▣ ОГЛЯДОВІ СТАТТІ

УДК 615.012

КЛІТИННО-БІОЛОГІЧНІ ТА МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧНІ ЕФЕКТИ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ У РОСЛИН

С.В. ПРИЛУЦЬКА [1*], Д.В. ФРАНСКЕВИЧ [2], А.І. ЄМЕЦЬ [3]

[1] Національний університет біоресурсів і природокористування України, 03041, Україна, Київ, вул. Героїв Оборони, 15
[2] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, Україна, Київ вул. Володимирська, 64
[3] ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», 04123, Україна, Київ, вул. Осиповського, 2А
E-mail: psvit_1977@ukr.net*, dashaqq@gmail.com, yemets.alla@nas.gov.ua

Узагальнено сучасні дані літератури про біологічні ефекти вуглецевих наноматеріалів (ВНМ), таких як C_{60} фулерен, одношарові та багатошарові нанотрубки, графен, оксид графену, у системах in vitro та in vivo рослин. Проаналізовано взаємодію ВНМ з рослинними клітинами/організмами, їх внутрішньоклітинну локалізацію та потенційні механізми дії. Виявлено, що за дії ВНМ поліпшується проростання насіння, ріст коренів і пагонів, збільшується біомаса різних видів однодольних і дводольних рослин. Негативна дія ВНМ на ріст і розвиток рослин спостерігається лише за високих доз, залежить від типу ВНМ та особливостей умов експозиції. Завдяки нанорозмірності та гідрофобним властивостям ВНМ здатні проникати у клітини рослин як енергетично залежним, так і енергетично незалежним шляхом, накопичуватися переважно у пластидах, вакуолях та ядрі, що визначає захисну і таргетну дії ВНМ. Механізми захисної дії ВНМ ґрунтуються на антиоксидантних властивостях вуглецевих молекул та супроводжуються зміною експресії генів, які відповідають, зокрема, за клітинні процеси, метаболічні процеси та відповідь на дію абіотичних чинників. Позитивний вплив ВНМ на продуктивність рослин, стійкість до окисного стресу, а також їх висока ефективність за низьких діючих концентрацій та екологічна безпечність свідчать про перспективу їх використання як регуляторів фізіологічного стану, росту і розвитку вищих рослин.

Ключові слова: *C_{60} фулерен, графен, оксид графену, одношарові та багатошарові нанотрубки, рослини, фітотоксичність.*

© С.В. ПРИЛУЦЬКА, Д.В. ФРАНСКЕВИЧ, А.І. ЄМЕЦЬ 2022

Вступ

Загальновідомо, що рослини є джерелом їжі і ліків, транспортерами кисню в навколишнє середовище тощо. Крім того, рослини можуть у великих кількостях накопичувати наночастинки, що визначає їх переміщення в ланцюзі харчування, і в кінцевому етапі надходження в організм людини. З іншого боку, нанотехнології можуть бути використанні для підвищення врожайності та індукції стресостійкості сільськогосподарських рослин до біотичних та абіотичних факторів навколишнього середовища.

Швидкий прогрес нанотехнологій призвів до використання вуглецевих наночастинок (ВНЧ) у різних галузях промисловості. Так, нанотрубки і графени використовують у мікроелектроніці та оптиці для створення сонячних та електричних батарей, оптичних пристроїв, провідників, квантового комп'ютера, молекулярних перемикачів, замінників кісткової тканини, а також для очистки біологічних забруднень (Buzaneva et al, 2002; Warheit, 2004; Upadhyayula et al, 2009; Lacerda et al, 2012; Serag et al, 2013: Sukhodub et al, 2018).

Фулерени та їх водорозчинні похідні використовують в біології, медицині та фармації для цілеспрямованої доставки ліків, тераностики тощо (Kostarelos et al, 2007; Scharff et al, 2008; Cui et al, 2010; Prylutska et al, 2010; Ali-Boucetta et al, 2011; Zhang et al, 2011; Grebinyk et al, 2019; Prylutska et al, 2019; Grebinyk et al, 2021). ВНЧ використовуються у фотолюмінесцентній детекції білків та селективних біомо-

лекул (Cherukuri et al, 2004; Heller et al, 2005; Cherukuri et al, 2006; Leeuw et al, 2007; Jin et al, 2008; Welsher et al, 2008), як польові транзистори для селективного виявлення активності оксидази, дегідрогенази та багатьох інших ферментів і біомолекул, хоча з деякими обмеженнями (Byon et al, 2006; Kim et al, 2007).

Останнім часом значний інтерес викликають дослідження взаємодії різних типів і структур наночастинок (НЧ) з рослинами та їх використання в сільському господарстві (Galbraith, 2007; Torney et al, 2007; Liu et al, 2009; Khodakovskaya et al, 2013; Lahiani et al, 2015; Rico et al, 2015; Lahiani, 2016).

Завдяки унікальним властивостям наноматеріали (НМ) можуть використовуватися як пестициди (Hamdi et al, 2014), стимулятори проростання насіння та росту рослин (Khodakovskaya et al, 2012; Lahiani et al, 2013), а також транспортери гербіцидів, добрив, ДНК та фі-тогормонів в клітини рослин (Bianco et al, 2005; Torney et al, 2007; Nima et al, 2014; Burlaka et al, 2015; Burlaka et al, 2016; Sakhno et al, 2020; Burlaka et al, 2011; Burlaka et al, 2015a).

Відомо, що біологічна відповідь та ефекти застосування НМ залежать від їх специфічних властивостей, таких як розмір (Chithrani et al, 2006; Prylutska et al, 2008; Albanese et al, 2012; Jiang et al, 2014), форма (Albanese et al, 2012), концентрація (Rico et al, 2015) і хімія поверхні (Albanese A et al, 2012; Villagarcia et al, 2012). Показано, що клітини ссавців поглинають НЧ золота і кремнезему, одношарові вуглецеві нанотрубки (ОВНТ) або квантові точки діаметром 50 нм (Jin et al, 2009; Chithrani et al, 2006). З іншого боку, функціональні групи на поверхні НЧ можуть взаємодіяти з негативно зарядженими гепарансульфатними протеоглікановими групами на зовнішній поверхні клітин і згодом проникати в клітину. Отже, фізико-хімічні властивості можуть посилювати або затримувати спонтанний ендоцитоз НМ. Показано, що малорозмірні, витягнутої форми та позитивно заряджені НЧ мають переваги щодо проникнення у клітини ссавців, порівняно з великими та незарядженими НЧ (Nazarenus et al, 2014).

Відомості про фітотоксичну дію ВНЧ, їх взаємодію з рослинними клітинами/організмами, механізми взаємодії і ефекти ВНЧ в агросистемах є нечисленні та суперечливі. Тому нами було проаналізовано існуючі на сьогоднішній день дані щодо фітотоксичної дії ВНЧ, їх внутрішньоклітинної локалізації та можливих ефектів у рослин.

Вплив вуглецевих наноматеріалів на рослини у біологічних системах *in vitro* та *in vivo*

Відомо, що біологічна дія будь якої речовини залежить від структури, розміру, форми, поверхневого заряду, концентрації, умов та шляхів її введення. Важливою складовою, яка визначає біологічні ефекти речовини є, звичайно, вивчення їх токсичних властивостей, оскільки токсичні ефекти супроводжуються змінами фізіологічного і біохімічного стану рослин і призводять до негативного впливу на весь організм в цілому, а також на оточуюче середовище.

Показано, що ВНЧ в експериментах *in vitro* та *in vivo* активують клітинний поділ, проростання та ріст рослин (Lahiani et al, 2016). Так, після 30 діб інкубації культури калюсу тютюну за присутності багатошарових вуглецевих нанотрубок (БВНТ) і графену за концентрації 50 мкг/мл значно зростала сира та суха маса калюсу на 35 і 33 % відповідно порівняно з контролем. Показники схожості насіння томатів (на 5 добу) та середня довжина коренів проростків томату (на 20 добу) після обробки 50 та 100 мкг/мл БВНТ або графену були достовірно вищими порівняно з контрольними зразками.

Раніше автори (Khodakovskaya et al, 2012) продемонстрували, що ВНЧ активують ріст клітин тютюну у культурі (на 16 %) за низьких концентрацій (5 мкг/мл) і викликають токсичність за досить високих доз (100 і 500 мкг/мл). ОВНЧ і БВНТ посилювали калюсогенез до 55 і 78 % відповідно.

Водорозчинне похідне C_{60} фулерену з 12 залишками гліцину у діапазоні концентрацій від 20 до 50 мкг/мл не спричиняло токсичної дії на клітини зелених мікроводоростей *Chlamydomonas reinhardtii* (WT 2137) P. A. Dang. (*Volvocales, Chlorophyceae*) і стимулювало накопичення пігменту (каротиноїдів, хлорофілів *a*, *b* або загального) у культурі *C. reinhardtii* (Lang, et al, 2009).

Встановлено, що C_{60} фулерен за концентрації 10 мг/л не впливав на фізіологічні та

біохімічні показники ячменю (*Hordeum vulgare* L., сорт Якуб) у гідропонній культурі (у дистильованій воді або живильному розчині Кнопа), однак, за концентрації 50 мг/л C_{60} фулерену вміст хлорофілу та флавонолів у першому листку зменшувався, відносна втрата води листками зростала, ріст ячменю, а саме рослин, вирощених у воді, уповільнювався (Molchan et al, 2021). Після додавання до розчину Кнопа C_{60} фулерену за концентрації 50 мг/л підвищувався вміст хлорофілу, зростала суха маса пагонів, індекс азотистого балансу характеризувався пролонгованим зростанням. Автори припустили, що відмінності між чутливістю рослин до C_{60} фулерену під час їх росту у воді та живильному розчині Кнопа залежать від анатомо-морфологічних та фізіолого-біохімічних особливостей рослин, активності механізмів детоксикації, зміни фізико-хімічних властивостей НЧ у розчині солей і активізації доставки поживних речовин.

Автори (Panova et al, 2015) показали, що полігідроксифулерен (14 мг/л фулерол або фулеренол) після додавання в живильне середовище стимулював ріст коренів ячменю (*Hordeum vulgare* L.) переважно шляхом збільшення розтяжності клітинних стінок у зоні росту.

Було виявлено, що БВНТ за високих концентрацій − 2000 мг/л − не впливали на проростання насіння різних рослин (Lin et al, 2007) та кореня пшениці (Wild et al, 2009). За дії БВНТ зменшувалася біомаса гарбуза звичайного, *Cucurbita pepo* (Stampoulis et al, 2009). ВНЧ посилювали ріст коренів огірків і насіння цибулі, але негативно впливали на проростання томату, салату, моркви та капусти (Cacas et al, 2008). Проте БВНТ у діапазоні концентрацій 10−40 мг/л впливали на проростання насіння томатів (Khodakovskaya et al, 2009). ОВНЧ спричиняли токсичні ефекти у рису та *Arabidopsis*, що призводило до загибелі ~ 25 % протопластів через 6 год (Shen et al, 2010).

За використання протопластів *Nicotiana tabacum* авторами (Бурлака та ін, 2015б) було продемонстровано, що ступінь пошкодження рослинних протопластів під дією ВНТ не залежить від типу молекул, використаних для функціоналізації нанотрубок. Показано нижчий рівень пошкодження протопластів внаслідок обробки ОВНТ у порівнянні з наслідками обробки БВНТ. У концентрації 1 мкг/мл ВНТ не знижували показник виживання протопластів. Використання одношарових та багатошарових ВНТ у концентраціях 20 і 15 мкг/мл, відповідно, асоційоване із зниженням рівня виживання протопластів до 75 %, порівняно із 90 %-вим рівнем виживання у контролі. За дії одношарових та багатошарових ВНТ у концентраціях вище 60 мкг/мл пошкоджувалася більшість протопластів.

Досліджено вплив БВНТ за концентрацій 0,100 та 1000 мг/л на проростання і ріст сої (*Glycine max* (L.) Merr.), квасолі звичайної (*Phaseolus vulgaris* L.) та кукурудзи (*Zea mays* L.) (Zaytseva et al, 2016). Насіння обробляли ВНМ упродовж 36 год після посіву до появи коренів у досліджуваних рослин. Встановлено, що за обробки насіння БВНТ проростання насіння збільшувалось на 30 % і швидкість поглинання води зменшувалася, зокрема у сої. Поглинання нітратів було нижчим у рослин, попередньо оброблених БВНТ, що в основному може бути пов'язано з особливостями кореневої системи. Ефекти БВНТ залежали від концентрації, тривалості обробки та стадії розвитку рослини, включаючи проростання і розвиток проростків.

Автори (Panova et al, 2018) показали, що водорозчинні похідні фулеренолу та аддукти C_{60} фулерену з такими амінокислотами, як треонін, лізин, аргінін та гідроксипролін, спричиняли збільшення маси листя, стебел і коренів у ярої пшениці та ячменю у двох вегетаційних експериментах за контрольованих умов (аерований живильний розчин, фотоперіод для росту рослин) після обробки ними рослин.

Вміст і активність рослинних гормонів вважаються важливим фактором для нормального росту та розвитку рослин (Blume et al., 2012). Так, автори (Hao et al, 2016) продемонстрували, що після обробки БВНТ за концентрацій 10, 50 і 300 мг/л концентрація фітогормонів: індол-3-оцтової кислоти (ІОК), гіберелової кислоти (ГА) та ізопентеніл-аденозин (ІРА) в коренях і пагонах рису (*Oryza sativa* L.) знижувалася, що вказує на те, що ВНТ можуть пригнічувати ріст рослин шляхом інгібування висоти та приросту біомаси рослин.

Крім того, автори (Lahiani et al, 2013) продемонстрували збільшення біомаси до ~54 % за дії ВНЧ у рослинах, що підтверджує поглинання рослинами ВНЧ та їх транслокацію.

Отже, літературні дані про фітотоксичну дію ВНМ є суперечливими і характеризуються дозо- та часозалежними ефектами, а також залежать від об'єктів дослідження та обраної рослинної моделі (насіння, проростки, тощо). Вплив ВНМ на рослини узагальнено у таблиці.

Механізми проникнення та внутрішньоклітинна локалізація вуглецевих наноматеріалів у рослинах

Механізми взаємодії ВНЧ з рослинами є недостатньо вивчені. Відомо, що проникнення і внутрішньоклітинна локалізація ВНЧ у рослинах залежить від їх фізичних і хімічних властивостей і особливо від розміру.

Автори (Lin et al, 2009) показали, що фулерени та фулероли поглиналися проростками рису (*O. sativa*), вирощеними в гідропонній культурі, і переміщувалися через корінь до пагонів і листя. Було виявлено накопичення C_{70} фулерену у тканинах судин, навколишніх клітинах та міжклітинному просторі. C_{60} фулерен виявлено у кореневій системі сої (*G. max*), томатів (*S. lycopersicum*), а також у коренях і пагонах гарбуза (*C. pepo*) (De La Torre-Roche et al, 2012). Також відомо про накопичення $^{14}C_{60}$ фулерену у редисі (*Raphanus sativus*), вирощеного упродовж 2 тижнів у піщаному субстраті та гідропонній культурі (Avanasi et al, 2014).

За допомогою раманівської спектроскопії виявлено накопичення ВНЧ у репродуктивному органі томата (Khodakovskaya et al, 2011). ВНЧ можуть поглинатися рослинами через корінь і розподілятися в надземних частинах, а також не виключається здатність ВНЧ транспортуватися по рослинному організмі завдяки капілярному руху (Wild et al, 2009).

Було виявлено, що БВНТ можуть проникати через насінну шкірку насіння ячменю, сої та кукурудзи (Lahiani et al, 2013). БВНТ проникали також в насіння томатів і локалізувалися в ендоспермі. Таке проникнення ВНЧ всередину рослинних тканин було підтверджено за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії та раманівської спектроскопії.

Виявлено накопичення БВНТ в зародковій тканині насіння сої без видимих ознак механічного пошкодження насінної шкірки (Zaytseva et al, 2017). БВНТ накопичувалися, зокрема, в клітинах кінчика кореня. Їх скупчення також виявлено поблизу меристеми кореня. БВНТ було виявлено не лише в клітинних стінках, а переважно у вигляді множинних гранульованих агломерацій, що заповнювали весь вміст клітини.

ВНЧ можуть накопичуватися в тканинах рослин і використовуватися при синтезі вуглець-вмісних біоорганічних сполук. Показано, що частинки вуглецю великого розміру не можуть проникати в рослинну клітину і тому можуть лише адсорбуватися на її поверхні (Lin et al, 2009). Якщо розмір вуглецевої наночастинки занадто малий, то вона може дифундувати через стінку рослинної клітини (Serag et al, 2013). Було продемонстровано, що ОВНТ, мічені флуоресцеїн ізотіоціанатом (FITC), проникали через клітинну стінку живих рослин і поглиналися клітинами *Nicotiana tobacum* L.cv. лінії BY-2 шляхом ендоцитозу (Samaj et al, 2004; Liu et al, 2009).

Було показано, що ОВНЧ здатні проникати як через клітинну стінку, так і через клітинну мембрану тютюну та *Catharanthus* (Liu et al, 2009; Serag et al, 2011; Serag et al, 2012). За допомогою конфокальної мікроскопії було показано, що ОВНТ, мічені FITC, локалізовалися лише у вакуолях (Liu et al, 2009). За використання просвічуючої електронної мікроскопії було встановлено, що БВНТ можуть накопичуватися у субклітинних органелах рослинних клітин, зокрема у пластидах, вакуолях та ядрі (Serag et al, 2013).

Таким чином, ВНЧ здатні проникати через клітинну стінку рослин шляхом активного або пасивного транспорту, локалізуватися у клітинах рослин і накопичуватися у органелах.

Вуглецеві наноматеріали як наноплатформа доставки поживних речовин

У сільському господарстві наразі існує гостра проблема із застосуванням агрохімікатів, які неконтрольовано, і за високих доз, у нестабільному стані використовуються. Тому, пропонується використовувати нетоксичні або низь-

котоксичні сполуки у комплексі з наночастинками з метою підвищення ефективності мінеральних добрив та їх таргентної доставки. Смарт наноплатформа доставки агрохімікатів та органічних молекул у клітини рослин є потенційним застосуванням нанобіотехнології, яка базується на здатності ВНМ проникати через клітинні стінки та мембрани клітин рослин (Liu et al, 2009).

Автори (Giraldo et al, 2014) повідомили про можливість доставки ОВНТ і наночастинок церію в ізольовані хлоропласти. Ці наночастинки, пасивно проникаючи через мембрану хлоропластів за допомогою дифузії, впливали на фотосинтетичну активність, транспортуючи у фотосинтетичний ланцюг електрони.

За допомогою атомно-абсорбційної спектрометрії продемонстровано значну адсорбцію мікроелементів (Zn, Mn, Cu) у насінні сої (*Glycine max*), обробленому БВНТ (1000 мг/л), що може бути використано для регулювання гомеостазу мікроелементів у рослин (Zaytseva et al, 2017). Було доведено синергічну дію добрив, що містили вуглець, і покращення доступності поживних речовин для рослин (Gogos et al, 2012).

Вплив вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) на рослинні об'єкти

Об'єкт	ВНМ	Концентраціїмг/л	Термін дії, доба
Огірок, цибуля	ОВНТ	28, 160, 900, 5000 мг/л	2–3 доби
Томат, салат	ОВНТ	28, 160, 900, 5000 мг/л	2–3 доби
Томат	ОВНТ	50 мг/л	10 діб
Ячмінь, кукурудза, соя	БВНТ	50, 100, 200 мг/л	10 діб
Томат	ОВНТ	10, 20, 40 мг/л	20 діб
Тютюн	ОВНТ	1, 15, 30, 45, 60, 75 мкг/мл	24 доби
Пшениця, ріпак	БВНТ	1000 мг/л	7 діб
Арабідопсис	БВНТ	10, 60, 100, 600 мг/л	7 діб
Чабер	БВНТ	25, 50, 100, 250, 500 мг/л	21 доба
Томат	БВНТ	50, 100, 200 мг/л	10 діб
Червоний шпинат	БВНТ	125, 1000 мг/л	15 діб
Цибуля	БВНТ	5, 20, 50 мг/л	24 год
Огірок, рис, салат, червоний шпинат	БВНТ	20, 200, 1000, 2000 мг/л	15 діб
Рис	БВНТ	20 мг/л	6 діб
Пшениця	БВНТ	10, 20, 40, 80, 160 мг/л	7 діб
Тютюн	БВНТ	1, 15, 30, 45, 60, 75 мкг/мл	24 год
Пшениця, рис, огірок, мааш	C_{60}	10–500 мг/л	5–12 діб
Арабідопсис	Малонатне похідне фулерену $C_{70}(C(COOH)_2)_{4-8}$)	0,005–0,2 мг/л	5 діб
Фітопланктон	nC_{60}	0,09 мг/л	3 доби
Ряска	C_{60}	2–16 мг/л	7 діб
Редька	C_{60}	34 мкг	14 діб
Гарбуз	C_{60}	1670 мг/кг грунту	21 доба
Зелені водорості, арабідопсис	Фулерол	1–200 мг/л	3 доби
Диня	Фулерол	0,943, 4,72, 9,43, 10,88, 47,2 нМ	2 доби
Квасоля	Оксид графену	400, 800 мг/л	До проростання насіння
Томат	Графен	40 мг/л	11 діб

Разом з цим, важливим завданням є аналіз можливих токсичних впливів вуглецевих наноматеріалів на рослини.

Механізми фітотоксичності вуглецевих наноматеріалів

Відомо, що механізми цитотоксичної дії реалізуються шляхом індукції окисного стресу, який спричинений надмірним утворенням активних форм кисню (АФК). Високий рівень АФК може призвести до пошкодження ДНК в ядрі, хлоропластах і мітохондріях (Imlay et al, 1988), окислення білків, витоку електролітів, перекисного окислення ліпідів і пошкодження мембран, що врешті спричиняє загибель клітин (Sharma et al, 2012).

Похідні C_{60} фулерену з незамінними амінокислотами – треоніном, лізином, аргініном знижували інтенсивність перекисного окислення ліпідів, утворення АФК та активність супероксиддисмутази (СОД) в листках і коренях ячменю (Panova et al, 2018). Було показано, що БВНТ продукували АФК у суспензійних клітинах рису (Tan et al, 2009), знижували активність СОД у клітинах суспензії *Arabidopsis thaliana* (Lin et al, 2009) та підвищували активність пероксидази рослини *Onobrychis arenaria* (Smirnova et al, 2012).

Ефекти	Автори
Збільшення довжини кореня	Cañas et al, 2008
Збільшення довжини кореня	Cañas et al, 2008
Збільшення сирої та сухої біомаси рослин	Khodakovskaya et al, 2011
Збільшення довжини листків і біомаси у кукурудзи, збільшення довжини коренів у сої	Lahiani et al, 2013
Збільшення довжини стебла та біомаси рослин	Khodakovskaya et al, 2009
Зниження виживаності протопластів	Burlaka et al, 2015б
Не чинить впливу	Larue et al, 2012
Зменшення сухої біомаси, вмісту хлорофілу та активності супероксиддисмутази, життєздатності клітин	Lin et al, 2009
Посилення росту калюсу	Ghorbanpour et al, 2015
Збільшення біомаси, активізація стресзалежних генів	Khodakovskaya et al, 2011
Пригнічення росту коренів і пагонів, зменшення біомаси, площі листя, посилене пошкодження електролітів і АФК	Begum et al, 2012
Пошкодження ДНК	Ghosh et al, 2011
Зменшення довжини пагона, біомаси, підвищення плинності клітинних мембран	Begum et al, 2012
Зниження життєздатності клітин, підвищення АФК	Tan et al, 2009
Індукція елонгації клітин кореня, збільшення довжини коренів, біомаси	Wang et al, 2012
Зниження виживаності протопластів	Burlaka et al, 2015б
Не впливає на проростання насіння	Kumar et al, 2015
Не впливає на проростання насіння, виявляє захисні ефекти	Liu et al, 2010
Пригнічення процесу фотосинтезу і поглинання іонів Mg	Tao et al, 2015
Пригнічення росту, накопичення хлорофілу	Santos et al, 2013
Транспортування в організмі рослин	Avanasi et al, 2014
Збільшення біомаси пагонів, зменшення біомаси коренів	Kelsey et al, 2013
Посилення розмноження водоростей у культурі; посилення росту арабідопсису	Gao et al, 2011
Збільшення розміру та кількості плодів, їх біомаси	Kole et al, 2013
Зниження рівня H_2O_2, процесів окислення ліпідів і білків; активація аскорбатзалежної пероксидази та каталази; підвищення вміст проліну та води у насінні	Anjum et al, 2014
Збільшення довжини кореня і пагону, зменшення біомаси	Zhang et al, 2015

Було виявлено, що БВНТ впливали на ряд генів у насінні томатів, які беруть участь у клітинних реакціях і передачі сигналів при стресі. Вплив БВНТ на експресію генів у насінні та проростках томатів, оброблених 25 мкг/мл БВНТ, досліджували за допомогою ПЛР-аналізу у реальному часі. За допомогою цього аналізу було виявлено зміни експресії деяких генів. Так, гени проліндегідрогенази (LesAffx. 3568.1.S1_a_at) – ферменту, який бере участь у розмноженні та реакції на водний стрес (Yoshiba et al, 1997) і захисті патогенів у *Arabidopsis* (Cecchini et al, 2011), патоген-залежного протеїна P2 (Les.4345.1.S1_at) та рибонуклеази (Les.50.1.S1_at) значно активувалися порівняно з контролем. ВНЧ також активували експресію гена аквапорину томатів (*LeAqp*) в насінні через 12, 24 та 48 год порівняно з контролем.

Використовуючи базу даних функціональної геноміки томатів, було показано, що БВНТ впливають на експресію генів, які відповідають за специфічні біологічні процеси. Так, БВНТ в насінні впливали на три основні процеси, зокрема клітинні процеси, метаболічні процеси та відповідь на дію абіотичних чинників (Lahiani et al, 2016).

Фулероли, функціоналізовані ОН-групами фулерени, позитивно впливали на ріст рослин, зокрема стимулювали поділ клітин у культурах зелених водоростей *Pseudokirchneriella subcapitata* та ріст гіпокотилю у *Arabidopsis thaliana* (Gao et al, 2011). Після обробки насіння фулеролами збільшувалася кількість і розмір плодів та кінцевого врожаю до 128 % у *Momordica charantia*, а також вміст біологічно активних сполук у плодах, таких як кукурбітацину-B, лікопіну, сапоніну та інуліну (Kole et al, 2013).

Отже, механізми фітотоксичності вуглецевих наноматеріалів реалізуються шляхом індукції окисного стресу, однак доведено і захисну дію ВНЧ.

Захисна дія вуглецевих наноматеріалів у рослин

Авторами (Khodakovskaya et al, 2009) виявлено позитивну дію ВНТ на ріст і розвиток рослин томатів, що може бути пов'язано з їх впливом на процеси поглинання вологи насіння. Механізм дії ВНТ пояснюється створенням ВНТ пор в шкірці насінини при проникненні крізь неї. ВНТ здатні регулювати роботу водних каналів, зокрема через активність аквапоринів.

Похідні C_{60} фулерену з амінокислотами регулювали фотосинтез у рослин. Так, автори (Panova et al, 2018) показали, що у стрес-індукованій моделі (УФ-В опромінення, 20 кДж/м^2) після обробки фулеренолом, C_{60}-треоніном та C_{60}-гідроксипроліном у листях ячменю посилювався синтез і підвищувався вміст фотосинтетичних пігментів: хлорофілів (ChlRI) та антоціанів (ARI). Автори припускають, що позитивний вплив амінокислотних похідних C_{60} фулерену та фулеренолу на продуктивність рослин, стійкість до окисного стресу, а також їх висока ефективність за низьких концентрацій та екологічна безпечність свідчать про перспективність їх використання в рослинництві.

Встановлено, що полігідроксифулерени (фулерол або фулеренол) запобігали окисному стресу в коренях ячменю (*Hordeum vulgare* L.) і пшениці (*Triticum aestivum* L.), індукованому УФ-В опроміненням (0,5 Вт/м^2, 15 хв, 320 нм) (Panova et al, 2015). Так, за використання зонду дихлорфлуоресцеїну (DCF) було показано, що після обробки 14 мг/л фулеролом або фулеренолом у зоні росту кореня знижувався рівень АФК. Отримані результати свідчать про антиоксидантну активність полігідроксифулеренів та їх використання для покращення росту рослин в умовах стресу навколишнього середовища.

Захисна дія вуглецевих наноматеріалів у рослинах реалізується завдяки їх антиоксидантним властивостям та здатності вловлювати вільні радикали.

Висновок

Цей огляд присвячений потенційному впливу ВНМ на рослини, проникненню і внутрішньоклітинній локалізації ВНМ у клітинах рослин, можливим механізмам фітотоксичності ВНМ. Біологічна активність ВНМ залежить від хімічного складу, розміру та форми, структури поверхні, концентрації, розчинності, агрегації, шляхів застосування та моделей рослин.

Отже, ВНМ здатні індукувати проростання насіння, ріст коренів і фотосинтез, збільшення біомаси та транспортування поживних речовин. Крім того, ВНМ мають численні потенційні можливості застосування в сільському господарстві: по-перше, для підвищення продуктивності сільськогосподарських культур як стимулятори росту рослин; по-друге, для зменшення використання агрохімікатів як нанокапсульовані засоби захисту рослин (пестициди, гербіциди) та добрива з повільним ви-вільненням; по-третє, як засоби захисту рослин, включаючи пестициди, гербіциди, інсектициди.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

CELLULAR BIOLOGICAL AND MOLECULAR GENETIC EFFECTS OF CARBON NANOMATERIALS IN PLANT

S.V. Prylutska, D.V. Franskevych, A.I. Yemets

National University of Life and Environmental Science of Ukraine
03041, Ukraine, Kyiv, 15 Heroiv Oborony Str.
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
01601 Kyiv, Ukraine, 64 Volodymyrska Str.
Institute of Food Biotechnology and Genomics, NAS of Ukraine 04123, Ukraine, Kyiv, 2A Osypovskogo Str.

E-mail: psvit_1977@ukr.net*, dashaqq@gmail.com, yemets.alla@nas.gov.ua

Current research data on the biological effects of carbon nanoparticles (CNPs) such as C_{60} fullerene, graphene, graphene oxide, single- and multi-walled nanotubes, in *in vitro* and *in vivo* plant systems are summarized. The interaction of CNPs with plant cells/organisms, their intracellular localization, and potential mechanisms of action are analyzed. It was found that CNPs improve seed germination, growth of roots and shoots, increase the biomass of different species of monocotyledonous and dicotyledonous plants. The negative effect of CNPs on plant growth and development is observed only at high concentrations, depending on the type of CNPs and the peculiarities of exposure conditions. Due to nanoscale and hydrophobic properties, CNPs are able to penetrate plant cells in both energy-dependent and energy-independent ways, accumulating mainly in plastids, vacuoles, and nuclei, which determines the protective and target action of CNPs. The protective mechanisms of CNPs are based on the antioxidant properties of carbon molecules and are accompanied by changes in the expression of genes that are responsible, in particular, for cellular processes, metabolic processes, and the response to abiotic factors. The positive effect of CNPs on plant productivity, resistance to oxidative stress, as well as their high efficiency at low concentrations and environmental safety indicate the prospect of their use as regulators of physiological conditions, growth and development of higher plants.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Albanese A, Tang PS, Chan WC. (2012) The effect of nanoparticle size, shape, and surface chemistry on biological systems Ann Rev Biomed Eng 14:1–16. doi: 10.1146/annurev-bioeng-071811-150124

Ali-Boucetta H, Al-Jamal KT, Müller KH et al. (2011) Cellular uptake and cytotoxic impact of chemically functionalized and polymer-coated carbon nanotubes Small **7**:3230–3238. doi: 10.1002/smll.201101004

Anjum NA, Singh N, Singh MK et al. (2014) Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba L.*) Sci Total Environ 472:834–41. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.018

Avanasi R, Jackson WA, Sherwin B et al. (2014) C_{60} fullerene soil sorption, biodegradation, and plant uptake Environ Sci Technol 48:2792–2797. doi: 10.1021/es405306w

Begum P, Fugetsu B. (2012) Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor L.*) and the role of ascorbic acid as an antioxidant J Hazard Mater 243:212–222. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.025

Begum P, Ikhtiari R, Fugetsu B et al. (2012) Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes assessed by selected plant species in the seedling stage Appl Surf Sci 262:120–124. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.03.028

Bianco A, Kostarelos K, Prato M. (2005) Applications of carbon nanotubes in drug delivery Curr Opin Chem Biol 9:674–679. doi: 10.1016/j.cbpa.2005.10.005

Blume YB, Krasylenko YA, Yemets AI. (2012) Effects of phytohormones on the cytoskeleton of the plant cell Rus J Plant Physiol 59(4):515–529. doi: 10.1134/S1021443712040036

Burlaka OM, Pirko YaV, Yemets AI et al.(2015) Application of carbon nanotubes for plant genetic transformation. In: Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology, and Applications (Eds. Fesenko O., Yatsenko L.), Springer-Verlag: Springer Proceedings in Physics, V. 156, Chapter 20, p. 233–255. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06611-0_20

Burlaka OM, Yemets AI, Pirko YaV, et al. (2016) Non-covalent functionalization of carbon nanotubes for efficient gene delivery. In: Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications (Eds. Fesenko O, Yatsenko L), Springer-Verlag:

Springer Proceedings in Physics, V. 183, Chapter 30, p. 355–370. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_30

Burlaka OM, Pirko YaV, Yemets AI, Blume YaB. (2011) Carbon nanotubes and their application for plant genetic engineering. Nanostructural Material Science 2:84–101. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/62783. (In Ukrainian)

Burlaka OM, Pirko YaV, Yemets AI, Blume YaB. (2015a) Gene material delivering into plant cells using carbon nanotubes Dopov Nac Akad Nauk Ukr, 8:122–130. doi: 10.15407/dopovidi2015.08.122. (In Ukrainian)

Burlaka OM, Pirko YaV, Yemets AI, Blume YaB. (2015b) Investigation of the effect of carbon nanotubes on tobacco protoplasts for the development of novel approaches in plant biotechnology Factory Exp Evol Org 17:121–125. http://utgis.org.ua/journals/index.php/Faktory/article/view/486 (In Ukrainian)

Buzaneva E, Karlash A, Yakovkin K et al. (2002) DNA nanotechnology of carbon nanotube cells: physico-chemical models of self-organization and properties Mater Sci Engineer C 19(1–2):41–45. doi.org/10.1016/S0928-4931(01)00425-8

Byon HR, Choi HC. (2006) Network single-walled carbon nanotube-field effect transistors (SWNT FETs) with increased Schottky contact area for highly sensitive biosensor applications J Am Chem Soc 128:2188–2189. doi.org/10.1021/ja056897n

Cañas JE, Long M, Nations S et al. (2008) Effects of functionalized and non functionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species Environ Toxicol Chem 27:1922–1931. doi: 10.1897/08-117.1

Cecchini NM, Monteoliva MI, Alvarez ME. (2011) Proline dehydrogenase contributes to pathogen defense in Arabidopsis Plant Physiol 155:1947–1959. doi: 10.1104/pp.110.167163

Cherukuri P, Bachilo SM, Litovsky SH et al. (2004) Near-infrared fluorescence microscopy of single-walled carbon nanotubes in phagocytic cells J Am Chem Soc 126:15638–15639. doi.org/10.1021/ja0466311

Cherukuri P, Gannon CJ, Leeuw TK et al. (2006) Mammalian pharmacokinetics of carbon nanotubes using intrinsic near-infrared fluorescence Proc Natl Acad Sci USA 103:18882–18886. doi: 10.1073/pnas.0609265103

Chithrani BD, Ghazani AA, Chan WCW. (2006) Determining the size and shape dependence of gold nanoparticle uptake into mammalian cells Nano Lett 6:662–668. doi: 10.1021/nl052396o.

Cui D, Zhang H, Sheng J et al. (2010) Effects of CdSe/ZnS quantum dots covered multi-walled carbon nanotubes on murine embryonic stem cells Nano Biomed Eng 2:236–244. doi: 10.5101/NBE.V214.P236-244

De La Torre-Roche R, Hawthorne J, Deng Y et al. (2012) Fullerene-enhanced accumulation of p, p'-DDE in agricultural crop species Environ Sci Technol 46:9315–9323. doi: 10.1021/es301982w

Galbraith DW. (2007) Nanobiotechnology: silica breaks through in plants Nat Nanotechnol 2:272–273. doi: 10.1038/nnano.2007.118

Gao J, Wang Y, Folta KM et al. (2011) Polyhydroxy fullerenes (fullerols or fullerenols): beneficial effects on growth and lifespan in diverse biological models PLoS One 6:e19976. doi.org/10.1371/journal.pone.0019976

Ghorbanpour M, Hadian J. (2015) Multi-walled carbon nanotubes stimulate callus induction, secondary metabolites biosynthesis and antioxidant capacity in medicinal plant *Satureja khuzestanica* grown *in vitro*. Carbon 94:749–759. doi: 10.1016/j.carbon.2015.07.056

Ghosh M, Chakraborty A, Bandyopadhyay M et al. (2011) Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT): induction of DNA damage in plant and mammalian cells J Hazard Mater 197:327–336. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.09.090

Giraldo JP, Landry MP, Faltermeier SM et al. (2014) Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing Nat Mater 13:400–408. doi: 10.1038/nmat3890

Gogos A, Knauer K, Bucheli TD. (2012) Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities J Agric Food Chem 60:9781–9792. doi.org/10.1021/jf302154y

Grebinyk A, Prylutska S, Buchelnikov A et al. (2019) C_{60} fullerene as effective nanoplatform of alkaloid berberine delivery into leukemic cells Pharmaceutics 111:586. doi: 10.3390/pharmaceutics11110586

Grebinyk A, Prylutska S, Grebinyk S et al. (2021) Antitumor efficiency of the natural alkaloid berberine complexed with C_{60} fullerene in Lewis lung carcinoma *in vitro* and *in vivo* Cancer Nano 12:24. doi.org/10.1186/s12645-021-00096-6

Hamdi H, De La Torre-Roche R et al. (2014) Impact of non-functionalized and amino-functionalized multiwall carbon nanotubes on pesticide uptake by lettuce (*Lactuca sativa L.*) Nanotoxicology 6:1–9. doi:10.3109/17435390.2014.907456

Hao Y, Yu F, Lv R et al. (2016) Carbon nanotubes filled with different ferromagnetic alloys affect the growth and development of rice seedlings by changing the C:N ratio and plant hormones concentrations PloS One 11. doi: 10.1371/journal.pone.0157264

Heller DA, Baik S, Eurell TE et al. (2005) Single-walled carbon nanotube spectroscopy in live cells: towards long-term labels and optical sensors Adv Mater 17:2793–2799. doi: 10.1002/ADMA.200500477

Imlay JA, Linn S. (1988) DNA damage and oxygen radical toxicity Sci (Washington) 240:1302–1309. doi: 10.1126/science.3287616

Jiang Y, Hua Z, Zhao et al. (2014) The effect of carbon nanotubes on rice seed germination and root growth Proc Int Conf Appl Biotechnol (ICAB 2012) p 1207

Jin H, Heller DA, Sharma R et al. (2009) Size dependent cellular uptake and expulsion of single-walled carbon nanotubes: single particle tracking and a generic uptake model for nanoparticles ACS Nano 3:149–158. doi.org/10.1021/nn800532m

Jin H, Heller DA, Strano MS. (2008) Single-particle tracking of endocytosis and exocytosis of single-walled carbon nanotubes in NIH-3 T3 cells Nano Lett 8:1577–1585. doi: 10.1021/nl072969s

Kelsey JW, White JC. (2013) Effect of C60 fullerenes on the accumulation of weathered p,p'-DDE by plant and earthworm species under single and multispecies conditions Environ Toxicol Chem/SETAC 32:1117–23. doi: 10.1002/etc.2158

Khodakovskaya MV, de Silva K, Biris AS et al. (2012) Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells ACS Nano 6:2128–2135. doi. org/10.1021/nn204643g

Khodakovskaya M, de Silva K, Nedosekin D et al. (2011) Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions Proc Natl Acad Sci USA 108:1028–1033. doi:10.1073/pnas.1008856108

Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M et al. (2009) Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth ACS Nano 3:3221–3227. doi: 10.1021/nn900887m.

Khodakovskaya MV, Kim BS, Kim JN et al. (2013) Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community Small 9:115–123. doi: 10.1002/smll.201201225

Kim SN, Rusling JF, Papadimitrakopoulos F. (2007) Carbon nanotubes for electronic and electrochemical detection of biomolecules Adv Mater 19:3214–3228. doi: 10.1002/adma.200700665

Kole C, Kole P, Randunu KM et al. (2013) Nano-biotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*) BMC Biotechnol 13:1. doi. org/10.1186/1472-6750-13-37

Kostarelos K, Lacerda L, Pastorin G et al. (2007) Cellular uptake of functionalized carbon nanotubes is independent of functional group and cell type Nat Nanotechnol 2:108–113. doi: 10.1038/nnano.2006.209

Lacerda L, Russier J, Pastorin G et al. (2012) Translocation mechanisms of chemically functionalised carbon nanotubes across plasma membranes Biomaterials 33:3334–3343. doi: 10.1016/j.biomaterials.2012.01.024

Lahiani M, Chen J, Irin F et al. (2015) Interaction of carbon nanohorns with plants: uptake and biological effects Carbon 81:607–19. doi: 10.1016/j.carbon.2014.09.095

Lahiani MH, Dervishi E, Chen J et al. (2013) Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops ACS Appl Mater Interfaces 5:7965–7973. doi. org/10.1021/am402052x

Lahiani MH, Dervishi E, Ivanov I et al. (2016) Comparative study of plant responses to carbon-based nanomaterials with different morphologies Nanotechnology 27(26):265102. doi: 10.1088/0957-4484/27/26/265102

Lang J, Melnykova M, Catania M et al. (2009) A water-soluble [60]fullerene-derivative stimulates chlorophyll accumulation and has no toxic effect on *Chlamydomonas reinhardtii* Acta Biochimica Polonica 66(3):257–262. doi.org/10.18388/abp.2019_2835

Larue C, Pinault M, Czarny B et al. (2012) Quantitative evaluation of multi-walled carbon nanotube uptake in wheat and rapeseed J Hazard Mater 227–228:155–63. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.033

Leeuw TK, Reith RM, Simonette RA et al. (2007) Single-walled carbon nanotubes in the intact organism: near-IR imaging and biocompatibility studies in *Drosophila* Nano Lett 7:2650–2654. doi: 10.1021/nl0710452

Lin C, Fugetsu B, Su Y et al (2009) Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on *Arabidopsis* T87 suspension cells. J Hazard Mater 170:578-583. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.025

Lin D, Xing B. (2007) Phytotoxicity of nanoparticles, inhibition of seed germination and root growth Environ Pollut 150:243–250. doi: 10.1016/j.envpol.2007.01.016

Lin S, Reppert J, Hu Q et al. (2009) Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants Small 5:1128–32. doi.org/10.1002/smll.200801556

Liu Q, Chen B, Wang Q et al. (2009) Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells Nano Lett 9:1007–1010. doi: 10.1021/nl803083u

Molchan OV, Zubei ES. (2021) The effect of fullerene on the physiological and biochemical parameters of barley plants in hydroponic culture Proc Nat Aca Sci Belarus Biological series 66(1):74–87. doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-1-74-87

Nazarenus M, Zhang Q, Soliman MG et al. (2014) In vitro interaction of colloidal nanoparticles with

mammalian cells: what have we learned thus far? Beilstein J Nanotechnol 5:1477–1490. doi: 10.3762/bjnano.5.161

Nima ZA, Lahiani MH, Watanabe F et al. (2014) Plasmonically active nanorods for delivery of bioactive agents and highsensitivity SERS detection in planta RSC Adv 4:64985–64993. doi.org/10.1039/C4RA10358K

Panova GG, Kanash EV, Semenov KN et al. (2018) Fullerene derivatives influence production process, growth and resistance to oxidative stress in barley and wheat plants Agric Biol 53(1):38–49. doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.38rus

Panova GG, Ktitorova IN, Skobeleva OV et al. (2015) Impact of polyhydroxy fullerene (fullerol or fullerenol) on growth and biophysical characteristics of barley seedlings in favourable and stressful conditions Plant Growth Regul 9 doi: 10.1007/s10725-015-0135-x

Prylutska SV, Grynyuk II, Matyshevska OP et al. (2008) Estimation of multi-walled carbon nanotubes toxicity *in vitro* Physica E 40(7):2565–2569. doi: 10.1016/j.physe.2007.07.017

Prylutska SV, Grynyuk II, Palyvoda KO et al. (2010) Photoinduced cytotoxic effect of fullerenes C_{60} on transformed T-lymphocytes Exp Oncol 32(1):29–32

Prylutska S, Grynyuk I, Skaterna T et al. (2019) Toxicity of C_{60} fullerene-cisplatin nanocomplex against Lewis lung carcinoma cells Arch Toxicol 93(5):1213–1226. doi.org/10.1007/s00204-019-02441-6

Rico C, Peralta-Videa J, Gardea-Torresdey J. (2015) Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants Nanotechnology and Plant Sci (Cham: Springer) pp 1–17. doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_1

Sakhno LO, Yemets AI, Blume YaB. (2020) Carbon Nanotubes and Fullerenes as DNA/RNA Carriers for Plant Genetic Transformation. In: Research Advances in Plant Biotechnology (Ed. YaB Blume), Nova Sci. Publ., New York, Chapter 1, pp. 1–31

Samaj J, Baluska F, Voigt B et al. (2004) Endocytosis, actin cytoskeleton, and signaling Plant Physiol 135:1150–1161. doi: 10.1104/pp.104.040683

Serag MF, Braeckmans K, Habuchi S et al. (2012) Spatiotemporal visualization of subcellular dynamics of carbon nanotubes. Nano Lett 12:6145–6151. doi: 10.1021/nl3029625

Serag MF, Kaji N, Gaillard C et al. (2011) Trafficking and subcellular localization of multiwalled carbon nanotubes in plant cells ACS Nano 5:493–499. doi: 10.1021/nn102344t

Serag MF, Kaji N, Habuchi S et al. (2013) Nanobiotechnology meets plant cell biology: carbon nanotubes as organelle targeting nanocarriers RSC Adv 3:4856–4862. doi: 10.1039/c2ra22766e

Serag MF, Kaji N, Venturelli E et al. (2011) A functional platform for controlled subcellular distribution of carbon nanotubes ACS Nano 5:9264–9270. doi: 10.1021/nn2035654

Scharff P, Ritter U, Matyshevska OP et al. (2008) Therapeutic reactive oxygen generation Tumori 94(2):278–283

Sharma P, Jha AB, Dubey RS et al. (2012) Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions J Bot 2012:1–26. doi.org/10.1155/2012/217037

Shen CX, Zhang QF, Li J et al. (2010) Induction of programmed cell death in *Arabidopsis* and rice by single-wall carbon nanotubes Am J Bot 97:1602–1609. doi: 10.3732/ajb.1000073

Smirnova E, Gusev A, Zaytseva O et al. (2012) Uptake and accumulation of multiwalled carbon nanotubes change the morphometric and biochemical characteristics of *Onobrychis arenaria* seedlings Front Chem Sci Eng 6:132–138. doi.org/10.1007/s11705-012-1290-5

Stampoulis D, Sinha SK, White JC. (2009) Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants Environ Sci Technol 43:9473–9479. doi.org/10.1021/es901695c

Sukhodub LB, Sukhodub LF, Prylutskyy YuI et al. (2018) Composite material based on hydroxyapatite and multi-walled carbon nanotubes filled by iron: preparation, properties and drug release ability Mater Sci Engineer C 93:606–614. doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.019

Tan X, Lin C, Fugetsu B. (2009) Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on suspension rice cells Carbon 47:3479–3487. doi.org/10.1016/j.carbon.2009.08.018

Torney F, Trewyn BG, Lin V et al. (2007) Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants Nat Nanotechnol 2:295–300. doi: 10.1038/nnano.2007.108

Upadhyayula VKK, Deng S, Mitchell MC et al. (2009) Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: a review Sci Total Environ 408:1–13. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.027

Villagarcia H, Dervishi E, de Silva K et al. (2012) Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants Small 8:2328–23-34. doi: 10.1002/smll.201102661

Wang X, Han H, Liu X et al. (2012) Multi-walled carbon nanotubes can enhance root elongation of wheat (*Triticum aestivum*) plants J Nanopart Res 14:841. doi: 10.1007/s11051-012-0841-5

Warheit D. (2004) Nanoparticles: health impacts? Ma-

ter Today 7(2):32–35. doi: 10.1016/S1369-7021(04)00081-1

Welsher K, Liu Z, Daranciang D, Dai H. (2008) Selective probing and imaging of cells with single walled carbon nanotubes as near-infrared fluorescent molecules Nano Lett 8:586–590. doi: 10.1021/nl072949q

Wild E, Jones KC. (2009) Novel method for the direct visualization of *in vivo* nanomaterials and chemical interactions in plants Environ Sci Technol 43:5290–5294. doi: 10.1021/es900065h

Yoshiba Y, Kiyosue T, Nakashima K et al. (1997) Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water stress Plant Cell Physiol 38:1095–102. doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a029093

Zaytseva O, Neumann G. (2016) Differential impact of multi-walled carbon nanotubes on germination and seedling development of *Glycine max*, *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* Eur Chem Bull 5(5):202–210. doi: 10.17628/ECB.2016.5.202

Zaytseva O, Wang Z, Neumann G. (2017) Phytotoxicity of carbon nanotubes in soybean as determined by interactions with micronutrients J Nanopart Res 19:29. doi: 10.1007/s11051-016-3722-5

Zhang M, Gao B, Chen J et al. (2015) Effects of graphene on seed germination and seedling growth J Nanopart Res17:78. doi: 10.1007/s11051-015-2885-9

Zhang W, Zhang Z, Zhang Y. (2011) The application of carbon nanotubes in target drug delivery systems for cancer therapies Nano Res Lett 6:555. doi. org/10.1186/1556-276X-6-555

Надійшла в редакцію 10.01.22
Після доопрацювання 11.03.22
Прийнята до друку 18.07.22