

Список літератури

1. Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенностей в измерениях: практическое пособие / Н.Ю. Ефремова. – Минск: БелГИМ, 2003. – 50 с.
2. Классен В.И. Омагничивание водных систем / В.И. Классен. – [2-е изд.]. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
3. Проектирование комплексной электрификации / [Л.Г. Прищеп, А.П. Якименко, Л.В. Шаповалов и др.]; под ред. Л.Г. Прищеп. – М.: Колос, 1983. – 271 с.
4. Синявський О.Ю. Невизначеність потенціометричних вимірювань / О.Ю. Синявський, В.В. Савченко // Метрологія і прилади. – 2010. – № 4. – С. 32–37.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. [First edition]. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.

Приведены результаты исследований неопределенности измерения биопотенциалов проростков семян сельскохозяйственных культур. Обоснована методика определения эффективности обработки семян при изменении биопотенциалов. Определено изменение биопотенциалов семян огурцов при обработке в магнитных полях с различной магнитной индукцией.

Биопотенциал, неопределенность измерения, эффективность обработки, магнитная индукция.

The results of studies of biopotential's uncertainty of seedlings crop seeds are shown. The method of determining the effectiveness of treatment of seeds for change biopotentials is justified. The changes of biopotentials seeds of cucumbers is defined, when processing in magnetic fields with different magnetic induction.

Biopotential, the uncertainty of measurement, processing efficiency, the magnetic induction.

УДК 621.384

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ ДІЄЮ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТВАРИННИЙ ОРГАНІЗМ

Л.С. Червінський, доктор технічних наук

На основі аналізу явища фотореактивації і положень квантової біофізики викладено методичний підхід до керування енергетичною дією оптичного випромінювання на тварин в процесі їх вирощування.

Фотореактивація, тварини, механізм дії оптичного випромінювання.

© Л.С. Червінський, 2014

Швидкий розвиток сучасних технологій отримання тваринної продукції передбачає застосування новітніх методів, зокрема електротехнологій, серед яких провідне місце займає оптичне випромінювання (інфрачервоний обігрів, освітлення та ультрафіолетове опромінення). Ефективне впровадження оптичних електротехнологій неможливе без вивчення механізму дії оптичної енергії на тваринний організм.

Мета досліджень – теоретичне обґрунтування принципів керування енергетичною дією оптичного випромінювання на організм тварини на основі вирішення таких наукових задач:

визначення шляхів проникання оптичного випромінювання в тваринний організм;

обґрунтування і пояснення механізму взаємодії енергії оптичного випромінювання із сприймаючими структурами організму.

Матеріали та методика досліджень. Первинний механізм поглинання і трансформації енергії оптичного випромінювання в тваринному організмі та теоретичне обґрунтування принципів керування енергетичною дією оптичного випромінювання достатньо повно пояснюється на основі теоретичного дослідження явища фотореактивації [1, 3].

Явище фотореактивації, що проявляється на живому організмі в зменшенні прояву дії від короткохвильового оптичного випромінювання його подальшим більш довгохвильовим опроміненням, є одним із можливих екологічних методів кількісного регулювання впливу оптичного випромінювання на біологічний об'єкт, тобто є перспективним методом керування продуктивністю фотобіологічного процесу заданої якості.

Результати досліджень. Системний аналіз світових досліджень останніх років [2, 4, 5, 8] дають можливість реалізувати пояснення механізму взаємодії оптичної енергії із структурними складовими тіла опромінюваної тварини на основі явища фотореактивації з позицій квантово-механічної теорії.

Залежно від енергії кванта (фотона) оптичного випромінювання ($h\nu$), що діє на біологічний об'єкт, відбувається його поглинання електроном, що знаходиться на відповідному за енергією «дозволеному» енергетичному рівні сприймаючої структури об'єкта: кванти високої енергії поглинаються атомарними електронами, менш енергетичні фотони – поглинаються електронно-енергетичними оболонками молекул тощо.

Експериментально встановлено також, що при дії кванта (фотона) оптичного випромінювання на молекулу (атом) можлива зміна її енергетичного внутрішнього стану в таких напрямках [3].

1. *Збільшується її електронна енергія*, тобто електрони, поглинаючи оптичні кванти, збуджуються (піднімаються) на більш високі «дозволені» енергетичні рівні і, тим самим, *зростає реакційна спроможність молекули*.

2. *Збільшується коливальна (теплова) енергія молекули*, обумовлена коливаннями атомів усередині молекули від перерозподілу поглинутої енергії оптичних квантів досить низької енергії, і, як результат, *зростає температура цього молекулярного комплексу*.

3. *Змінюється ротаційна енергія, що відповідає за обертання (просторову структуру) всієї молекули або її частини, що взаємодіє з квантами і децю змінюється просторова структура молекули (відповідно окремі її параметри).*

В узагальнено спрощеному вигляді вище викладене можна записати виразом:

$$h\nu = (E_e + E_k + E_p)_{\text{кін}} - (E_e + E_k + E_p)_{\text{нач}}, \quad (1)$$

де $h\nu$ – енергія фотона випромінювання, що поглинається сприймаючою структурою; E_e – енергія збудження електрона, що «підняла» його на більш високий енергетичний рівень; E_k – енергія, що витрачається на коливання атомів у молекулі; E_p – енергія, що витрачається на зміну ротаційного положення молекули або її частин.

Якщо позначити частоти, що відповідають електронним, коливальним і ротаційним переходам молекули – ν , то можна записати квантовані значення розподілу енергії поглинутого фотона оптичного випромінювання:

$$h\nu = h\nu_e + h\nu_k + h\nu_p \quad (2)$$

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено [2, 4, 6], що (залежно від складності структурної будови молекули і місця дії на неї фотона) частота фотонів ν_e відповідає ультрафіолетовому і, частково, видимому випромінюванню, ν_k – інфрачервоному випромінюванню і ν_p – мікрохвильовому випромінюванню. Тобто, у спрощеному викладенні, при опроміненні молекули ультрафіолетовим випромінюванням проходить активація її електронів, при опроміненні інфрачервоним випромінюванням – збільшується її теплова енергія, а при мікрохвильовому опроміненні – змінюється її просторове положення відносно сусідніх молекул.

Вираз (2) показує, що при аналізі взаємодії фотонів оптичного випромінювання із молекулами об'єкта, що опромінюється, залежно від будови енергетичної структури молекули, енергія фотона може поглинатися і перерозподілятися відразу за трьома напрямками. Але пояснення процесу фотореактивації з урахуванням трьох енергетичних складових молекули матиме громіздкий вигляд, тому доцільно подати пояснення первинного механізму дії оптичного випромінювання на тваринний організм за взаємодією фотонів випромінювання лише з енергетичними рівнями молекули.

Виходячи із цього допущення, розглянемо первинний механізм процесу фотореактивації біологічного впливу оптичного випромінювання.

1. При опроміненні біоструктури поглинена енергія фотонів збуджує електрони атомів чи молекул у фоторецепторах на відповідно вищі «дозволені» енергетичні рівні, із яких відбувається деякий перерозподіл цієї енергії (за період $\tau \sim 10^{-10}$ с) і електрони (їх атоми, молекули, або весь комплекс – клітина) переходять у більш стійкий збуджений стан, але з меншим рівнем енергії. У цьому стані вони можуть вступати в хімічну реакцію та утворювати (за відсутності подальшого доопромінення) продукт фотореакції.

2. Якщо на цей об'єкт знову впливати випромінюванням, але більш довгохвильовим (із меншою енергією фотонів), то є допустимим повторне збудження електронів на вищий енергетичний рівень, із якого вони мають більшу ймовірність повернення на свій початковий енергетичний рівень з віддачею поглинутої (за два етапи збудження) енергії ближнім структурам, або випромінюючи її фотонами відповідної енергії. Тобто опромінена двома різноенергетичними потоками випромінювання молекула не бере участі в утворенні фотопродукту. Таким чином, спостерігається фотореактивація (відновлення нейтрального стану) збудження біомолекули.

3. Дещо складніше описується процес реактивації, якщо молекула має тісніші енергетичні зв'язки з сусідніми молекулярними структурами і встигає вступити у фотохімічну реакцію (що спостерігається у високо організованих тваринних організмів при інтервалі часу між первинним і реактивуючим актами опромінювання більше 10^{-3} с) [4].

У цьому випадку частина енергії реактивуючого (вторинного) фотона випромінювання витрачається на розривання міжмолекулярних електронних зв'язків, що утворилися в первинній фотохімічній реакції, полегшуючи відновлення збуджених молекул у початковий енергетичний стан.

Чим складніший за структурною будовою об'єкт опромінювання, тим більша ймовірність одержати фотореактивуючу дію від вторинного опромінення і тим складнішим є ступеневий процес відновлення збуджених молекул у початковий енергетичний стан.

Згідно із *законом квантової еквівалентності Ейнштейна* число реагуючих молекул M пропорційно квантовому виходу фотореакції η

$$M = \eta n_{\phi}, \quad (3)$$

де n_{ϕ} – кількість поглинутих фотонів (квантів) випромінювання; η – квантовий вихід фотореакції.

На основі виразу (3) і теоретичних викладок, наведених у [3], залежність кількості молекул, що беруть участь у фотопроцесі, від інтенсивності збуджуючого випромінювання описуються такими виразами.

1. При ступінчастому збудженні молекули

$$\frac{dn^{**}}{dt} = n^* B_{23} \varphi_{23} - n^{**} \frac{1}{\tau^{**}}; \quad (4)$$

$$\frac{dn^*}{dt} = n_0 B_{12} \varphi_{12} - n^* \left(B_{23} \varphi_{23} + \frac{1}{\tau^*} \right), \quad (5)$$

де n^* , n^{**} – число молекул у збудженому стані, відповідно на первинному і реактивуючому енергетичних рівнях (A^* , A^{**}); B_{12} і B_{23} – ймовірності збудження електронів молекул, відповідно, на дозволених синглетний S_1 , S_3 та триплетний T_1 , T_3 енергетичні рівні збудження; φ_{12} і φ_{23} – щільності потоку фотонів збуджуючого випромінювання, відповідно з першого на другий та з другого на третій енергетичні рівні; τ^* і τ^{**} – тривалість знаходження молекули в першому і другому збуджених станах.

Розв'язок цих рівнянь дає можливість визначити кількість реактивованих молекул

$$n^{**} = n_0 \frac{B_{12} B_{23} \varphi_{23} \tau^* \tau^{**} \varphi_{12}}{1 + B_{23} \varphi_{23} \tau^*} \quad (6)$$

2. У випадку кооперативного механізму збудження фотореактивації рівняння (4) і (5) записуються так:

$$\frac{dn^{**}}{dt} = \alpha(n^*) - n^{**} \frac{1}{\tau^{**}}; \quad (7)$$

$$\frac{dn^*}{dt} = n_0 B_{12} \varphi_{12} - n^* \frac{1}{\tau^*} - 2\alpha(n^*)^2, \quad (8)$$

де $\alpha(n^*)$ – кількість збуджених до першого енергетичного рівня молекул, котрі віддають енергію збудження сусіднім молекулам для переведення їх на другий збуджений рівень (коефіцієнт кооперативної взаємодії), n^{**} – кількість молекул, в яких фотореактивується первинне збудження.

При аналізі процесу фотореактивації слід зважати на те, що двоступінчасте збудження електронів може проходити як по синглетних, так і триплетних енергетичних рівнях залежно від «заселеності» їх підрівнів.

Заселеність синглетного енергетичного рівня під час опромінення визначається виразом:

$$G_{S1} = N_{S1} \frac{\tau_1^*}{\tau_2} = \frac{I \tau_2 \sigma_1 \tau_1^*}{h\nu \tau_2}, \quad (9)$$

де I – інтенсивність випромінювання; τ_1^* – тривалість знаходження електрона на синглетному збудженому рівні S_1 ; τ_2 – тривалість імпульсу випромінювання; σ_1 – величина енергетичного переходу з основного рівня на збуджений ($S_0 \rightarrow S_1$); N_{S1} – кількість молекул, що перейшла в збуджений стан за час τ_2 .

Збуджені до рівня S_1 молекули із виходом ψ_{isc} переходять на рівень T_1 , де проходить їх «накопичення» до кінця часу імпульсу випромінювання, їх число визначатиметься виразом:

$$N_{T1} = N_{S1} \psi_{isc}. \quad (10)$$

Середня заселеність триплетного енергетичного рівня на кінець часу опромінення становитиме

$$\overline{G}_{T1} = \frac{N_{T1}}{2} = \frac{I \tau_2 \sigma_1}{2h\nu} \psi_{isc}. \quad (11)$$

Визначимо відношення заселеності збудженими електронами приведених енергетичних рівнів:

$$\Delta = \frac{G_{S1}}{G_{T1}} = \frac{\frac{I \tau_2 \sigma_1 \tau_1^*}{h\nu \tau_2}}{\frac{I \tau_2 \sigma_1}{2h\nu} \psi_{isc}} = \frac{2\tau_1^*}{\tau_2 \psi_{isc}}. \quad (12)$$

Аналіз виразу (12) показує, що із збільшенням тривалості імпульсу випромінювання збільшується заселеність триплетного збудженого рівня,

тобто збільшується кількість електронів, збуджених на триплетні енергетичні рівня – реалізується триплетний канал двоступінчастого збудження.

Виконаємо теоретичне дослідження можливості проходження одноступінчастої фотохімічної реакції.

Відомо, що квантовий вихід фотохімічної реакції визначається через відношення швидкості проходження хімічної реакції з цього енергетичного рівня до суми всіх швидкостей можливих дезактивацій даного рівня [3, 9]. Тобто квантовий вихід фотохімічної реакції із першого збудженого синглетного енергетичного рівня можна визначити із виразу:

$$\chi^S_{chem} = \frac{1/\tau^S_{chem}}{1/\tau^S_{chem} + 1/\tau^*_S + 1/\tau^S_{isc} + 1/\tau^S_{fl} + \sigma_2^S \varphi}, \quad (13)$$

а квантовий вихід фотохімічної реакції із першого триплетного енергетичного рівня можна визначити за формулою

$$\chi^T_{chem} = \frac{1/\tau^T_{chem}}{1/\tau^T_{chem} + 1/\tau^*_T + 1/\tau^T_{isc} + 1/\tau^T_{fl} + \sigma_2^T \varphi} \psi_{isc}, \quad (14)$$

де χ^S_{chem} , χ^T_{chem} – відповідно квантові виходи фотореакцій із синглетного і триплетного енергетичних рівнів збудження молекули, $1/\tau_{chem}$, $1/\tau^*$, $1/\tau_{isc}$, $1/\tau_{fl}$ – константи швидкостей дезактивації енергії збудження із синглетного і триплетного рівнів відповідно через хімічну реакцію, темнову релаксацію, інтеркомбінаційну конверсію, флуоресценцію; $\sigma_2 \varphi$ – енергетична характеристика кількості молекул і тривалості їх збудження на вищий (другий) енергетичний рівень.

Аналіз виразів показує, що чим більша тривалість й інтенсивність другого (реактивуючого) імпульсу ($\sigma_2 \varphi$), тим менша ймовірність у молекул, що опромінюються, вступити у фотохімічну реакцію після первинного (збуджуючого) імпульсу випромінювання і більша ймовірність перейти на вищий енергетичний рівень, що є достатнім поясненням явища фотореактивації.

Оскільки в процесі фотореактивації молекул високоорганізованих біологічних структур, які характеризуються складною будовою, значна ймовірність відновлення початкового стану збуджених молекул через випромінювання поглинутої енергії у вигляді фотонів люмінесценції, енергія яких дорівнює повній енергії, витраченій на фотореактивацію, то кількість фотореактивованих молекул біооб'єкта можна визначити за інтенсивністю потоку цих фотонів (за інтенсивністю флуоресценції, або фосфоресценції) або в загальному випадку – за інтенсивністю спектра і тривалістю люмінесценції [6].

Так для випадку, коли випромінювальна дезактивація високоенергетичного збудженого стану (A^{**}) здійснюється за час значно менший, ніж періоди життя проміжних станів (протилежний випадок – поки що неінформативний) вирази для кількісного визначення випромінювання

люмінесценції при ступінчастому або кооперативному механізмі збудження мають такий вигляд:

при ступінчастому збудженні молекул процес зміни інтенсивності люмінесценції, після припинення дії реактивуєчого збудження, буде відповідати експоненціальному закону:

$$n^{**}(t) = n_0^{**} e^{-t/\tau^{**}} \quad (15)$$

залежність для визначення інтенсивності люмінесценції у випадку кооперативного механізму фотореактивації має вигляд:

$$n^{**}(t) = n^{**} \frac{e^{-2t/\tau^*}}{[1 - 2\alpha\tau^* n^* (1 - e^{-t/\tau^*})]^2} \quad (16)$$

З виразу (16) видно, що при кооперативному механізмі процес реактивації молекул другого збудженого стану є складною функцією від тривалості знаходження молекул у першому збудженому стані τ^* та кількості (концентрації) молекул у цьому стані, n^* .

Одержати практичне підтвердження наведеного пояснення механізму фотореактивації біологічної дії конкретної ділянки спектра оптичного випромінювання можна експериментальним шляхом за такою методикою [8]:

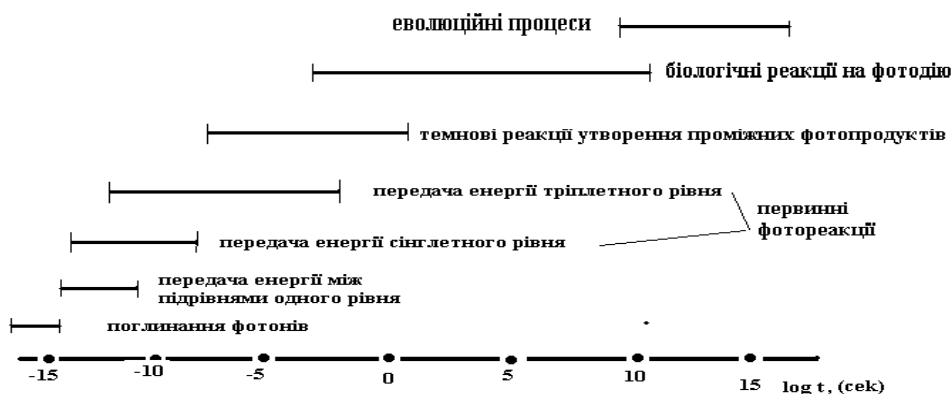
– після первинного опромінення досліджуваного біологічного об'єкта короткохвильовим оптичним випромінюванням (випромінювання, що спричиняє очікувану біологічну дію) заміряти спектр його вимушеної люмінесценції;

– послідовно за першим опроміненням, виконати друге кероване опромінення об'єкта більш довгохвильовим випромінюванням, змінюючи час, спектр й інтенсивність цього реактивуєчого випромінювання, і знову виміряти характеристики спектра люмінесценції;

– у випадку реалізації двофотонного процесу поглинання, в спектрі люмінесценції буде спостерігатися зсув максимуму інтенсивності випромінювання у більш короткохвильову область (порівняно із спектром люмінесценції від первинного опромінювання).

Варто зазначити, що основна складність проведення даних експериментів полягає в необхідності застосування джерел опромінення, що працюють як у безперервному, так і в імпульсному режимі, причому, тривалість імпульсів повинна бути сумісною із тривалістю міжмолекулярних процесів (рисунок).

Із рисунка також видно, що іншою важливою особливістю цього дослідження є необхідність у використанні швидкорееструючих спектрофотометрів із високою чутливістю і широким спектральним діапазоном можливості вимірювання оптичного випромінювання.



Часова шкала проходження фотофізичних, фотохімічних і фотобіологічних процесів

Характеристика тривалості проходження фотофізичних, фотохімічних, фотобіологічних і еволюційних процесів

Висновки

При відомій будові органічних структур у біологічних об'єктах і визначених їх оптичних характеристиках: спектрах поглинання, відбивання, люмінесценції і т.п.; із достатнім ступенем точності можна кількісно визначити вплив на цей біологічний об'єкт конкретної ділянки спектра оптичного випромінювання.

При цьому можна підсилювати або зменшувати цю дію більш довгохвильовим випромінюванням. Таким чином, створюються передумови для оптичного керування конкретним фотобіологічним процесом (наприклад, регулювання процесом листяутворення або квіткоутворення у рослин, строком їх дозрівання).

На тваринні організми найактивніше впливає ультрафіолетове випромінювання.

Відповідно до викладеного механізму фотореактивації експозицію (дозу) ультрафіолетового опромінення тварин можна знизити, якщо зменшити фотореактивуючу дію видимого випромінювання (на практиці ультрафіолетове опромінення проводиться одночасно із освітленням тваринницьких приміщень).

Якщо застосовувати ультрафіолетове опромінювання тварин при мінімальному освітленні (наприклад, у вечірній час – без освітлення приміщень) ефективність його буде більшою.

Таке опромінення економічно вигідно, оскільки зменшує енергетичні витрати.

Список літератури

1. Левин В. Л., Современное состояние проблемы фотореактивации. // Фотобиология животной клетки / В. Л. Левин, К. А. Самойлова. – Ленинград: Наука, 1979. – С. 96–107.
2. Мельник И. Л. Сравнительное действие УФ и ИК радиации на организм некоторых сельскохозяйственных животных / И. Л. Мельник. // Ультрафиолетовое излучение и его применение в биологии: Материалы X Всесоюз. совещ. по биол. действию УФ излучения, Пушчино-на-Оке, 1973. –

С.182–192.

3. Овсянkin В. В. Кооперативная сенсibilизация фотофизических и фотохимических процессов. // Молекулярная фотоника / В. В. Овсянkin, П. П. Феофилов. – Л.: Наука, 1970. – С.86–105.

4. Ослабление видимым светом эритемообразующего действия УФ-излучения на кожу человека. // Проблемы практической фотобиологии / К. А. Самойлова, Н. В. Сущенко, С. М. Витушкина [и др.]. – Пушино-на-Оке: Изд-во АН СССР, 1977. – С.25–30.

5. Посудин Ю. И. Применение оптических стимулов в биологических исследованиях. // Методы и средства повышения надежности силового электрооборудования в условиях с. х. производства : Сб.тр. УСХА. / Ю. И. Посудин, Л. С. Червинский – К., 1984. – С. 62–70.

6. Червинский Л. С. О механизме фотореактивации биологических объектов. // I Всесоюзн. биофиз. съезд.: тезисы докл./ Л. С. Червинский – М., 1982. – Т. II. – С. –310.

7. Червинский Л.С. Первичные механизмы воздействия оптического излучения на живые организмы / Л. С. Червинский // Науковий вісник НУБіП України. – 2013. – № 184, ч. 1. – С. 34–40.

8. Шевель С.С. Действие ОИ на кожно-шерстный покров сельськохозяйственных животных // Механизмы и оценка эффективности действия оптического излучения на биологические системы / С. С. Шевель, Л. С. Червинский. – Пушино-на Оке: Изд-во АН СССР, 1985. – С. 77–85.

9. Chervinsky L. About the mechanism of photoreactivation of the biological objects. // Матер. міжнар. конф. The European Biomedical Optics Week, BIOS Europe'97, September 4-8, 1997, Sanremo, Italy. [19–30].

На основании анализа явления фотореактивации и положений квантовой биофизики изложен методический подход к управлению энергетическим воздействием оптического излучения на животных в процессе их выращивания.

Фотореактивация, животные, механизм действия оптического излучения.

It is ground of the analysis of a phenomenon of a photoreactivation and positions of a quantum biophysics the methodical approach to control of power effect of optical radiation on animal is set up during their growing.

Photoreactivation, animals, effect of optical radiation.