

*Карпенко В. І, Коростинська О. С,  
Лошицький П. П., Ніколов М. О.*

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НЕТЕПЛОВОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ НА АКТИВНІСТЬ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Наведені результати експериментальних досліджень впливу електромагнітних полів нетеплової інтенсивності на біологічні об'єкти. На основі отриманих даних визначені залежності росту клітин від основних параметрів цих полів.*

Як правило, в медицині застосування електромагнітних полів низькочастотних діапазонів пов'язано з трансформацією їх енергії в тепло, або з безпосереднім накладанням значних напруг (порядку кількох десятків вольт при щільності струму до  $0,02 \text{ мА/см}^2$ ) на тканини організму для регулювання нервово-м'язового апарату. Для отримання помітного ефекту регулювання життєдіяльності рослинних клітин подібні режими через їх слабкість не застосовуються, а використовуються, переважно, імпульсні режими з амплітудою імпульсу близько кількох кіловольт. Але навіть такі значні імпульсні амплітуди дуже мало впливають на рослинні клітини, а в практичній діяльності використовуються потужні ультразвукові поля або іонізуюче випромінювання [1]. Застосування потужного ультразвукового опромінення можливо не для всіх видів рослин, а тільки для обробки живців рослин перед їх живленням. Іонізуюче опромінення використовують більш широко як для пригнічення реакції відторгнення імунної системи живцевих рослин, так і для передпосівної обробки насіння. Використання в технологічних процесах потужного ультразвукового опромінення, а особливо іонізуючого, пов'язано не тільки з великими енергетичними витратами і необхідністю створення дорогого і складного обладнання, а головним чином з небезпекою для обслуговуючого персоналу і можливими мутаціями в опромінених об'єктах. Так само, як електромагнітне й іонізуюче опромінення, на життєдіяльність клітин рослин можуть впливати електромагнітні поля низької інтенсивності, але при цьому повністю виключається можливість мутаційних змін [2].

Опромінення надвисокочастотного діапазону використовується як для теплового впливу на

організм у класичній фізіотерапії, так і для отримання нетеплових ефектів у відносно недавно створеній НВЧ-терапії — терапії надвисоких частот.

НВЧ-терапія використовує нетеплові рівні опромінення в кількох експериментально знайдених частотних ділянках, а найчастіше — на окремих частотах. Це так звані “терапевтичні частоти”, що відповідають довжині хвиль 7,2; 5,6; 4,9; 4,2 мм [3].

У лікувальній практиці незалежно від частотного діапазону і потужності, яка, звичайно, коливається від десятків до одиниць міліват на квадратний сантиметр поверхні опромінення, впливова доза або час опромінення визначаються тільки емпірично. На початку розвитку НВЧ-терапії цей час опромінення становив від 40 до 70 хвилин, згодом зменшився до  $15 \div 20$  хвилин. При цьому намагалися встановити якісь фізіологічні параметри — тиск, частоту імпульсів, зміну потенціалів мозку — для визначення оптимальної дози опромінення, яка могла б слугувати критерієм управління зворотним зв'язком для НВЧ-генератора. Однак виявилось, що ці параметри змінюються залежно від статі, віку та стану пацієнта, тобто зміни не мають загального характеру. Вже в перших дослідженнях впливу НВЧ-опромінення на біологічні об'єкти з'ясувалося, що існує деякий поріг потужності, вище якого з'являється ефект впливу, при подальшому збільшенні величини поглиненої потужності ефект впливу спочатку збільшується, а потім досягає насичення. Подібна реакція спостерігалась у різних обводнених біологічних об'єктів, однак величини порогу і насичення у різних авторів не збігаються [4]. Такі розбіжності намагалися пояснити наявністю неврахованих величин жирового покриву, який слугує своєрідним

трансформатором імпедансів і визначає різну відбивну здатність шкіри. Таким чином, можна зробити висновок, що, незважаючи на багаторічний досвід використання НВЧ-опромінення і значний емпіричний матеріал, сьогодні ще немає єдиної думки ні про весь спектр ефектів, спричинених цим опроміненням, ні про всі механізми впливу, ні про режими та параметри його застосування.

Метою даної статті є визначення впливу різних параметрів і режимів електромагнітного поля нетеплової інтенсивності на активність клітин, що знаходяться у водному середовищі, або містять у собі достатню кількість води. Ці дані можуть бути використані при розробці простої і надійної біомедичної апаратури високої ефективності, низької вартості та безпечної для обслуговуючого персоналу.

Дослідження впливу низькочастотних електромагнітних полів нетеплової інтенсивності на біологічні об'єкти проводились на насінні проса, яке пророщувалося у воді. В якості джерела імпульсної напруги типу "меандр" використовували генератор ГЗ-III, який забезпечував перекриття частотних діапазонів від 20 Гц до 10 кГц. Електромагнітне випромінювання отримували за допомогою набору паралельних провідникових пластин, які при розташуванні кожних двох паралельно одна одній утворювали конденсатор. Поле по краях цього набору конденсаторів і було опромінювальним електромагнітним полем, яке впливало на воду з насінням. Кількість води в стандартній чашці Петрі, де пророщувалося насіння, була однаковою в усіх проведених дослідах. До початку дослідів проводили калібрування величини напруги, яка виникала в рідині (на тому рівні, де знаходилося насіння) від амплітуди імпульсу, що надходив на конденсатори. Калібрування проводили щупом, ізольований кінець якого занурювали у воду, а корпус щупа заземлювали. Напруга водного середовища потребує вимірювання, тому що генератор подає амплітуду імпульсів на конденсатор, а по краях поле і поляризаційні ефекти не контролюються. Калібрували весь частотний діапазон вимірів, у межах помилки вимірів (15 %), відношення амплітуди імпульсу  $V$  до напруги в середовищі  $\vartheta$  зберігалось сталим  $\vartheta = 2 \cdot 10^{-2} V$ .

Насіння опромінювалося імпульсами з заданою амплітудою упродовж часу  $T$  один раз на добу. Дослідження тривало 5 днів. Порівнюючи відносні величини довжини коренів і паростків опромінених і неопромінених зразків, оцінювали вплив опромінення.

Для проведення вимірів у діапазоні від 6 до 65 ГГц використовували як стандартні, так і спеціально розроблені генератори. Стандартні ге-

нератори Г4-141 і Г4-142 використовувались з перехідним гнучким діелектричним хвилеводом, який дозволяв каналізувати електромагнітну енергію від джерела до випромінювача. Випромінювач — це рупорна антена відповідного діапазону довжини хвиль, на вході якої розміщувався електрично керований р-і-п атенюатор, необхідність якого визначалась тим, що вхідна потужність генератора регулюється недостатньо точно. Атенюатор і рупорна антена добре узгоджувались (КСХН не більше 1,3) на всьому робочому діапазоні частот. Однак для вимірів на заданих частотних точках проводилась додаткова трансформація імпедансів з допомогою елементів, що підстроюються, і КСХН у точках вимірювання не перевищував  $1,05 \div 1,07$ . Перед вимірюванням калібрували випромінювач, для чого визначали залежність ослаблення його потужності, зумовлюваного р-і-п атенюатором, від величини струму і відповідно величини вихідної потужності генератора від величини струму атенюатора. Величина вихідної потужності контролювалась до значення 1 мкВт за допомогою стандартного вимірювача потужності МЗ-22, а нижче 1 мкВт — за допомогою вимірювальних приймачів П5-13А, П5-14А і П5-15А. В діапазоні частот  $49 \div 70$  ГГц потужність контролювалась за допомогою приймача П5-15А з виносною змішувальною головкою відповідного діапазону.

Виявилось, що для довгохвильової частини НВЧ-діапазону простіше зробити генератори фіксованих частот, ніж випромінювачі. Для частот 6,1 ГГц і 19 ГГц було виготовлено інтегральний генератор з використанням польового транзистора з діелектричним резонатором, в якості випромінювача використовували металізований кварцовий хвилевід. Вихідна потужність генератора змінювалась від 0,5 мкВт до 2 мВт відповідно до змін робочого струму при стабілізованій фіксованій частоті.

Для частотного діапазону 60 ГГц був розроблений хвилевий генератор з використанням лавино-пролітного діода, з вихідною потужністю від  $10^{-6}$  до  $10^{-9}$  Вт. Випромінювач мав вигляд ширококутної антени.

На рис. 1 зображено типові залежності відносних величин довжини коренів (хрестики) і довжини паростків (крапки) від часу опромінення при заданій частоті і амплітуді імпульсів. Отримані дані характеризуються наявністю зон біологічної активності і зон гальмування росту біологічних об'єктів. При цьому максимальні значення в зоні активності біологічних об'єктів перевищували величину контрольних зразків не більше як у 2,2—2,7 раза, а в зоні гальмування росту біологічних об'єктів мінімальні значення довжини менші за контрольні у 4—8 разів.

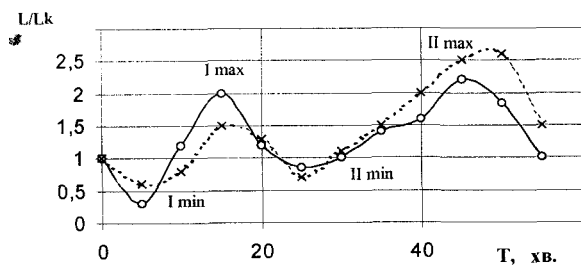


Рис. 1. Залежність відносної довжини коренів (пунктирна крива) і паростків (суцільна крива) від часу опромінення

Для вибору режиму роботи в низькочастотній зоні імпульсного електромагнітного опромінення необхідно знайти основні закономірності появи цих екстремальних величин, які визначаються активацією і гальмуванням відповідних біологічних процесів.

У межах кожного частотного діапазону, в яких проводились виміри, зберігається одна і та сама закономірність залежності часу опромінення  $T_{\max}$ , при якому довжина коренів чи паростків досягає максимального значення, від амплітуди напруги  $V$ , яка на пластинах конденсаторів, або, відповідно, від напруги  $\mathcal{U}$  у водному середовищі, де перебувало опромінене насіння. Для максимумів ця залежність має вигляд  $VT_{\max} = \text{const}$ , для мінімумів час опромінення  $T_{\min}$  не залежить від напруги.

На рис. 2 показана характерна залежність часу активності проростання насіння проса  $T_{\max} = f(V)$  (суцільні криві) і  $T_{\min} = f(V)$  (пунктирні криві) від напруги при частоті  $F = 10^5$  Гц. При збільшенні напруги  $V$  перше максимальне значення часу  $T_{\max 1}$  наближається до величини першого мінімального значення часу  $T_{\min 1}$ . При  $V = 15$  В ці значення збігаються і експериментально спостерігається велика похибка вимірів у цій точці. Ще одним фактором, що впливає на проростання насіння, є частотний діапазон надходження імпульсів.

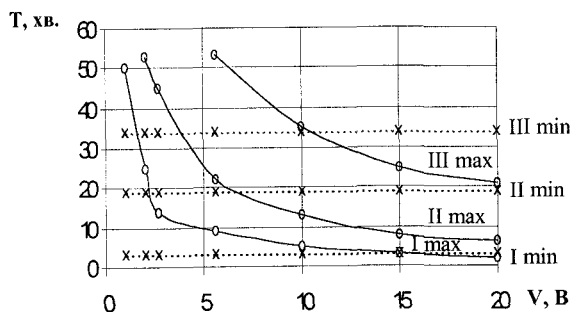


Рис. 2. Залежність перших максимальних (суцільні криві) і мінімальних значень (пунктирні криві) часу активності проростання насіння проса від величини напруги на пластинах конденсаторів

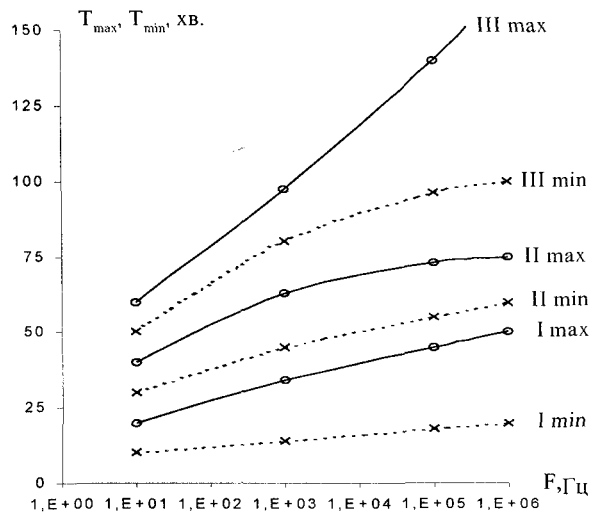


Рис. 3. Залежність часу активності проростання насіння проса від частоти появи імпульсів напруги на пластинах конденсаторів

На рис. 3 показано залежність, що відповідає першим трьом максимумам проростання насіння проса при фіксованій величині амплітуди імпульсу від частоти їх появи  $T_{\max} = f(F)$  (суцільні лінії) і трьом мінімумам проростання  $T_{\min} = f(F)$  (пунктирні лінії). Точки, що відповідають максимальним величинам проростання насіння, означені кружками, точки, що відповідають мінімальним величинам проростання, — хрестиками. Зі збільшенням частоти появи імпульсів екстремальний час збільшується. При цьому залежність  $T_{\min}$  першого і другого мінімумів від частоти майже лінійна, а час  $T_{\min 3}$  (третій мінімум) має відхилення від лінійної залежності.

Якщо доза опромінення насіння проса була оптимальною для одноразового впливу протягом доби, тобто при заданій частоті і амплітуді імпульсів час опромінення відповідав максимальним величинам проростання коренів і паростків, то при багаторазовому опромінюванні через фіксовані інтервали часу величини довжини коренів і паростків не перевищували величини, отримані при одноразовому опроміненні. Було також встановлено, що багаторазове опромінювання насіння, часовий інтервал якого не збігається з “резонансним” інтервалом даного біологічного об’єкта, пов’язаного з часом реалізації біохімічних процесів, спричиняє значне зменшення швидкості росту (довжини коренів і паростків) порівняно з одноразовим опроміненням упродовж доби. Тільки при “резонансному” інтервалі результати збігаються. Отримана залежність відносної довжини опромінених і неопромінених паростків від інтервалу часу між опроміненнями наведена на рис. 4. Дана залежність практично не змінюється від числа опромінь упродовж доби. З наведеного графіка вид-

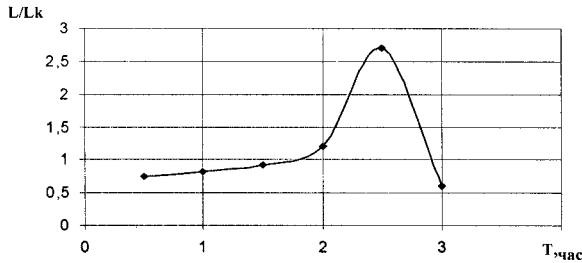


Рис. 4. Залежність відносної довжини паростків від інтервалу часу між опроміненнями

но, що коли інтервал між опроміненнями становить 2,5 год., швидкість росту досягає максимального значення, але не перевищує максимального значення при одному опроміненні на добу протягом періоду росту.

При впливі ЕМП у діапазоні НВЧ особливу увагу слід звернути на той факт, що зміна потужності опромінення від  $10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup> до 5 мВт/см<sup>2</sup> в межах помилки вимірів мало впливає на якісну картину залежності, показану на рис. 1. На рис. 5 зображена експериментальна залежність зміни часу опромінення, що відповідає максимальній активності об'єкта, від потужності випромінювання на частоті 63 ГГц. Така залежність, можливо, пов'язана з тим, що збільшення потужності опромінення сприяє прискоренню процесів рекомбінації продуктів, отриманих у процесі опромінення води. Експериментально показано, що в процесі опромінення води концентрація утвореного пероксиду водню (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), яка сама слугувала мірою дисоціації води, зменшується зі збільшенням дози опромінення [5]. Величина дози опромінення (при постійній потужності — час опромінення), що відповідає максимальній активності біологічного об'єкта, так само, як і доза, що відповідає мінімальній активності, має лінійну частотну залежність в межах похибки експерименту 15%.

На рис. 6 наведені залежності екстремальних доз, які нормуються часом опромінення, від частоти випромінювання для перших двох мінімумів і максимумів активності (час, що відповідає мак-

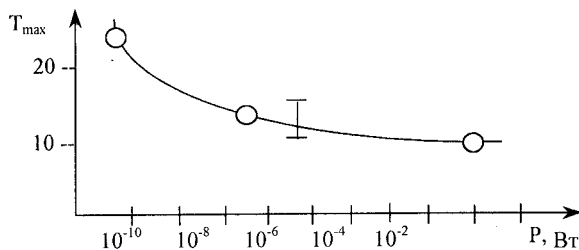


Рис. 5. Залежність часу опромінення, що відповідає максимальній активності проростання насіння, від потужності опромінення при сталій частоті сигналу

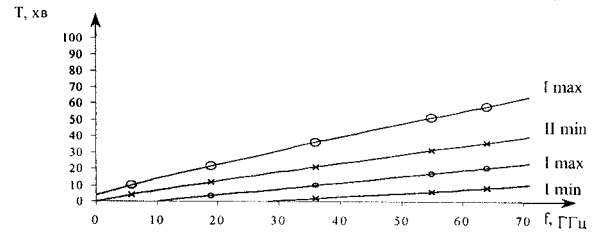


Рис. 6. Залежність екстремальних доз опромінення від частоти випромінювання для перших двох мінімумів і максимумів активності проростання насіння

симальним величинам росту насіння, позначений крапками, мінімальним — хрестиками).

Відношення між сусідніми максимальними і мінімальними відрізками часу (дозами) не є сталим, а зменшується зі зростанням частоти. Так, на частоті випромінювання 63 ГГц це відношення становить  $T_{\text{макс2}}/T_{\text{мін1}} = 60/20 = 3$  і  $T_{\text{мін2}}/T_{\text{мін1}} = 40/10 = 4$ , а на частоті 19 ГГц —  $T_{\text{макс2}}/T_{\text{мін1}} = 24/2 = 12$ .

При наявності низькочастотної модуляції несучої частоти НВЧ-діапазону залежно від дози опромінення з'являються додаткові максимуми і мінімуми біологічної активності об'єкта, тобто чергування максимальної і мінімальної активностей відбувається значно частіше, ніж при наявності тільки НВЧ-складової.

На рис. 7 показана експериментальна залежність відносної величини довжини дослідних і контрольних паростків від часу опромінення при частоті 63 ГГц (крива 1) й імпульсною модуляцією типу "меандр" частотою 8 Гц (крива 2). Як бачимо, активність біологічних об'єктів при малих величинах часу опромінення змінюється тільки при дії низькочастотних складових.

Отримані експериментальні результати дозволяють зробити висновки щодо визначення параметрів низькочастотних імпульсних електромагнітних полів впливу на рослинну клітину:

— запропонована мінімальна величина амплітуди імпульсу  $\Phi = 0,02$  В пригнічує рослинні клітини, тому на всіх частотах перший мінімум передре першому максимуму;

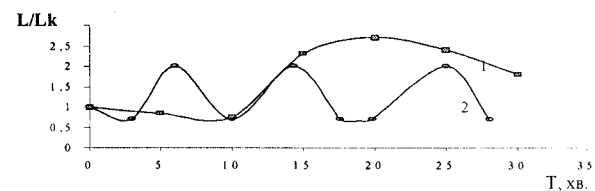


Рис. 7. Залежність відносної величини довжини паростків від часу опромінення при частоті 63 ГГц (крива 1) й імпульсною модуляцією типу меандр частотою 8 Гц (крива 2)

— при зменшенні частоти надходження імпульсів типу "меандр" час, що відповідає мінімальним і максимальним значенням проростання насіння проса, зменшується;

— для отримання потрібного результату слід вибирати амплітуду імпульсу і час опромінення, що відповідають мінімальним і максимальним величинам проростання.

При виборі параметрів електромагнітних полів НВЧ-діапазону необхідно враховувати той факт, що наявність модуляції, наприклад, імпульсної типу "меандр", удвічі зменшує ефективний час опромінення, що мало би призвести до збільшення часу появи екстремальної активності біологічного об'єкта, але насправді призводить до появи нових, пов'язаних з модуляцією, максимумів, які значно частіше чергуються.

Отримані експериментальні дані дозволяють запропонувати можливий механізм впливу НВЧ-опромінення на біологічні об'єкти, які містять в собі воду або знаходяться у водному середовищі.

Опромінення впливає на структуру води аналогічно процесу "хімічного тертя", перерозподілу енергії, що змінює конформацію молекул води і утворює структури, подібні кластерам [5]. Молекули води, які мають більшу енергію, взаємодіють з гідрофільними зв'язками білка, змінюють його активність за принципом "ножиць" [6]. При цьому за час опромінення води утворюється певна кількість таких "активованих" молекул води. Залежно від будови основних білкових макромолекул наявність активованих молекул

може на початку або зменшувати активний центр, і тим самим активність білка, або його збільшувати, відповідно до того, які гідрофільні зв'язки мають меншу енергію. Після заповнення зв'язків з меншою енергією, "активовані" молекули води починають заповнювати зв'язки, які мають більшу енергію, при цьому величини активності білка починають набувати протилежного значення. Гідрофільні зв'язки, вже заповнені активними молекулами води, починають розриватися, і "активовані" молекули води, віддавши енергію білковій молекулі, витискаються в навколишнє водне середовище.

Залежно від співвідношення кількості гідрофільних зв'язків білкової молекули з більшою чи меншою енергією з кількістю "активованих" молекул води (що пропорційно часу опромінювання) кінцева активність білка може змінюватися від максимуму до мінімуму періодично. Залежно від того, яка кількість "активованої" води спричиняє опромінення, відповідно змінюється і активність білкових макромолекул, що призводить до змін і інтегральних властивостей живого організму.

Таким чином, для кожного біологічного об'єкта, який характеризується власним набором макромолекул, необхідно вибрати найбільш оптимальну сукупність параметрів впливу ЕМП (амплітуда сигналу, його частота, наявність модуляції) для досягнення ефективної регуляції їх активності.

1. Предпосевное облучение семян сельскохозяйственных культур.— МАН СССР, 1963.

2. Гродзинский Д. М. и др. Формирование радиобиологической реакции растений.— Киев: Наукова думка, 1984.

3. Бецкий О. В. КВЧ-терапия//Радио.— 1995.—№ 7.— С. 4—6.

4. Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности.— М.: Радио и связь. 1991.— 168 с.

5. Вакс В. Л. и др. Диссоциация воды под действием СВЧ-излучения//Известия ВУЗов. Радиофизика.— 1994.— Т. 37.— № 1.— С. 276—279.

6. Кайваряйнен А. И. Динамическое поведение белков в водной среде и их функции.— Ленинград: Наука, 1980.— С. 270.

*Karpenko V. L., Korostinskaya O. S.,  
Loshitskiy P. P., Nikolov N. A.*

## THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS' PARAMETERS OF NON-THERMAL INTENSITY ON BIOLOGICAL OBJECTS ACTIVITY REGULATION

The outcomes of experimental researches of effect of electromagnetic fields of non-thermal intensity on biological objects are adduced. On the basis of the obtained data the relations of growth of cells to main parameters of these fields are determined.