

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ РОСЛИН

УДК 581.6:582.37:631.5

Н.П. ВЕДЕНИЧОВА, д. б. н., ст. наук. співроб., пров. наук. співроб.,
Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
вул. Терещенківська, 2, Київ, 01004, Україна
e-mail: vedenicheva@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0579-0342

УЧАСТЬ ФІТОГОРМОНІВ У РЕГУЛЯЦІЇ РОСТУ ВОДНОЇ ПАПОРОТІ *SALVINIA NATANS* (L.) ALL.

Досліджено вплив екзогенних фітогормонів на накопичення біомаси водної плаваючої папороті *Salvinia natans* (L.) All., а також вміст ендогенних фітогормонів класу цитокінінів у період інтенсивного та стаціонарного росту. Встановлено, що ефект додавання ріст-регулюючих речовин у середовище культивування рослин залежав від їхньої концентрації та стадії росту, а також, ймовірно, від балансу ендогенних фітогормонів. Кінетин і абсцизова кислота (АБК) спричиняли протилежну дію на накопичення біомаси папороті, спрямованість цієї дії також змінювалась в залежності від інтенсивності ростових процесів. Закономірності впливу цих фітогормонів на різних стадіях росту обговорюються у зв'язку з динамікою ендогенних цитокінінів і АБК у спорофітах. Гормони цитокінінової природи можна розглядати як фактор підвищення продуктивності *S. natans* в період уповільнення ростових процесів, що важливо для розробки сучасних методів фіторемедіації антропогенно забруднених водойм.

Ключові слова: *Salvinia natans*, водна папороть, цитокініни, абсцизова кислота, регуляція росту.

Однією з найгостріших проблем сучасності є забруднення водойм, спричинене полютантами антропогенного походження. Накопичення токсикантів через викиди промислових підприємств, роботу транспорту, а в Україні ще й внаслідок воєнних дій, негативно позначається на якості води і змінює екологічний баланс водних біотопів в цілому. З огляду на це підвищується інтерес до видів водної рослинності, стійких до впливу шкідливих речовин, і до таких, що здатні очищати від них водойми. Одним з таких видів є папороть-гідрофіт сальвінія плаваюча *Salvinia natans* (L.) All., представник аборигенної флори Центральної та Південно-Східної Європи, доволі широко поширений в Україні. *S. natans* відрізняється швидкими темпами росту, стійкістю до несприятливих умов існування й активним розмноженням за сприятливих умов. Папороті родини Salviniaceae відомі своєю здатністю поглинати з води та накопичувати в своїй

Ц и т у в а н н я: Веденичова Н.П. Участь фітогормонів у регуляції росту водної папороті *Salvinia natans* (L.) All. *Гідробіол. журн.* 2025. Т. 61, № 5. С. 82—91.

біомасі забруднювачі різної природи, серед них важкі метали, гербіциди, азотисті сполуки, антибіотики тощо [18]. Завдяки здатності до значної абсорбції токсичних речовин та інтенсивному розростанню ці рослини привертають значну увагу дослідників як перспективні для використання в розробці біологічних методів очистки водойм (фітореMediaції) [22]. Рослини *S. natans* поглинають кадмій, хром, нікель, свинець, цинк з середовища культивування, при цьому ступінь очищення сягає 60 % [9]. Виявлено гіперакумуляцію спорофітами папороті сполук натрію і миш'яку [11], літію [26], ртуті [24], полістирольних нанопластиків [6]. Рослини *S. natans* відрізняються високим рівнем толерантності до дії поллютантів. За помірних концентрацій забруднювачів спрацьовує потужна система детоксикації, зокрема значно активізується антиоксидантна система [3]. Зміни біомаси, швидкості росту і показників фотосинтезу спостерігали лише за високих концентрацій важких металів та металоїдів [8, 10]. Вміст загального білка та хлорофілів *a* і *b* у сальвінії знижувався лише при зростанні концентрацій ртуті в середовищі культивування до високотоксичних [24]. Було виявлено здатність папороті змінювати ростові показники пропорційно до вмісту забруднювачів (кадмію, хрому, міді, нікелю, цинку та миш'яку), що дозволило розробити біотест для фітоіндикації токсичності водного середовища [7]. Наведені відомості свідчать про значний потенціал *S. natans* для фітореMediaції водойм.

Як відомо, ріст, розвиток і репродукцію рослин, а також їхню відповідь на вплив чинників зовнішнього середовища контролює гормональна система. Застосування екзогенних фітогормонів є одним із засобів підвищення стрес-толерантності рослин [17], а одночасне дослідження динаміки ендогенних фітогормонів в онтогенезі папоротей дає відповідь на питання щодо можливості управляти в такий спосіб ще й накопиченням біомаси [16]. Аналіз наявних відомостей стосовно ролі фітогормонів у водних папоротей родини *Salviniaceae* продемонстрував перспективи регуляції їхнього розвитку і явну недостатність інформації з цього питання [19]. З огляду на вищевикладене ми поставили за мету нашої роботи вивчити вплив екзогенних регуляторів росту на накопичення біомаси спорофітів різноспорової однорічної водної папороті сальвінії плаваючої *Salvinia natans* (L.) All. на різних стадіях росту порівняно з динамікою ендогенних фітогормонів.

Матеріал і методика досліджень

S. natans — однорічна плаваюча папороть, широко поширена у прісноводних водоймах регіонів від тропічного до помірного клімату. Спорофіт складається зі стебла та прикріплених до нього гетероморфних вай (рис. 1). Надводні вай мають форму овальних пластинок, які розташовані попарно (зазвичай 6—12 пар у дорослому віці). Занурені вай виглядають як волокнисті пучки завдовжки до 3,5 см, вони виконують функції коріння, проте власне коріння редуковане [13]. Середній розмір рослини — 5—9 см. Плаваючі вай вкриті гідрофобними волосками, які відштовхують воду і надають папороті плавучості [4].



Рис. 1. Спорофіти водної папороті *Salvinia natans*

Рослини збирали в червні та липні в штучних водоймах Деснянського району м. Києва (вул. М. Закревського, Троещина-1) на стадіях інтенсивного та стаціонарного росту, розкладали по 5 штук в ємності з 250 мл профільтрованої води з водойми із додаванням розчинів абсцизової кислоти (АБК) або кінетину до концентрацій 10^{-5} та 10^{-6} М і витримували впродовж 7 діб у вегетаційній камері (VÖTSCH GmbH, ФРН) за температури $+22$ °С, освітлення 190 $\mu\text{M}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, фотоперіоду 16/8 год (день/ніч) та відносної вологості повітря 65 ± 5 %. Контролем слугували рослини, вирощені у воді без добавок. Спорофіти зважували на електронних вагах Sartorius (ФРН) на початку експерименту та через 7 днів зростання, попередньо видаливши воду за допомогою фільтрувального паперу.

Для визначення вмісту ендогенних цитокінінів рослини гомогенізували у метанолі, отриманий екстракт піддавали послідовному очищенню за допомогою фракціонування з бутанолом, центрифугування, іонообмінної хроматографії на колонці зі смолою Dowex 50W \times 8 та тонкошарової хроматографії на пластинках Silufol UV-254 (Kavalier, Чехія) у системі розчинників ізопропанол:аміак:вода (10:1:1 за об'ємом). Більш детально методику виділення і очищення цитокінінів описано раніше [28]. Детектування і кількісний аналіз цитокінінів виконували методом ВЕРХ-МС в системі Agilent 1200 (США). Після градієнтної елюції з колонки Agilent Zorbax Eclipse XDB-C18 column зразки пропускали через УФ-діодноматричний детектор і мас-спектрометр (Agilent 6120 Quadrupole LC/MS) у комбінованому режимі роботи (електроспрей і хімічна іонізація за атмосферного тиску) за позитивної іонізації молекул. Стандарні розчини

транс-зеатину, транс-зеатинрибозиду, ізопентеніладеніну, ізопентеніл-аденозину та транс-зеатин-О-глюкозиду (Sigma, США) використовували як маркери при виконанні всіх хроматографічних процедур. Аналіз і обробку хроматограм проводили з програмним забезпеченням Chem Station, версія В.03.01 у режимі on line [29].

Досліди проводили в триразовому біологічному та п'ятиразовому аналітичному повторях. Результати обробляли статистично ($p \leq 0,05$) з використанням програми Microsoft Excel 2007.

Результати досліджень та їх обговорення

З метою підбору фітогормонів для обробки та визначення їхніх ефективних концентрацій ми провели культивування папороті *S. natans* в присутності АБК, кінетину, індоліл-3-оцтової кислоти (ІОК) та гібереллової кислоти (ГК₃) в концентрації $\times 10^{-5}$ М. Досліди проводили в липні, коли ріст папороті був помірним (стадія стаціонарного росту). Результати, представлені на рисунку 2, засвідчили, що застосована концентрація гормонів є надоптимальною для розвитку папороті, оскільки у більшості випадків спостерігалось гальмування приросту біомаси. Так, за дії АБК, кінетину та ГК₃ приріст знижувався порівняно з контролем відповідно на 66, 48 і 41 %. Лише за впливу ІОК відбувалося незначне накопичення біомаси — до 5 %, в межах похибки експерименту.

Результати, отримані на першому етапі дослідження, показали, що надмірна, нефізіологічна кількість АБК, цитокініну та гібереліну в середовищі культивування, яка на порядок перевищує межі їхнього вмісту в рослинних тканинах, негативно позначається на накопиченні біомаси *S. natans* і не може розглядатися як засіб для стимуляції росту. Цікаво, що цей ефект не залежав від природи фітогормону, за винятком ІОК, до присутності якої папороть демонструвала дуже незначну чутливість. В подальшій роботі ми вивчали дію більш низької і, відповідно, більш природної, фізіологічної концентрації, а саме $\times 10^{-6}$ М, зосередивши увагу на цитокінінах та АБК. Як відомо, ці фітогормони є антагоністами й підсилюючи вплив одне одного, утворюють регуляторну інтегративну підсистему в єдиній гормональній системі рослин, здійснюючи у такий спосіб управління програмами внутрішнього розвитку і відповіді на зовнішні впливи [1]. Крім того, ми припустили, що реакція папороті на дію фітогормонів залежить не тільки від концентрації, але й від стадії росту. Тому у наступних дослідах ми вивчали вплив АБК і кінетину у концентрації $\times 10^{-6}$ М в періоди інтенсивного та помірного росту рослини.

На початку літа (червень) спорофіт *S. natans* інтенсивно зростає, швидко збільшуючись у розмірах внаслідок утворення нових пар вай. На цій стадії розвитку у контрольних умовах (без додавання фітогормонів) біомаса рослин *S. natans* за 7 діб збільшувалася майже втричі (на 294 %). Внесення АБК до розчину культивування спричиняло додаткове стимулювання росту рослин на 15,6 %, а кінетин викликав незначне його інгібування — на 8,5 % (рис. 3, а).

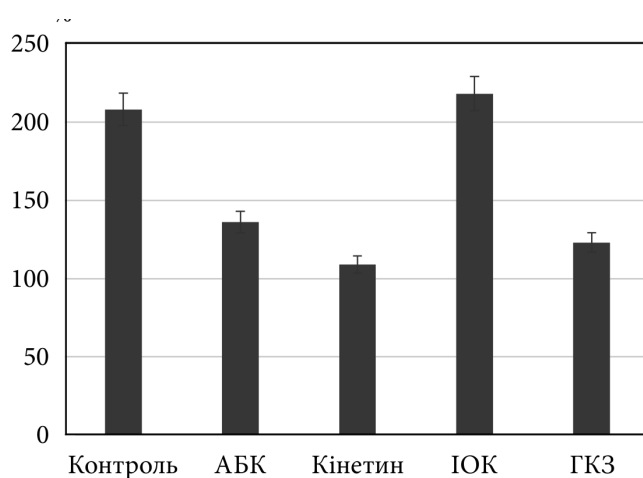


Рис. 2. Приріст біомаси папороті *Salvinia natans* за 7 днів культивування на стадії стаціонарного росту в присутності фітогормонів у концентрації $\times 10^{-5}$ М

До середини літа (липень) темпи зростання спорофіту *S. natans* уповільнювались, ми розглядаємо цей період як стадію стаціонарного росту. У контролі біомаса за 7 днів зростала удвічі. За дії 10^{-6} М АБК приріст біомаси знижувався на 34 %. Кінетин у концентрації 10^{-6} М викликав збільшення приросту біомаси на 74 % (рис. 3, б).

Отже, гормони антагоністичної дії АБК і кінетин в концентрації 10^{-6} М спричиняли протилежний ефект на ріст папороті *S. natans*, причому напрямок дії залежав від стадії розвитку спорофіту. Якщо на стадії інтенсивного росту АБК стимулювала ріст, а цитокінін його пригнічував, то на стадії стаціонарного росту вплив гормонів діаметрально змінювався. Відмінності ростової реакції рослин на обробку фітогормонами на різних стадіях розвитку можна пояснити різним конститутивним гормональним фоном спорофітів, визначення якого було наступним етапом даної роботи.

В наших дослідженнях в період інтенсивного росту *S. natans*, коли на спорофіті утворюються молоді бічні пагони, виявлено високий рівень ендогенних цитокінінів. У плаваючих ваях ідентифіковано *транс*-зеатин, *транс*-зеатинрибозид, ізопентеніладенозин та ізопентеніладенін (рис. 4), а в занурених — *транс*-зеатин. Відомо, що значний сумарний вміст цитокінінів характерний для швидкозростаючих тканин з високим мітотичним індексом [23]. Крім того, ізопентенільні форми цитокінінів є первинними продуктами біосинтезу цих гормонів [15], їх наявність вказує на інтенсивний синтез цитокінінів, необхідних для регуляції активних ростових процесів. Нерівномірний розподіл цитокінінів між плаваючими і зануреними ваями свідчить про функціональну нерівнозначність цих органів. Вірогідно, надводні ваї виконують першочергову роль у продукуванні цитокінінів і регуляції росту всієї рослини.

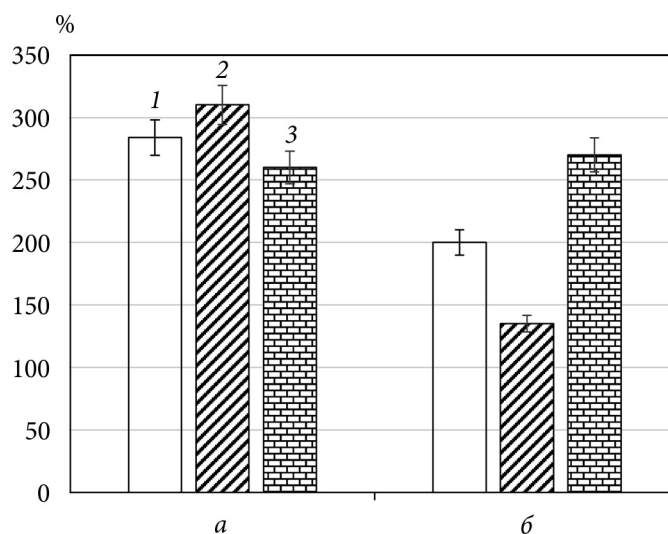


Рис. 3. Приріст біомаси папороті *Salvinia natans* за 7 днів культивування на стадії інтенсивного росту в присутності фітогормонів у концентрації 10^{-6} М (а — стадія інтенсивного росту; б — стадія стаціонарного росту): 1 — контроль; 2 — АБК; 3 — кінетин

Зменшення інтенсивності ростових процесів *S. natans* (стадія стаціонарного росту) супроводжується звуженням спектру цитокінінів до єдиної форми — *транс*-зеатину. Вміст його в надводних ваях збільшився майже в 1.5 рази, а в підводних ваях — зменшився більше ніж удвічі порівняно з попереднім етапом експерименту (рис. 4). Такі зміни свідчать про спад біосинтезу і метаболізму цих гормонів. Проте, оскільки *транс*-зеатин є найбільш активною формою цитокінінів, вочевидь, його акумуляція є необхідною для підтримання росту на певному рівні.

Як відомо, однією з характерних рис функціонування фітогормональної системи є протилежна дія цитокінінів і АБК на різні фізіологічні процеси, такі як продихові рухи, стан спокою бруньок і насіння, старіння листків, реакція на стреси тощо [14]. Взаємодія цитокінінів і АБК відбувається на рівні метаболізму і сигналіngu обох гормонів [12]. Вирішальну роль у регуляції фізіологічних процесів у нормі і при стресах відіграє співвідношення АБК/цитокініни в окремих органах [1], яке змінюється при адаптації рослин до зовнішніх чинників [30]. Отримані в наших досліджах результати стосовно протилежної дії цитокініну і АБК на ріст *S. natans* цілком узгоджуються з даними літератури з цього питання. Той факт, що на різних стадіях розвитку спорофіта *S. natans* вплив фітогормонів носив різний характер, можна пояснити, виходячи з гіпотези щодо чутливості рослинних тканин до гормонів, яка визначається наявністю та активністю відповідних рецепторів [27]. Не виключено, що гормональна компетентність клітин папороті з віком змінюється, як і здатність до біосинтезу гормонів, що відбивається на їхньому ендogenous вмісті.

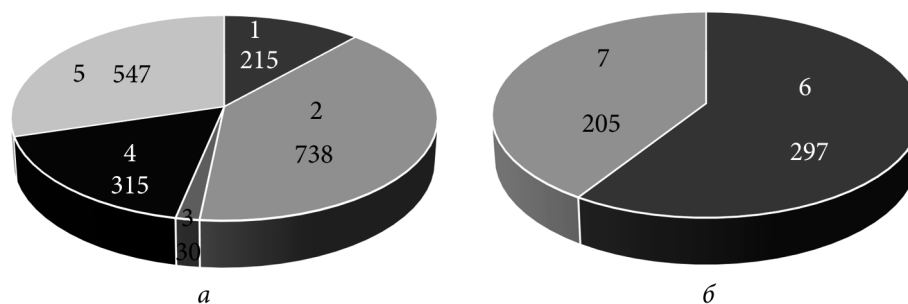


Рис. 4. Вміст ендогенних цитокінінів у надводних плаваючих ваях (↑) і підводних занурених ваях (↓) спорофітів папороті *Salvinia natans* на стадії інтенсивного росту (а) та стадії стаціонарного росту (б), пМ/г маси сирової речовини: 1 — *транс-зеатин*(↑); 2 — *транс-зеатинрибозид*(↑); 3 — *ізопентеніладенозин*(↑); 4 — *ізопентеніладенін*(↑); 5 — *транс-зеатин*(↓); 6 — *транс-зеатин*(↑); 7 — *транс-зеатин*(↓)

При екзогенній обробці цитокінінами в тканинах рослин утворюється надлишок гормону, що перетворюється на *O*- чи *N*-глюкозиди, які є продуктами запасання і деактивації цитокінінів, відповідно [20]. Накопичення цих форм характерно для зрілих старіючих органів. У більш молодих активно ростучих рослин, які синтезують гормони-стимулятори у великих кількостях, надлишок метаболітів цитокінінів, що виникає при екзогенній обробці, сприймається негативно, оскільки порушує внутрішній гормональний баланс, спрямований на підтримку інтенсивного росту. У подальшому, коли синтез цитокінінів зменшується, їхнє надходження зовні дещо компенсує внутрішній дефіцит і сприяє підсиленню росту.

Ефект обробки папороті АБК, як антагоніста цитокінінів, був протилежним. Проте описана вище закономірність мала місце і в даному випадку. Динаміку АБК у спорофітах *S. natans* було описано раніше [2]. На стадії інтенсивного росту папороті вміст АБК у плаваючих ваях був доволі високий, екзогенна АБК при цьому спричиняла незначне накопичення біомаси (див. рис. 3, а). У період стаціонарного росту рівень АБК падав, а додавання цього гормону в середовище культивування мало як наслідок пригнічення накопичення біомаси (див. рис. 3, б). Таку ситуацію можливо пояснити вкрай низькою чутливістю клітин спорофіта до АБК під час інтенсивного росту з подальшим її зростанням внаслідок розблокування генів, які кодують рецептори або інші компоненти сигнального шляху цього гормону [25]. На жаль, система, відповідальна за компетенцію клітин папоротей до фітогормонів та їхній сигналінг, практично не досліджена [21].

Отже, ми продемонстрували можливість управляти об'ємом біомаси водної папороті сальвінія за допомогою природних регуляторів росту. Залежність результату такої обробки від стадії росту є відображенням змін балансу ендогенних фітогормонів, який варіює впродовж літньої ве-

гетації. Отримані нами дані є підтвердженням думки Дж. Бернє, який обґрунтовано вважав, що регуляторна дія фітогормонів проявляється в строго оптимальних концентраціях, специфічних для певних онтогенетичних фаз рослини [5].

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити висновок про регуляторну роль фітогормонів антагоністичної дії — цитокінінів і АБК — у ростових процесах водної папороті *S. natans*. Інтенсивний ріст папороті відбувався на фоні значного вмісту активних форм цитокінінів, спектр і загальний вміст яких суттєво знижувався з уповільненням акумуляції біомаси спорофіта. Результат екзогенної дії фітогормонів залежав від стадії росту, і, очевидно, від балансу ендогенних фітогормонів. Гормони цитокінінової природи можна розглядати як фактор підвищення продуктивності *S. natans* в період уповільнення ростових процесів, що важливо для розробки сучасних методів фіторемедіації антропогенно забруднених водойм.

Список використаної літератури

1. Веденичова Н.П., Косаківська І.В. Цитокініни як регулятори онтогенезу рослин за різних умов зростання. Київ: Наш формат, 2017. 200 с.
2. Войтенко Л.В. Абсцизова кислота / Фітогормональна система та структурно-функціональні особливості папоротеподібних (Polypodiophyta). Київ: Наш формат, 2019. С. 148—165.
3. Alp-Turgut F.N., Yildiztugay E., Ozfidan-Konakci C. et al. Evaluation of the phytotoxicity and accumulation potential of nitro-polycyclic aromatic hydrocarbon, 3-nitrofluoranthene, on water status, photosystem II efficiency, antioxidant activity and ROS accumulation in *Salvinia natans*. *Sci. Total Environ.* 2024. Vol. 954. P. 176335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176335>.
4. Babenko L., Vasheka O., Shcherbatiuk M. et al. Biometric characteristics and surface microstructure of vegetative and reproductive organs of heterosporous water fern *Salvinia natans*. *Flora.* 2019. Vol. 252. P. 44—50. doi: 10.1016/j.flora.2019.02.006
5. Bernier G. My favourite flowering image: the role of cytokinin as a flowering signal. *J. Exp. Bot.* 2013. Vol. 64 (18). P. 5795—5799. <https://doi.org/10.1093/jxb/err114>
6. Chen X., Ma H., Kong C. et al. Bioaccumulation of polystyrene nanoplastics and BDE-209 induced oxidative stress, photosynthesis and growth impairments in floating fern *Salvinia natans*. *Sci. Total Environ.* 2024. Vol. 909. P. 168541. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168541.
7. Cui R., Kwak J.I., An Y.-J. *Salvinia natans* microplate assay: A simple and efficient method for evaluating aquatic toxicity. *Marine Pollut. Bull.* 2022. Vol. 185. Part A. P. 114274. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114274>.
8. Cui R., Kwak J.I., An Y.-J. Understanding boron toxicity in aquatic plants (*Salvinia natans* and *Lemna minor*) in the presence and absence of EDTA. *Aquat. Toxicol.* 2024. Vol. 269. P. 106886. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.106886>.
9. Dhir B., Srivastava S. Heavy metal removal from a multi-metal solution and wastewater by *Salvinia natans*. *Ecological Engineering.* 2011. Vol. 37. P. 893—896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.007>.
10. Dhir B., Srivastava S. Heavy metal tolerance in metal hyperaccumulator plant. *Salvinia natans*. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* 2013. Vol. 90. P. 720—724. <https://doi.org/10.1007/s00128-013-0988-5>.

11. Dolui D., Hasanuzzaman M., Saha I. et al. Amelioration of sodium and arsenic toxicity in *Salvinia natans* L. with 2,4-D priming through physiological responses. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. Vol. 29. P. 9232—9247. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16246-7>
12. El-Showk S., Raili Ruonala R., Helariutta Y. Crossing paths: cytokinin signalling and crosstalk. *Development.* 2013. Vol. 140. P. 1373—1383. <https://doi.org/10.1242/dev.086371>
13. Galka A., Szmeja J. Phenology of the aquatic fern *Salvinia natans* (L.) All. in the Vistula Delta in the context of climate warming. *Limnologica.* 2013. Vol. 43. P. 100—105. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2012.07.001>
14. Huang X., Hou L., Meng J. et al. The antagonistic action of abscisic acid and cytokinin signaling mediates drought stress response in *Arabidopsis*. *Molecular Plant.* 2018. Vol. 11, N 7. P. 970—982. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2018.05.001>
15. Kamada-Nobusada T., Sakakibara H. Molecular basis for cytokinin biosynthesis. *Phytochemistry.* 2009. Vol. 70. P. 444—449. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.02.007>
16. Kosakivska I.V., Babenko L.M., Shcherbatiuk M.M. et al. Phytohormones during growth and development of Polypodiophyta. *Advances in Biology & Earth Sciences.* 2016. Vol. 1, N 1. P. 26—44.
17. Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Babenko L.M. et al. Exogenous phytohormones in the regulation of growth and development of cereals under abiotic stresses. *Molecular Biology Reports.* 2022. Vol. 49, N 1. P. 617—628. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06802-2>
18. Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Shcherbatiuk M.M. et al. Water ferns of Salviniaceae family in phytoremediation and phytoindication of contaminated water. *Biotechnology Acta.* 2022. Vol. 15, N 5. P. 5—23. <https://doi.org/10.15407/biotech15.05.005>
19. Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Voytenko L.V. et al. Phytohormones in the regulation of growth and development of water ferns of Salviniaceae family: a review. *Studia Biologica.* 2023. Vol. 17, N 3. P. 189—210. <https://doi.org/10.30970/sbi.1703.721>
20. Mok D.W.S., Mok M.C. Cytokinin metabolism and action. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 2001. Vol. 52. P. 89—118. <https://doi.org/10.1146/annurev.arpant.52.1.89>
21. Lomin S.N., Savelieva E.M., Arkhipov D.V. et al. Cytokinin perception in ancient plants beyond Angiospermae. *Intern. J. Molecular Sci.* 2021. Vol. 22, N 23. P. 13077. <https://doi.org/10.3390/ijms222313077>
22. Pang Y.L., Quek Y.Y., Lim S., Shuit S.H. Review on phytoremediation potential of floating aquatic plants for heavy metals: A Promising approach. *Sustainability.* 2023. Vol. 15, N 2. P. 1290. <https://doi.org/10.3390/su15021290>
23. Schaller G.E., Street I.H., Kieber J.J. Cytokinin and the cell cycle. *Curr. Opin. Plant Biol.* 2014. Vol. 21. P. 7—15. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.05.015>
24. Sitarska M., Traczewska T., Hołtra A. et al. Removal of mercury from water by phytoremediation process with *Salvinia natans* (L.) All. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. Vol. 30. P. 85494—85507. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27533-w>
25. Spartz A.K., Gray W.M. Plant hormone receptors: new perceptions. *Genes Dev.* 2008. Vol. 22, N 16. P. 2139—2148. <https://doi.org/10.1101/gad.1693208>
26. Török A.I., Moldovan A., Kovacs E. et al. Lithium accumulation in *Salvinia natans* free-floating aquatic plant. *Materials* (Basel). 2022. Vol. 15, N 20. P. 7243. <https://doi.org/10.3390/ma15207243>
27. Trewavas A.J. Growth substances sensitivity: the limiting factor in plant development. *Physiol. Plant.* 1982. Vol. 55. P. 60—72. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1982.tb00285.x>
28. Vedenicheva N.P., Al-Maali G.A., Mytropolska N.Yu. et al. Endogenous cytokinins in medicinal basidiomycetes mycelial biomass. *Biotechnol. Acta.* 2016. Vol. 9. P. 55—63. <https://doi.org/10.15407/biotech9.01.055>

29. Vedenicheva N., Futorna O., Shcherbatyuk M., Kosakivska I. Effect of seed priming with zeatin on *Secale cereale* L. growth and cytokinins homeostasis under hyperthermia. *J. Crop Improvement*. 2022. Vol. 36. P. 656—674. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.2000909>

30. Wei Y., Javed T., Liu T.-T. et al. Mechanisms of abscisic acid (ABA)-mediated plant defense responses: An updated review. *Plant Stress*. 2025. Vol. 15. P. 100724. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100724>

Надійшла 30.03.2025

N.P. Vedenychova, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Leading Researcher,
M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine,
Tereshchenkivska Str., 2, Kyiv, 01601, Ukraine
e-mail: vedenicheva@ukr.net
ORCID 0000-0002-0579-0342

INVOLVEMENT OF PHYTOHORMONES IN THE REGULATION OF WATER FERN
SALVINIA NATANS (L.) ALL. GROWTH

The effect of exogenous phytohormones on the accumulation of biomass of the aquatic floating fern *Salvinia natans* (L.) All., as well as the content of endogenous phytohormones of the cytokinin class during the period of intensive and stationary growth, was studied. It was found that the effect of adding growth-regulating substances to the plant cultivation medium depended on their concentration and growth stage, and probably on the balance of endogenous phytohormones. Kinetin and ABA had opposite effects on fern biomass accumulation, and the direction of this effect also varied depending on the intensity of growth processes. The regularities of the effect of these phytohormones at different stages of growth are discussed in connection with the dynamics of endogenous cytokinins and ABA in sporophytes. Cytokinin hormones can be considered as a factor in increasing the productivity of *S. natans* during the period of slowing down of growth processes, which is important for the development of modern methods of phytoremediation of anthropogenically polluted water bodies.

Key words: *Salvinia natans*, water fern, cytokinins, abscisic acid, growth regulation.