

Ковшар І.Д.,
здобувач вищої освіти освітнього ступеня «доктор філософії»
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
Науковий керівник: Стабніков В.П.,
д.т.н., проф., професор кафедри біотехнології і мікробіології,
Національний університет харчових технологій
irynakovshar@ukr.net

РОСЛИНИ ЯК ПОТЕНЦІЙНЕ ДЖЕРЕЛО КРЕМНІЮ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА

Вступ. Традиційний цемент широко використовується у будівництві та для закріплення ґрунтів через його відносно низьку вартість та високу міцність і вважається другим найбільш споживаним матеріалом у світі після води. Виробництво цементу потребує великих витрат електроенергії (приблизно 2,6% світового споживання енергії) та супроводжується виділенням 0,73 – 0,99 т вуглекислого газу (CO₂) на тонну утвореного цементу, що складає 8,0 - 8,6% від глобальних антропогенних його викидів [1]. Потрапляння парникових газів у атмосферу обумовлює глобальне потепління і вносить свій вклад у зміну клімату, що є однією з найважливіших світових екологічних проблем. Для зниження викидів вуглекислого газу запропоновано біотехнологічне виробництво біоцементу за допомогою уреазопродукуючих бактерій [2]. Іншим шляхом може стати часткова заміна Портланд цементу та інших цементуючих матеріалів біо-кремнієм, джерелом якого може стати рослинна біомаса [3]. Використання рослинної сировини збагаченою кремнієм у виробництві цементу дозволяє одержати новий екологічний матеріал для будівництва і захистити довкілля.

Результати досліджень. Процес виробництва біоцементу включає два етапи. На першому етапі органічні залишки спалюються для отримання золи, що містить хімічно активний біокремнезем. На другому етапі отримана зола змішується з портландцементом для отримання біоцементу. Si (кремній, кремнезем) є другим за поширеністю елементом на цій землі після кисню. Різноманітні рослинні культури накопичують кремній із ґрунту. Неістивні частини рослини можуть містити кремнезем, який можна використовувати для виробництва нових екологічних будівельних матеріалів [3].

Монокремнієва кислота (H₄SiO₄) — це форма кремнію, яка зазвичай міститься в ґрунтових водах у концентраціях від 0,1 до 0,6 мМ і використовується рослинами для акумуляції Si. На вміст H₄SiO₄ у ґрунті впливає його рН та кількість глини, мінералів, органічної речовини та присутності оксидів/гідроксидів Fe/Al. Внесення добрив може швидко збільшити вміст H₄SiO₄ у ґрунті [4].

Існують різні механізми за допомогою яких кремній поглинається рослинами, а саме активний, пасивний і відкидний. Найвищі кількості акумуляованого кремнію спостерігаються при активному механізмі його поглинання рослинами. Вважається, що пасивний механізм поглинання повністю залежить від потоку ґрунтових вод та їх біохімічного складу. Останній механізм поглинання (відхилення) зазвичай результує в найнижчих кількостях акумуляованого кремнезему у рослинах.

Рослини, які використовують активний механізм поглинання Si, зазвичай накопичують кремній в пагонах. Його кількість коливається від 1,0 % до 10 % від сухої маси рослини. Представниками, що використовують такий метод акумуляції, є переважно однодольні рослини, такі як бамбук (*Bambuseae*), ячмінь (*Hordeum vulgare*), рис (*Oryza sativa*), сорго (*Sorghum bicolor*), цукрова тростина (*Saccharum officinarum*) і пшениця (*Triticum aestivum*). Завдяки активній механізму накопичення кремнію, що поглинається рослиною з ґрунту, його кількість у декілька разів перевищує вміст деяких основних макро- чи мікроелементів. Наприклад, накопичення кремнію може вдвічі перевищувати кількість азоту в рисі, хоча азот є важливим елементом для росту та розвитку більшості рослин. У вищих рослинах (покритонасінних) лише деякі таксони такі як *Cyperaceae*, *Poaceae* і *Balsaminaceae* демонструють високе (>4%) накопичення Si, а помірне (2–4%) накопичення Si спостерігається у *Cucurbitales*, *Urticales* і *Commelinaceae*. Філогенетичні дослідження показують, що різниця в існуванні, щільності, локалізації білків, пов'язаних з транспортом кремнію, мають вагомий вплив на накопичувальну здатність рослин [4].

Рослини, що мають пасивний механізм накопичення кремнію – це переважно злаки посушливих земель (наприклад, ковила та костриця). Приблизна кількість кремнію, яку вони накопичують в пагонах становить від 0,5 % до 1,5 % сухої маси рослини. Низьке накопичення кремнію в цій групі рослин пояснюється відсутністю специфічних транспортерів для полегшення радіального транспорту та завантаженням кремнію в ксилем. Для таких рослин транспортування кремнію в клітину здійснюється через механізм пасивної дифузії. Пізніше було показано, що як активне, так і пасивне поглинання кремнію, може бути притаманним для однієї рослини, наприклад, соняшнику та восковому гарбузу [4]. Деякі види рослин, такі як китайська капуста (*Brassica rapa*), конюшина малинова (*Trifolium incarnatum*), кава (*Coffea*), зелена цибуля (*Allium cepa*), перець (*Capsicum*), редис (*Raphanus sativus*) і помідори (*Solanum lycopersicum*) накопичують більше кремнію в коренях, ніж у пагонах [5].

Поглинений кремній у вигляді H₄SiO₄ транспортується через ксилему та осідає на епідермальних поверхнях листя, де він конденсується в твердий полімеризований силікагель (SiO₂×nH₂O), також відомий як фітоліт. Поглинений кремній переважно відкладається в абаксіальному епідермісі, але в міру зростання листка відкладення відбувається в епідермісі. У пшениці кремній накопичується у всіх тканинах, але високі концентрації виявлені у внутрішніх тангенціальних і радіальних стінках ентодермісу. Фітоліти зазвичай зустрічаються в рослинах в епідермісі листя та зовнішньому покриві насіння та плодів, епідермісі приквітков, які оточують і захищають насіння трав, а також у субепідермісі листя орхідей і пальм. Фітоліти класифікують як біогенний опал (зв'язок Si-O-Si). Преципітація SiO₂ в рослинах відбувається при концентраціях H₄SiO₄ більше ніж 2 моль м⁻³ і відбувається переважно

в епідермісі пагонів. Відкладений кремнезем є нерухомим і не переноситься на активно зростаючі або меристематичні тканини. Транспірація (рух води по рослині та її випаровування) залишається як один із основних чинників транспортування та відкладення кремнію в рослинах, тому, тривалість росту рослин суттєво впливає на концентрацію кремнію. Наприклад, старе листя містить більше кремнію, ніж молоде листя. Згідно з сучасними дослідженнями, $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ потенційно може зв'язуватись з органічними компонентами. Але також потрібно зазначити, що цей компонент може знаходитись в клітинах рослин і в своїй звичайній формі. Наприклад, в ексудатах ксилеми рису та пшениці були виявлені лише моно- та дикремнієві кислоти, але не кремнійорганічні комплекси [5].

Роль кремнію в рослинах полягає у безлічі ефектів, який він надає: змінення експресії захисних ферментів і метаболітів, збільшення відкладення фітоліту, зміни швидкості транспірації, асиміляції вуглекислого газу і підвищення активності антиоксидантних ферментів. Спираючись на всі ці ефекти, кремній знижує потенційний абіотичний та біотичний стрес на рослини [6]. Si здатний підвищувати стресостійкість і зменшувати пошкодження мембран у томатів (*Solanumly copersicum*) і шпинату (*Spinacia oleracea*). Також, кремній допомагає пшениці (*Triticum spp.*) подолати окисне пошкодження під час стресу від посухи та борошнистої роси. Кремній також сприяє підвищенню посухостійкості сорго, рису для посилення опіку оболонки (*Rhizoctonia solani*) і стійкості до ураження хворобами, цукрової тростини (*Saccharum officinarum*) до зниження чутливості до *Eldana saccharina*, ячмінь та огірок (*Cucumis sativus*) для підвищення стійкості до солі та кукурудзи (*Zea mays subsp. mays*) для підвищення стійкості до кадмію, зниження токсичності алюмінію та підвищення ефективності використання води [7].

Кремній впливає на поглинання, розподіл і функціональність кількох мінеральних поживних речовин у рослинах. Можливо, завдяки різним ефектам кремній по-різному змінює поглинання та асиміляцію поживних речовин різними видами рослин. Існує також припущення, що додавання кремнію посилює транслокацію транспортних молекул, таких як цитрат, що може сприяти транспортуванню металу від кореня до пагону та зменшить симптоми дефіциту [7].

Висновки. Кремній є важливим елементом для росту та розвитку рослин, що характеризує його висока функціональність у питанні подолання біотичного та абіотичного стресу. Використовуючи різні механізми поглинання, рослини можуть асимілювати кремній з ґрунту та ґрунтових вод. Для підвищення накопичення кремнію в рослинах можливо вносити в ґрунт специфічні добрива. На кінцевий вміст кремнію в рослинному матеріалі впливає вид рослини, механізм поглинання кремнію, біохімічний склад рослини та багато інших факторів. Кремній, який одержується з рослин, може стати гарною альтернативою звичайному кремнію, тим самим підвищуючи ступінь екологічності нових будівельних матеріалів і зберігаючи чистоту навколишнього середовища.

Список використаних джерел

1. Stabnikov V., Stabnikov D., Udyomovych V. (2022). Increase the ecological safety of the soil biogrouting using plant urease. Ukrainian Food Journal, 11(2), 302–314. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2022-11-2-10>
2. Ivanov V., Stabnikov V. (2017). Construction Biotechnology: Biogeochemistry, Microbiology and Biotechnology of Construction Materials and Processes. Springer Science+Business Media, Singapore, 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1445-1>
3. Yan G. C., Nikolic M., Ye M. J., Xiao Z. X., Liang Y. C. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. Journal of Integrative Agriculture, 17(10), 2138-2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)
4. Tubaña B. S., Babu T., Datnoff L. E. (2016). A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. Soil science, 181(9/10), 393-411. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000179>
5. Frew A., Weston L. A., Reynolds O. L., Gurr G. M. (2018). The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. Annals of botany, 121(7), 1265-1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
6. Greger M., Landberg T., Vaculik M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. Plants, 7(2), 41. <https://doi.org/10.3390/plants7020041>