса конечные продукты глубокого гликирования (КПГГ) рассматриваются в качестве ключевых факторов системного воспаления. Известно, что системное субклиническое воспаление лежит в основе возникновения и патогенеза ряда связанных с возрастом хронических расстройств, таких как сахарный диабет, сердечно-сосудистые и нейродегенеративные заболевания. К сожалению, синтетические лекарственные препараты, направленные на снижение вредного воздействия КПГГ на организм человека, обладают ши-