

УДК 504.54(045)

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ РАДІОЄМНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ СПРОЩЕНОЇ РОСЛИННОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ ДІЇ РАДІАЦІЙНОГО ТА ТОКСИЧНОГО ФАКТОРІВ

С. Пчеловська, А. Салівон, Ю. Кутлахмедов

*Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України
вул. Заболотного, 148, Київ 03680, Україна
e-mail: svetapchel@yahoo.com, bublikk@bigmir.net*

В експериментах на водній культурі рослин кукурудзи було показано можливість використання фактора радіоємності як чутливого показника стану рослин в умовах незалежного та комбінованого впливу γ -опромінення та хлориду кадмію. Показано, що динаміка запропонованої характеристики узгоджується з динамікою ростових показників, відображаючи характер впливу шкідливих факторів. На основі теорії радіоємності розроблена кількісна характеристика неадитивності взаємодії радіаційного та токсичного факторів – коефіцієнт синергізму. Також використання методу визначення фактора радіоємності проростків кукурудзи як біотичного компонента модельної моноекосистеми дало змогу виявити ефект адаптації в експериментах із застосуванням адаптуючих схем.

Ключові слова: радіоємність, фактор радіоємності, коефіцієнт синергізму, адаптація, важкі метали.

Важливим завданням сучасних радіобіологів, радіоекологів є вивчення ефектів, викликаних комбінованою дією різних стресових факторів на живі організми, а також процеси відновлення й адаптації до дії іонізуючої радіації, токсичних металів та інших стресових впливів. В умовах постійно зростаючого забруднення навколишнього середовища важливо знати особливості спільного впливу різних шкідливих факторів на організми, а також способи та характер їхніх взаємодій. Найбільш важливими та розповсюдженими стресорами сучасного природного середовища можна вважати радіаційний і токсичний фактори. Адже із розвитком промисловості, наукових, медичних технологій їх вплив на живі організми стає невід'ємною частиною довкілля. Наприклад, для Києва характерне перевищення концентрації таких важких металів, як свинець і кадмій, у 4 рази, порівняно з допустимими нормативами [1].

Вплив кожного зі стресорів може модифікуватися під дією інших факторів, – температура, освітлення та багато інших чинників різного походження [2, 3, 6, 7, 10, 11]. При спільному впливі стресові фактори взаємодіють один з одним і можуть послаблювати негативний вплив один одного (явище антагонізму), підсилювати негативний вплив один одного (синергізм), або ж результат їхньої спільної дії буде дорівнювати сумі впливів кожного з факторів (адитивність). Вивчення явищ синергізму, антагонізму й адитивності у взаємодії різних за своєю природою стресорів - дуже актуальне питання, що привертає увагу багатьох сучасних вчених.

З огляду на вищесказане, важливим і актуальним слід вважати дослідження характеру взаємодії радіаційного та токсичного факторів при їх спільному впливі на живі організми. Зокрема, в даній роботі об'єктом вибрана водна культура рослин кукурудзи.

Оцінку впливу комбінованої дії радіаційного і токсичного факторів на модельну рослинну систему – водну культуру рослин кукурудзи – в даній роботі здійснювали за

допомогою показників радіємності. Показники радіємності відображають здатність рослин накопичувати радіонукліди зі середовища, допоки кількість накопичених радіонуклідів не виявляє суттєвого впливу на життєдіяльність рослин. Суть методу полягає в тому, що при зовнішньому негативному впливі показник радіємності зменшиться – рослини почнуть «скидати» в середовище радіонукліди (подібно баласту) [4, 5].

Кількісна характеристика цієї властивості системи – фактор радіємності F – безрозмірна величина ($0 \div 1$), яка визначає частку радіонуклідів, накопичених системою від загальної кількості радіонуклідів у середовищі. Інакше кажучи – це характеристика поглинальної здатності рослин як компонента екологічної системи. Динаміку цієї характеристики зручно вивчати за допомогою радіонукліда-трасера. За допомогою методу камерних моделей просту модельну систему з двох компонент (у нашому випадку водної культури – це рослини кукурудзи і вода).

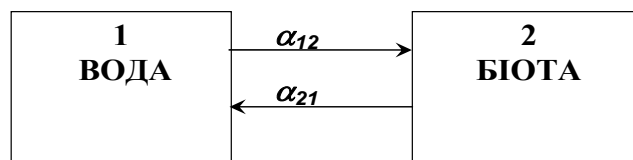


Рис. 1. Схематичне зображення камерної моделі спрощеної рослинної екосистеми.

Процеси взаємного обміну речовинами між камерами (поглинання та скидання) в такій моделі добре описуються системою диференційних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} y(x) &= \alpha_{21}z(x) - \alpha_{12}y(x), \\ \frac{\partial}{\partial x} z(x) &= \alpha_{12}y(x) - \alpha_{21}z(x), \end{aligned} \tag{1}$$

де $y(x)$ – функція, що характеризує вміст трасера у воді, $z(x)$ – характеристика вмісту трасера в біоті.

Розв’язавши цю систему рівнянь і прийнявши $t \rightarrow \infty$, легко встановити значення інтегрального показника стану екосистеми – параметра радіємності, що визначає частку радіонукліду в біоті чи воді у стані рівноваги та виразити їх через поглинальні характеристики – швидкості:

$$F_e \cong \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{21} + \alpha_{12}}, \tag{2} \quad F_{\bar{e}} \cong \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{21} + \alpha_{12}}, \tag{3}$$

де $F_{\bar{e}}$ – фактор радіємності води/біоти; α_{21} – швидкість відтоку трасера із камери 2 (біоти) у камеру 1 (воду); α_{12} – швидкість поглинання трасера рослинами (камера 1) із середовища (камера 2).

Відношення цих двох виразів дає співвідношення факторів радіємності біоти і води, пропорційне відношенню швидкостей поглинання та відтоку:

$$\frac{F_{\bar{e}}}{F_e} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{21}} = Z. \tag{4}$$

Це відношення було досліджене в ході експериментів, його значення для контролю становило 8–10. Встановлено також значення швидкостей переходу трасера: $a_{21} = 0,05 \pm 0,01$; $a_{12} = 0,4 \pm 0,05$.

Для кількісної оцінки неадитивної взаємодії факторів різної природи розроблено теоретичну модель, у якій кількісна характеристика ступеня синергізму взаємодії – коефіцієнт синергізму – виражається через показники радіоємності досліджуваного об'єкта при спільному та незалежному впливі різних за природою факторів [5, 8]. За допомогою цієї характеристики показана наявність неадитивної взаємодії радіаційного та токсичного впливів на водну культуру рослин кукурудзи. Залежно від режиму застосування факторів (гамма-опромінення та внесення хлориду кадмію) і способів поєднання їхнього впливу на рослини, характер взаємодії змінюється від антагонізму (послаблення негативного впливу) до синергізму (підсилення негативного впливу одного фактора дією іншого).

$$P = \frac{Z_{Cd+omp}}{Z_{Cd} \cdot Z_{omp}} \cdot Z_0. \quad (5)$$

Тут Z_0 – відношення факторів радіоємності біотичної та водної компонент системи F_0/F_e для контрольного варіанта; Z_{Cd+omp} – відношення при комбінованому впливі γ -опромінення та хлориду кадмію; Z_{Cd} і Z_{omp} – відношення для незалежних впливів кожного з чинників.

Відношення величин Z_{omp}/Z_0 може служити строгою мірою впливу радіації на параметри радіоємності екосистеми. Що більше це відношення відрізняється від одиниці, то більший ступінь впливу радіації на біоту екосистеми. Якщо це відношення дорівнює 1, то впливу немає, а якщо менше 1, то мова йде про пригнічення стану біоти, і при значеннях, більших 1, йдеться про поліпшення стану біоти. При цьому швидкість поглинання трасера росте і/або швидкість скидання трасера у воду з біоти зменшується.

При $P < 1$ – синергізм у взаємодії факторів, тобто фактори підсилюють (поглиблюють) негативний вплив один одного; при $P = 1$ – адитивність у взаємодії факторів (незалежний вплив кожного з факторів); при $P > 1$ – антагонізм, тобто негативний вплив одного фактора зменшується під дією іншого.

Дослідження проводили в умовах водної культури рослин кукурудзи сорту Дніпровська 247 і Титан 220. В експериментах використовували 4-добові проростки, пророщені в термостаті при температурі 24–27°C на зволоженому фільтрувальному папері. У подальшому, згідно зі схемою експерименту, проростки розподіляли на групи – варіанти, кожному з яких відповідала певна комбінація стресових факторів згідно зі схемою експерименту. Одні з них піддавали незалежному впливу γ -опромінення та хлориду кадмію, інші – комбінованій дії γ -опромінення та солі $CdCl_2$. Рослини поміщали на 0,5 л ємності з відстояною водою, де вони росли протягом 12–14 діб. У воду всіх дослідних варіантів вносили розчин $^{137}CsCl$ активністю 3 кБк на 0,5 л. Усі склянки перед початком досліду обробляли розчином стабільного цезію з метою запобігання сорбції іонів цезію стінками посуду. Опромінення здійснювали на γ -установці РОКУС у дозах від 1 до 15 Гр при потужності дози 1,42 сГр/с.

Величину фактора радіоємності рослин визначали як відношення поглинутої ними активності по радіонукліду-трасеру до загальної його активності в середовищі (воді). Як трасер був вибраний радіоактивний ^{137}Cs , оскільки він є хімічним аналогом мікроелемента калію, і його поглинання відображає якість мінерального живлення рослин. Для визна-

чення активності радіоцезію та його перерозподілу між компонентами системи використовували сцинтиляційний детектор СЕГ-05. Зміни поглинальної активності рослин щодо трасера ^{137}Cs фіксувалися регулярно – щодоби у перші 3 дні та через добу в наступні.

Для дослідження явища радіаційної адаптації використовували схему, згідно з якою варіанти спочатку опромінювали в адаптуючій дозі (1 Гр), а потім через різні проміжки часу – в тест-дозі (дозі іонізуючого опромінення, що значною мірою пригнічує рослини), яка становила для різних варіантів 6 Гр, 10 Гр, 11 Гр.

Також застосовували режим фракціонування як до опромінення так і до внесення CdCl_2 : хлорид кадмію вносили у дві фракції – по 25 мкМ з певними часовими інтервалами.

Окрім комплексу стандартних методів графічної, математичної і статистичної обробки отриманих даних, застосували один із методів математичного планування експерименту (МПЕ), а саме метод повного факторного експерименту (ПФЕ) [9].

Використання фактора радіоємності в дослідженнях

Доцільність використання показника радіоємності як чутливої характеристики, що відображає зміну стану рослинної системи в умовах шкідливих впливів, було обґрунтовано і доведено експериментально. Показана кореляція між реакцією фактора радіоємності та ростових характеристик (швидкості росту) на дію шкідливих факторів, а саме – гострого гамма-опромінення та внесення в середовище живлення солі кадмію (CdCl_2). На рис. 2 наведено динаміку ростових показників і фактора радіоємності проростків кукурудзи, які піддавалися дії радіаційного та токсичного факторів.

Порівнюючи поведінку кривих для кожної з характеристик відповідних дослідних варіантів, легко виявити подібність. Видно, що максимальне пригнічення обох характеристик відбувається в умовах комбінованої дії гострого γ -опромінення та гострого внесення хлориду кадмію (криві 4 на рис. 2, А та 2, Б). Також слід відзначити видимість ефекту відновлення в поведінці кривих 3, 2, 1, що відображають динаміку обох характеристик при фракціонуванні радіаційного і токсичного чинників, порівняно з 4 – застосу-

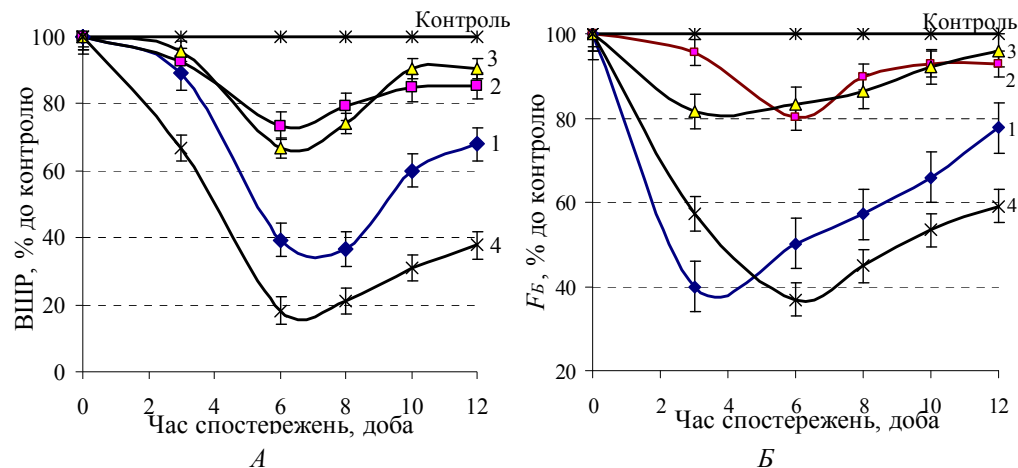


Рис. 2. Динаміка швидкості росту (А) та фактора радіоємності (Б) рослин щодо контролю. Нумерація кривих відповідає комбінаціям факторів: 1 – фракціоноване опромінення (10 Гр+10 Гр) у поєднанні з фракціонованим внесенням хлориду кадмію (25 мкМ+25 мкМ), час між фракціями – 24 год (для обох); 2 – фракціоноване внесення хлориду кадмію (25 мкМ+25 мкМ); 3 – фракціоноване опромінення (10 Гр+10 Гр); 4 – гостре γ -опромінення (20 Гр) у комбінації з гострим внесенням 50 мкМ солі CdCl_2 .

вання факторів у гострому режимі. Усе це дає право говорити про узгодження реакції фактора радіоємності рослин із реакцією їх ростових характеристик та про можливість його використання для характеристики змін стану модельної системи.

На рис. 3 представлена динаміка фактора радіоємності проростків кукурудзи в контролі.

Видно, що внесена активність (тобто доданий у розчин радіоактивний цезій хлористий) поглинається рослинами досить швидко і вже на 5-ту добу 97% від початкової активності переходить у рослини. Після цього спостерігається відносно стаціонарний стан – за наступні 6 діб зміна поглинальної активності змінюється в межах 1–2%. Отримані таким чином дані вказують на те, що використання методу радіоємності для оцінки модифікованого стану рослин доцільно використовувати упродовж перших семи днів після внесення в середовище радіоактивного трасера.

Комбінований і незалежний вплив гострого опромінення та солі CdCl_2

Зміна фактора радіоємності рослин, які піддавали незалежному та комбінованому впливові гострого γ -опромінення в дозі 20 Гр та внесення 50 мкМ/л хлориду кадмію у процентному відношенні до контролю представлена на рис. 4.

Поглинання трасера рослинами в умовах незалежної дії γ -опромінення проростків у дозі 20 Гр та внесення 50 мкМ солі CdCl_2 менше ніж у контрольному варіанті на 5–20%, тоді як при одночасному застосуванні стресорів – на 60–80%. Це однозначно свідчить про нелінійність/неадитивність спільної дії гострого γ -опромінення в дозі 20 Гр та одномоментного внесення хлориду кадмію концентрацією 50 мкМ. Крім того, слід відзначити відображення в динаміці факторів радіоємності відновних процесів. Про це свідчить область кривих (1–5 доба), у якій відбувається зростання поглинальної активності рослин кукурудзи після початкового зниження.

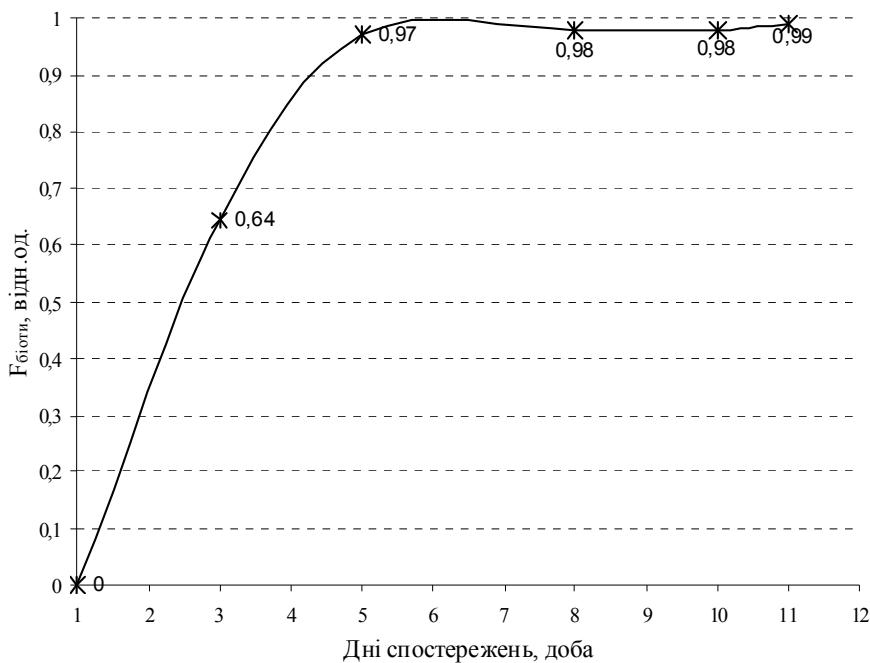


Рис. 3. Динаміка фактора радіоємності рослин кукурудзи в умовах відсутності зовнішніх стресових факторів (контролю).

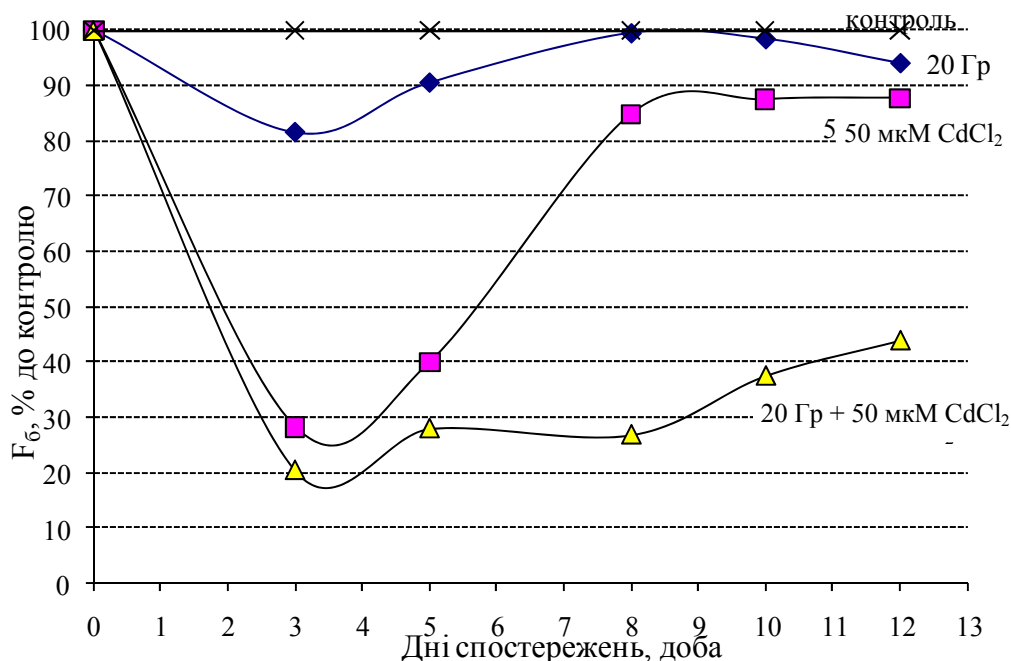


Рис. 4. Поглинання ^{137}Cs проростками кукурудзи у процентному відношенні до контролю при дії гострого γ -опромінення (20 Гр) та внесення хлориду кадмію в концентрації 50 мкмоль/л (без фракціонування).

Коефіцієнт синергізму

На основі запропонованої теоретичної моделі було проведено кількісну оцінку нелінійної взаємодії радіаційного та токсичного факторів за допомогою коефіцієнта синергізму. Розраховували його через відношення факторів радіосмності за формулою (5). На рис. 5 представлена динаміка цієї кількісної характеристики взаємодії радіаційного та токсичного факторів. Стресові фактори застосовували в режимі фракціонування (обох одночасно) – опромінювали двічі по 10 Гр та вносили розчин CdCl_2 по 25 мкМ з періодами між фракціями 6, 10 та 24 год.

Слід відзначити наявність чіткого синергізму протягом усього часу спостереження в умовах спільної дії фракціонованих радіаційного та токсичного факторів із часом між фракціями 6 год.

При 24-годинному режимі фракціонування опромінення рослин та внесення хлориду кадмію, а також при спільній дії нефракціонованих цих факторів виявлено значний антагонізм у перші 4 доби, після чого характер взаємодії змінювався у бік синергізму. Таким чином, можна зробити припущення, що максимально несприятливим для повторного негативного впливу є час 6 год, оскільки для такого режиму застосування вибраних факторів спостерігався чіткий синергізм.

Вивчення адаптації

Вивчення радіоадаптивної відповіді біологічного об'єкта на опромінення проявляється в експериментах, що здійснюються за схемою: мала доза + Δt (фракція) + гостра доза. Мала доза є адаптуючою, гостра доза – тестуючою. Змінюючи часовий проміжок Δt між опроміненням у цих дозах, визначають час, протягом якого формується підвищена радіостійкість (адаптивна відповідь, або радіаційний синдром), а також час, упро-

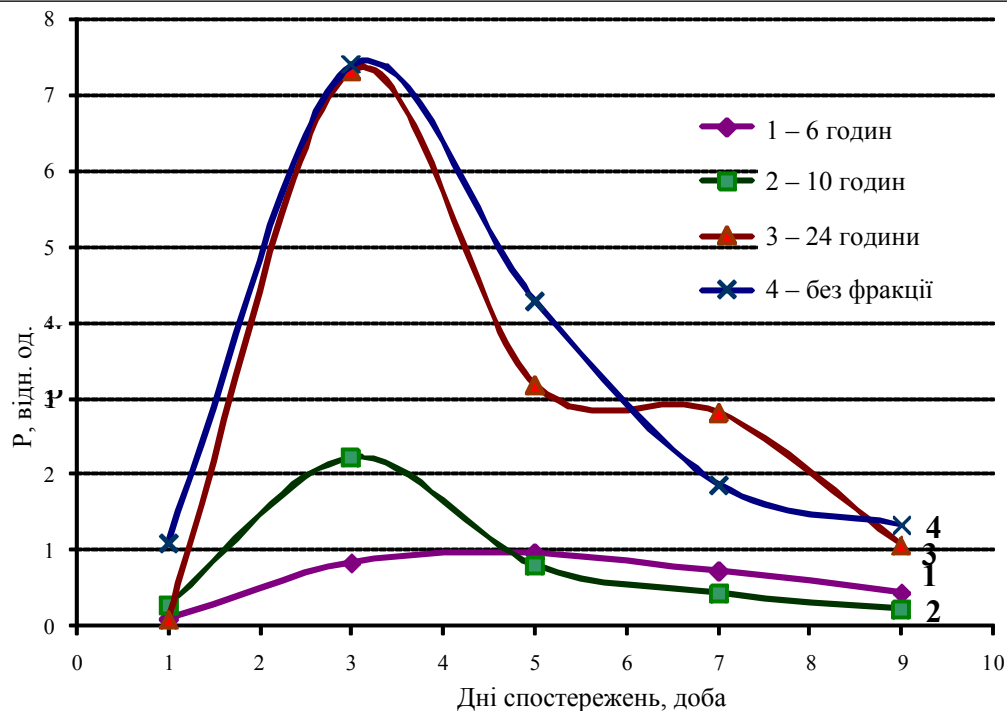


Рис. 5. Динаміка коефіцієнта синергізму (P) в умовах комбінованого впливу гострого опромінення в дозі 20 Гр та внесення CdCl_2 в концентрації 50 $\mu\text{M}/\text{l}$ (крива 4) та при різних режимах фракціонування обох факторів (криві 1–3, відповідно).

довж якого зберігається індукована радіостійкість. Для оцінки стану рослин із метою вивчення закономірностей адаптації в умовах модельної моноекосистеми (водної культури рослин кукурудзи) ми використовували фактор радіємності.

Видно, що при опроміненні рослин гострою дозою 11 Гр значення параметра радіємності біоти щодо контрольного варіанта з часом помітно падає й досягає значень 0,7–0,8. З часом відбувається помітне відновлення здатності накопичувати трасер ^{137}Cs і збільшення значення параметра радіємності (рис. 6).

У варіанті, в якому після адаптувочої дози 1 Гр з часовим інтервалом 4 год рослини опромінили в гострій тестуючій дозі 11 Гр, ми отримали чіткий ефект адаптації. Максимальний ефект згідно зі значеннями параметра радіємності спостерігається на 2–3 день росту водної культури рослин, на – 35% краще контрольних.

На рис. 7 представлено результати дослідження, в якому фактори застосовували за схемою: 1 Гр + 48 год + 11 Гр.

Видно, що у випадку, коли після адаптувочої дози 1 Гр через 48 год рослини опромінили в гострій тестуючій дозі 11 Гр, то також отримали ефект адаптації. Максимум ефекту відповідає зростанню фактора радіємності, що становить до 35% від контролю. А сам ефект адаптації спостерігався раніше, ніж у попередньому досліді: протягом 1–2 діб спостережень.

Таким чином, використовуючи фактор радіємності, виявили ефект адаптації рослин до гострих тестуючих доз опромінення (11 Гр) при попередньому опроміненні дозою 1 Гр і різних значеннях часу між адаптувочною та тестуючою дозами γ -опромінення.

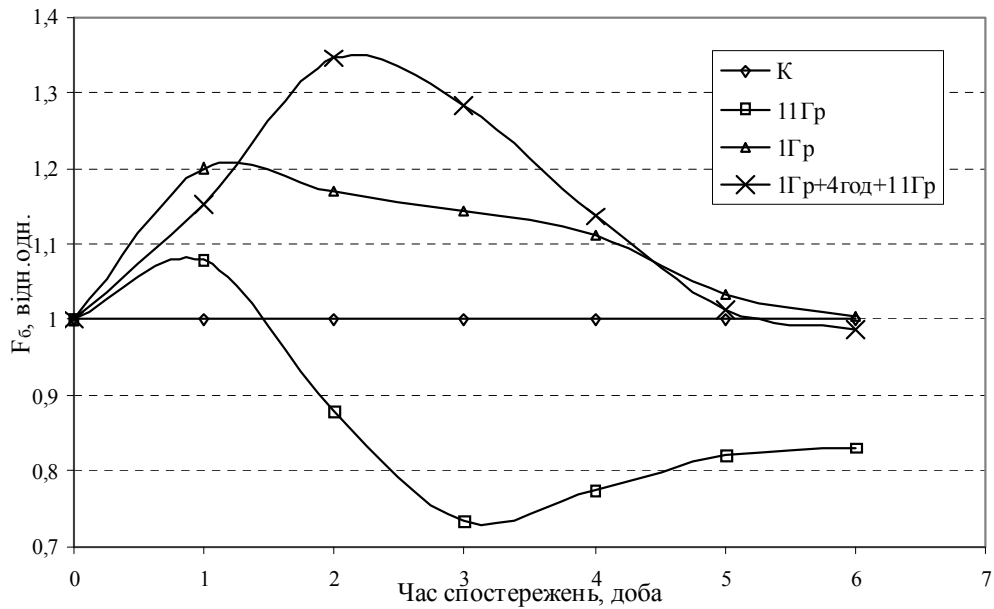


Рис. 6. Динаміка фактора радіємності рослин кукурудзи в умовах опромінення адаптуючою дозою 1 Гр і тест-дозою гамма-опромінення 11 Гр із часовим інтервалом 4 год (щодо неопроміненого контролю).

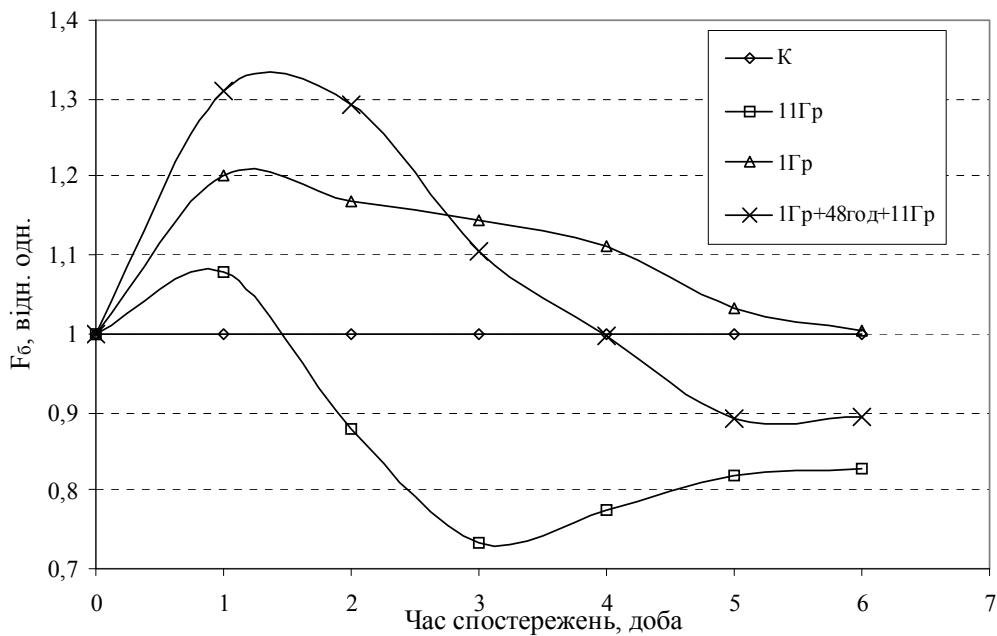


Рис. 7. Залежність фактора радіємності біоти від часу в умовах опромінення адаптуючою дозою 1 Гр і тест-дозою гамма-опромінення 11 Гр з часовим інтервалом 48 год (щодо неопроміненого контролю).

Запропонований для оцінки стану модельної рослинної системи фактор радіємності дав змогу адекватно оцінити зміни стану досліджуваного об'єкта в умовах незалежного та комбінованого впливу радіаційного і токсичного факторів при різних режимах застосування обох факторів. Експериментально доведено, що поведінка фактора радіємності узгоджується зі зміною ростових характеристик рослин.

Розроблено математичну модель для оцінки нелінійності взаємодії радіаційного і токсичного факторів, згідно з якою неадитивність комбінованого впливу γ -опромінення та хлориду кадмію визначається значенням/величиною коефіцієнта синергізму P .

Розраховано значення коефіцієнта синергізму для різних режимів застосування досліджуваних чинників. Виявлено присутність явища синергізму впродовж усього часу спостереження при комбінованому застосуванні фракціонованого γ -опромінення рослин у дозі 20 Гр з фракцією 6 год та фракціонованого внесення солі CdCl_2 у концентрації 50 мкМ з такою ж фракцією, та явища антагонізму при фракції у 10 та 24 год.

Виявлено, що комбінована дія гострого γ -опромінення в дозі 20 Гр та внесення 50 мкМ солі CdCl_2 має синергетичний характер.

Також показано, що за допомогою фактора радіємності можна виявити ефект адаптації рослин до дії γ -опромінення.

1. *Жовинский Э. Я., Кураева И. В.* Геохимия тяжелых металлов в почвах Украины. К.: Наук. думка, 2002. 214 с.
2. *Заичкина С. И., Розанова О. М., Антикаева Г. Ф.* и др. Комбинированное воздействие солей тяжелых металлов, хронического и острого γ -облучения на величину цитогенетического повреждения в клетках костного мозга мышей и крыс // Радиационная биология. Радиоэкология. 2001. Т. 41. № 5. С. 514–518.
3. *Комарова Л. Г., Петин В. Г.* Модификация радиочувствительности: новые горизонты и перспективы: Учеб. пособ. Обнинск: ИАТЭ, 2007. 142 с.
4. *Кутлахмедов Ю. О., Корогодін В. І., Кольтовер В. К.* Основи радіоекології: Навч. посіб. / За ред. В.П. Зотова. К.: Вища шк., 2003. 319 с.
5. *Кутлахмедов Ю. О., Пчеловська С. А., Салівон А. Г., Міхеев О. М.* Біологічні ефекти комбінованої дії радіації та факторів іншої природи за показниками радіємності екосистем // Радіобіологічні ефекти хронічного опромінення рослин у зоні впливу чорнобильської катастрофи. К.: Наук. думка, 2008. С. 292–329.
6. *Осипов А. Н., Григорьев М. В., Сытин В. Д.* и др. Влияние хронического воздействия кадмия и гамма-излучения в малых дозах на генетические структуры мышей // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т. 40. № 4. С. 373–377.
7. *Петин В. Г., Дергачева И. П., Жураковская Г. П.* Комбинированное биологическое действие ионизирующих излучений и других вредных факторов окружающей среды // Радиация и риск. 2001. Вып. 12. С. 117–134.
8. *Пчеловская С. А., Кольцова Е. Ю., Кутлахмедов Ю. А.* Исследование и моделирование радиоемкости экосистем // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досліджень. 2004. № 2 (13). С. 96–104.
9. *Саутин С. Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Львов: Химия, 1975. 48 с.
10. *Терек К. В., Юревич М. С., Рачевська Н. Я.* Нагромадження кадмію проростками кукурудзи та їх реакція на токсичну дію металу // Физиология и биохимия культур. растений. 2000. Т. 32. № 6. С. 506–511.

11. *Keltjens W. G., M.L. van Beusichem.* Phytochelatins as biomarkers for heavy metal stress in maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.): combined effect of copper and cadmium // *Plant and Soil.* 1998. Vol. 203. N 1. P. 119–126.

THE METHOD OF RADIOCAPACITY' USING FOR DEFINITION OF SIMPLY- FIENG PLANTS' SYSTEM' STATE ON RADIATION AND TOXIC FACTORS ACTION CONDITIONS

S. Pchelovska, A. Salivon, Yu. Kutlakhmedov

*The Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of NAS of Ukraine
148, Zabolotnyi St., Kyiv 03680, Ukraine
e-mail: svetapchel@yahoo.com, bublikk@bigmir.net*

In experiments on water culture of maize plants the possibility of using of the radiocapacity factor as a sensitive indicator of a state of plants in conditions of independent and combined action of gamma irradiation and cadmium chloride has been shown. It is shown that dynamics of the offered characteristic correlates with dynamics of growth' parameters, displaying character of action of negative factors. The quantitative characteristic of nonadditivities of interaction of radiation and toxic factors – the synergism coefficient has been developed on the basis of the radiocapacity theory. Also use of a method of definition of the radiocapacity factor of sprouts of maize as a biotic component of modelling monoecosystem has allowed revealing effect of adaptation in experiments with using adaptive schemes.

Key words: radiocapacity, radiocapacity factor, synergism coefficient, adaptation, heavy metals.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАДИОЕМКОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯ- НИЯ УПРОЩЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИОННОГО И ТОКСИЧЕСКОГО ФАКТОРОВ

С. Пчеловская, А. Саливон, Ю. Кутлахмедов

*Институт клеточной биологии и генной инженерии НАН Украины
ул. Заболотного, 148, Киев 03680, Украина
e-mail: svetapchel@yahoo.com, bublikk@bigmir.net*

В экспериментах на водной культуре растений кукурузы была показана возможность использования фактора радиоемкости в качестве чувствительного показателя состояния растений в условиях независимого и комбинированного влияния γ -облучения и хлорида кадмия. Показано, что динамика предложенной характеристики согласуется с динамикой ростовых показателей, отображая характер влияния вредных факторов. На основании теории радиоемкости разработана количественная характеристика неаддитивности взаимодействия радиационного и токсичного факторов – коэффициент синергизма. Также использование метода определения фактора радиоемкости проростков кукурузы как биотического компонента модельной моноэкосистемы позволило выявить эффект адаптации в экспериментах с использованием схем адаптации.

Ключевые слова: радиоемкость, фактор радиоемкости, коэффициент синергизма, адаптация, тяжелые металлы.

Стаття надійшла до редколегії 10.12.09

Прийнята до друку 05.03.10