

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМЕНІ В.М.ГЛУШКОВА

на правах рукопису

Загородній Юрій Віталійович

Побудова та дослідження математичних моделей  
впливу фітовірусів на рослинний організм при  
зміні екологічних умов.

05.13.02 - Математичне моделювання у наукових дослідженнях.

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1996



00759794 (+)

Дисертація

Робота виконана, в Київському  
ім. Тараса Шевченка.

Наукові керівники:

доктор технічних наук, проф. І.В.Вейко

академік УААН, доктор біологічних наук, проф. А.Л.Войко

Офіційні опоненти:

доктор фіз-мат. наук, професор В.М.Онопчук

доктор біологічних наук, професор В.М.Войцицький

Провідний заклад - науково-дослідний інститут  
теоретичної фізики НАН України  
(м.Київ)

Захист відбудеться 15 травня 1996р. о 12 год. на  
засіданні спеціалізованої ради Д 01.39.05 при Інституті  
кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України за адресою: 252207,  
м.Київ, пр. акад. Глушкова, 40.

З матеріалами дисертації можна ознайомитись у науково-  
технічному архіві інституту.

Автореферат розісланий 12 квітня 1996р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради,  
кандидат біологічних наук

Л.М.Козак

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальність роботи Дисертаційна робота присвячена побудові комп'юторної моделі для дослідження механізмів впливу вірусів на життєдіяльність культурних рослин у різних екологічних умовах. Основна мета роботи полягає у розвитку інструментарію математичного моделювання та його використання у вирішенні важливої наукової проблеми дослідження складних процесів вірусної репродукції та бульбашкової азотофіксації у рослин при різних екологічних умовах. Відомо, що сучасна екологічна криза приводить до часткового і навіть до повного руйнування габітусу рослин. При певних критичних умовах організм стає неспроможним ефективно підтримувати свій гомеостаз через втрату своєї відтворювальної сили. При ураженні рослини фітовірусами у розбалансованій екологічній ніші, останні часто мають інтенсивнішу репродукцію ніж в умовах стійкої екологічної рівноваги. Інфіковані рослини квасолі мають у 1,5-2,0 рази менше азотофіксуючих бульбашок, ніж здорові. Тому зараз стають актуальними проблеми вивчення причинно-наслідкових зв'язків у системі "рослина-вірус-середовище". Запропонована у роботі біоструктура математичної моделі життєдіяльності рослини при вірусній інфекції сприяє поглибленому вивченню суті складних еволюційних процесів у поведінці живих організмів. Математичне моделювання процесів розвитку зеленої рослини при вірусній інфекції в різних умовах навколишнього середовища дає змогу інтегрувати знання з різних галузей наук в єдину екологічну систему, що допомагає вибору раціональних стратегій культивування здорових рослин, цілеспрямованому плануванню сільськогосподарського виробництва, створенню відповідних прогнозів епіфітотій хвороб. При дослідженні побудованих моделей вперше виявлено реальні умови, при яких рослина, уражена вірусом, ще може приносити повноцінний урожай.

Метою роботи є розробка математичних моделей та вивчення на їх основі закономірностей процесів, які проходять в рослинному організмі при вірусній інфекції та при дії множини зовнішніх факторів: гамма-опромінування, постійного магнітного поля, температури, вологості ґрунту, рН

середовища, промислового та радіаційного забруднення, азотних добрив.

Мета досягається шляхом розв'язання таких задач:

- а) побудова адекватної математичної моделі розвитку бобових рослин та бульбашкової азотофіксації при дії вищевказаних факторів в умовах вірусної інфекції;
- б) дослідження за допомогою математичного моделювання закономірностей впливу гамма-опромінювання на інфекційні здатності вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro*;
- в) побудова адекватної математичної моделі впливу постійного магнітного поля на стан рослинної клітини та на інфекційну здатність вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vivo* та *in vitro*;
- г) дослідження закономірностей втрати інфекційних властивостей вірусу тютюнової мозаїки при дії підвищеної температури в умовах *in vitro*;
- д) побудова методу графічного введення великих масивів експериментальних даних та результатів обчислювальних експериментів в процесі побудови та дослідження комп'ютерної макромоделі розвитку рослини для скорочення часу досліджень.

Об'єкт та предмет дослідження:

Об'єктом дослідження є стан рослин, закономірності бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції та при дії різних екологічних факторів. Предметом дослідження є важливі для життєдіяльності рослини процеси (такі як фотосинтез, фосфорування, транспорт речовин, ріст, бульбашкова азотофіксація, фітовірусна репродукція та інші) і математичні моделі, які адекватно описують ці процеси.

На захист виносяться такі положення:

1. Розроблена адекватна математична модель життєдіяльності рослини при вірусній інфекції, що враховує біоструктуру об'єкту дослідження, де визначаються потреби елементів цієї структури в речовинах (потенційні параметри цих елементів) та реальна кількість речовин, яка може бути одержана цим елементом (реальні параметри), дозволяє досліджувати процеси розвитку (фотосинтез,

фосфорування, транспорт речовин, ріст, бульбашкова азотофіксація, фітовірусна репродукція та інші), коли вірусна репродукція розглядається як окремий "паразитичний" елемент біоструктури.

2. Створений метод вводу великих масивів даних для адекватного дослідження комп'ютерних моделей на основі графічних можливостей мови Pascal та створення маштабованого екрану для малювання траєкторії даних, значно прискорює час досліджень.

3. Побудовані адекватні математичні моделі впливу таких фізичних факторів як гамма-опромінювання, постійне магнітне поле та підвищена температура на інфекційні властивості вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro* та *in vivo*, що базуються на даних натурних спостережень, допомагають визначати оптимальні значення факторів для вирощування здорового рослинного матеріалу і теоретично обґрунтувати закономірності цих процесів через припущення, що кладуться в основу моделювання.

Конкретна участь автора: В дисертаційній роботі, яка зроблена під керівництвом д.т.н., проф. Вейка І.В. та д.б.н., проф. Войка А.Л., дисертант особисто

- розробив адекватну біоструктуру системи для моделювання процесів розвитку організму при вірусній інфекції з урахуванням законів збереження речовин та енергії;

- виконав основні дослідження по вивченню властивостей вірусів (ВТМ - вірусу тютюнової мозаїки, ВЖМК - вірусу жовтої мозаїки квасолі) в різних екологічних умовах;

- побудував математичні моделі процесів життєдіяльності рослини, бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції та при зміні екологічних умов;

- розробив адекватний математичний опис процесів впливу гамма-опромінювання, постійного магнітного поля та підвищеної температури на інфекційні властивості вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro* та *in vivo*.

#### Методи дослідження:

Для побудови та дослідження математичних моделей процесу репродукції фітовірусів в різних умовах навколишнього середовища використовувались методи побудови математичних

моделей біологічних об'єктів, методи ідентифікації моделей, методи оптимізації, методи чисельного диференціювання та інтегрування функцій, чисельні методи знаходження розв'язків нелінійних рівнянь, інтерполяції функцій. Програмне забезпечення побудовано на основі мови програмування Borland Pascal 7.0.

Міра обґрунтування результатів та висновків, які приведені у дисертації: Результати дисертаційної роботи є логічно обґрунтованими на основі відомих біологічних, біохімічних та фізичних закономірностей досліджуваних об'єктів та відомих сучасних методів математичного моделювання.

#### Теоретичне та практичне значення:

1. Використання сукупності відомих закономірностей розвитку зелених рослин, бульбашкової азотофіксації та вірусної репродукції в умовах екологічного середовища дало змогу дослідити процеси комплексної взаємодії при зміні екологічних умов.
2. Створена методика визначення біоструктури об'єкту досліджень з урахуванням потреб елементів цієї структури (процесів) в речовинах та можливої кількості речовин, яку можуть отримати ці елементи (потенційні та реальні параметри процесів) може бути успішно використана при побудові структурно-функціональних моделей інших об'єктів.
3. Побудована методика графічного введення великих масивів експериментальних та даних обчислювальних експериментів може суттєво прискорювати дослідження закономірностей зміни стану організмів при зміні екологічних умов на основі побудованих математичних моделей.
4. Математичне моделювання процесів розвитку зеленої рослини при вірусній інфекції в різних умовах навколишнього середовища дає змогу інтегрувати знання з різних галузей наук в єдину екологічну систему, що допомагає вибору раціональних стратегій культивування здорових рослин, цілеспрямованому плануванню сільсько-господарського виробництва, створенню відповідних прогнозів епіфіторії хвороб. При дослідженні побудованих моделей виявлено

реальні умови, при яких рослина, уражена вірусом, ще може приносити повноцінний урожай.

5. Припущення та основані на них математичні моделі, що адекватно описують процеси зміни інфекційності вірусу тютюнової мозаїки при дії таких факторів як гамма-опромінювання, постійне магнітне поле та підвищена температура, допомагають теоретично обґрунтувати ці процеси і наявність екстремальних значень цих факторів.

Наукова новизна: В роботі вперше:

- комплексно досліджуються закономірності росту та розвитку зеленої рослини, бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції в різних умовах навколишнього середовища за допомогою побудови адекватних математичних моделей цих процесів;

- розроблено структурно-функціональну схему для побудови моделей впливу вірусної інфекції на стан організму процесу;

- побудовано нову адекватну математичну модель процесів розвитку зеленої рослини квасолі, бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції та при дії різних факторів навколишнього середовища;

- побудовано математичні моделі розвитку інфекційного процесу вірусу тютюнової мозаїки в лабораторних умовах при дії таких фізичних факторів, як гамма-опромінювання, постійне магнітне поле та підвищена температура. Отримано новий формальний опис причинно-наслідкових зв'язків цих процесів, який корисний для їх теоретичного обґрунтування;

- побудовані математичні моделі використано для вивчення процесів бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції, а також інфекційних процесів у рослині під впливом гамма-опромінювання та постійного магнітного поля.

Апробація роботи: Результати роботи доповідалися на міжнародному радіобіологічному з'їзді у Києві 1993р.; на міжнародній конференції 'Fundamental and applied problems in phytovirology', в Ялті, 22-26 травня, 1994 року; на міжнародній конференції по екології вірусів рослин у Шацьку, на міжнародному канадсько-українському екологіч-

ному семінарі у Києві 1995р. та доповідалися на семінарах кафедри вірусології біологічного факультету та кафедри моделювання складних систем факультету кібернетики Київського Національного університету ім. Тараса Шевченка.

Публікації. По темі дисертації автором опубліковано 4 наукові праці.

Об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, трьох розділів, переліку основних висновків, списку літератури з 97 назв, містить 7 таблиць, 11 малюнків і займає 117 сторінок.

### Зміст роботи.

У вступі обґрунтовується актуальність роботи, формулюються цілі та характеристика дослідження.

У першому розділі на основі аналізу праць вітчизняних та закордонних авторів будуються підвалини положень, що виносяться на захист.

У другому розділі розвивається метод побудови математичних моделей росту та розвитку зеленої рослини, бульбашкової азотофіксації при вірусній репродукції та при дії деяких факторів навколишнього середовища.

Модель розвитку зеленої рослини  $M$  складається з множини змінних стану  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ , множини процесів моделі  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ , множини змінних середовища  $E = (E_1, E_2, \dots, E_r)$  та множини параметрів  $P = (P_1, P_2, \dots, P_L)$ .

$$M = (X, Q, E, P). \quad (1)$$

Множина змінних стану  $X$  складається з двох груп: групи показників концентрацій речовин та групи показників розвитку окремих органів рослинного організму. Всі розглянуті функції мають додатне значення в просторі визначення.

Процес  $q \in Q$  - це оператор  $q: X \rightarrow X$  з такими властивостями:

- 1)  $x, y \in X, y = qx, y_i = q^i x_i$ ;
- 2)  $X_i^k = q^i (X_1^{k-1}, X_2^{k-1}, \dots, X_n^{k-1})$ ,  $k=1, T$ ;
- 3)  $L = (X_i : q^i (X_1^{k-1}, X_2^{k-1}, \dots, X_n^{k-1}) \langle \rangle X_i^k \rangle \langle \rangle 0$  для  $k=1, T$ , де  $X_i^k$  - значення змінної стану  $X_i$  на кроці  $k$ .

Змінна стану моделі  $X_i$  витрачається в процесі  $q$ , якщо

$$q^i (X_1^{k-1}, X_2^{k-1}, \dots, X_n^{k-1}) \langle \rangle X_i^k.$$

Кожному процесу  $q \in Q$  ставимо у відповідність потенційний параметр  $F_q(X)$ , як деяку додатньо-визначену функцію від множини змінних стану. Тоді для кожної  $x_1 \in X$  будується функція  $F_x^q(X) = a_x^q F_q(X)$ , де  $a_x^q > 0$ . Значення функції  $F_x^q(X)$  наведемо величиною потенційної витрати речовини  $x$  на процес  $q$ . Тоді повна витрата речовини  $x \in X$  має вигляд:

$$R_x(X) = a_x^0 + a_x^1 F_x^1(X) + a_x^2 F_x^2(X) + \dots + a_x^m F_x^m(X). \quad (2)$$

Реальним параметром процесу  $q \in Q$  є величина

$$m^q = \min_{x \in X^q} (F_x^q(X) [a_x^q R_x(X)]^{-1}).$$

$x \in X^q$

Тоді можна показати, що ця величина задовольняє потрібним умовам:

1) Сума всіх реальних витрат речовини  $x \in X$  на всі процеси менша за  $x$ , коли  $a_x^q > 0$  і дорівнює  $x$ , коли  $a_x^q = 0$ .

2) Якщо речовина  $x \in X$  витрачається на процес  $q \in Q$  і  $x = 0$ , то  $m^q = 0$ .

3) Якщо до моделі додати новий процес  $v$ , який використовує ті ж речовини, що і процес  $q$  моделі (наприклад, вірусну репродукцію), то реальний параметр процесу  $q$  зменшується.

4) Зростання потенційного параметру процесу  $q \in Q$  при перерахунку моделі  $x^{k+1} \rightarrow x^k$  веде до зростання і реального параметру процесу  $q$ .

При такому підході до моделювання процесів розвитку організму можна доповнювати і розвивати вже побудовані моделі, деталізуючи математичний опис окремих процесів.

Такий підхід використовувався при побудові моделі розвитку бобової рослини, бульбашкової азотофіксації при вірусній репродукції та при зміні екологічних умов.

В моделі розглядаються такі змінні стану  $(X)$ :

$[H_2O]$ -концентрація води в рослині,  $[CO_2]$ -концентрація вуглекислоти,  $[O_2]$ -концентрація кисню,  $[ATP]$ -концентрація АТР,  $[CH_2O]$ -концентрація вуглеводів,  $[V]$ -концентрація вірусу,  $[NH]$ -концентрація аміних сполук,  $[X]$ -показник розвитку хлоропластів,  $[M]$ -показник розвитку мітохондрій,  $[N]$ -число азотофіксуючих бульбашків,  $[NN]$ -концентрація поглинання рослиною аміних сполук,  $[H_2]$ -концентрація водню в бульбашках,  $[NV]$ -концентрація вуглеводів в бульбашках,  $[H^+]$ -концентрація протонів в бульбашках,

[NATP]-концентрація молекул АТФ в бульбашках,  $[N_2]$ -концентрація азоту, що фіксуються бульбашками,  $[NNH]$ -концентрація амініх сполук в бульбашках,  $[S]$ -інтегральний показник розвитку бульбашок рослини,  $[G]$ -загальна маса бульбашок рослини,  $[NE]$ -концентрація електронів в бульбашках,  $[NO_2]$ -концентрація кисню в бульбашках,  $[I]$ -інфекційність (кількість некрозів на листках рослин-індикаторів),  $[C]$ -показник розвитку стебла,  $[K]$ -показник розвитку кореня,  $[B]$ -показник утворення бобів.

Змінні стану середовища ( $[E]$ ):  $[T]$ -температура,  $[L]$ -освітлення,  $[V]$ -вологість ґрунту,  $[P_3]$ -радіаційне забруднення,  $[PH]$ -PH ґрунту,  $[NG]$ -концентрація азотних добрив у ґрунті.

В моделі розглядаються такі процеси ( $Q$ ) (в дужках потенційні параметри):

- 1) фотосинтез рослини ( $m_1 = [X][L][T]S / (T_{max}L_{max})$ );
- 2) фосфорування рослини ( $m_2 = [M][T]S / T_{max}$ );
- 3) випаровування ( $f_v = [T]T([C]) / (T_{max}(1 - T([CO_2])))^{-1}$ );
- 4) побудова хлоропластів ( $m_3 = 1 - T([CH_2O])$ );
- 5) побудова мітохондрій ( $m_4 = 1 - T([ATP])$ );
- 6) побудова стебла ( $m_{s1} = 1 - (T([CH_2O]) + T([C]) + T([ATP])) / 3$ );
- 7) побудова кореня ( $m_{s2} = 1 - (T([H_2O]) + T([K]) + T([ATP])) / 3$ );
- 8) утворення бобів ( $m_{s3} = T([C])^2 S$ );
- 9) репродукція вірусів ( $m_v = V_0 [V_1]$ );
- 10) поглинання води ( $f_v = T([V])T([K]) / (1 - T([H_2O]))^{-1}$ );
- 11) поглинання амінів ( $f_n = T([K])T([NG]) / (1 - T([NH]))^{-1} / 2 \cdot 10^5$ );
- 12) руйнування хлоропластів ( $s_1 = R_x + R_r [P_3] + R_l [P_3]$ );
- 13) руйнування мітохондрій ( $s_2 = R_m + R_v [V_1] + R_r [P_3] + R_l [P_3]$ );
- 14) деструкція вірусу ( $s_v = V_n T([X])T([M]) + V_L [T] / T_{max} + V_r [P_3] + V_1 [P_3]$ );
- 15) фосфорування в бульбашках ( $p_1 = [dS]$ );
- 16) розрив молекул водню в бульбашках ( $p_2 = T([NH_2])[S]$ );
- 17) з'єднання протонів з електронами ( $p_3 = R_n \cdot T([NH^+])$ );
- 18) азотофіксація ( $p_4 = N_2 [S] / (1 - T([NNH]))^{-1}$ );
- 19) поглинання водню в бульбашки ( $f_{NH} = N_0 [dS] / (1 - T([NH_2]))^{-1}$ );
- 20) поглинання протонів ( $f_{NH^+} = [S] 10^{-[PH]} / (1 - T([NH^+]))^{-1}$ );
- 21) забезпечення вуглекислою ( $[CO_2] + f_B$ );
- 22) вихід кисню (через продихи) ( $[O_2] - L_3 f_a$ ),

$$T(X) = \begin{cases} X, & \text{коли } X < a_1 \\ a_1, & \text{коли } X \geq a_1, \quad a_1 < 1. \end{cases}$$

Значення інтегрального показника розвитку [S] можна розподілити на вектор значень показників розвитку окремих бульбашків  $N = (n_1, n_2, \dots, n_{[N]})$  на кроці  $k+1$ , передбачається формулою:

$$n^i_{k+1} = n^i_k + n^i_k \left( \sum_{j=1}^{[N]} n^j_k + \varepsilon \right)^{-1} ([S]_{k+1} - [S]_k), \quad \varepsilon > 0. \quad (3)$$

Число бульбашок на кроці перерахунку моделі  $k$  визначається рівнянням  $[N]_k = C^N [S]_k$ , де  $C^N$  - сталий параметр. Незавжди побачити, що  $n^j_{k+1}/n^j_{k+1} = n^j_k/n^j_k$  при  $i, j = 1, m$ , тобто приріст кожної бульбашки визначається мірою її розвитку на даному кроці. Присутність у знаменнику параметра  $\varepsilon$  гарантує розподіл частини приросту інтегрального показника на створення нових бульбашок.

Всі вищезгадані функції повинні відповідати певним умовам, які вказані в дисертації, щоб адекватно описувати об'єкт дослідження. Модель має вигляд:

$$[H_2O]_{k+1} = [H_2O]_k - N^{max} m_v - (m_7 + m_1 + m_2 + m_{s1} + m_{s2}) [H_2O]_k / R_{[H_2O]} -$$

$$- m_{1p} + m_{2p} O^{max} / N^{max} + [V] T([K]) (1 - T([H_2O])) / V^{max}$$

$$[CO_2]_{k+1} = [CO_2]_k - m_{1p} + m_{2p} O^{max} / N^{max} + L_7 T([K]) (1 - T([CO_2]))$$

$$[O_2]_{k+1} = [O_2]_k - O^{max} m_v - (L_3 \varepsilon_n + m_6) [O_2]_k / R_{[O_2]} - m_{2p} + m_{1p} N^{max} / O^{max}$$

$$[ATP]_{k+1} = [ATP]_k - A^{max} m_v - (m_3 + m_4 + m_7 + m_6 + m_5) [ATP]_k / R_{[ATP]} +$$

$$+ 4 m_{2p} O^{max} / A^{max}$$

$$[CH_2O]_{k+1} = [CH_2O]_k - O^{max} m_v - (m_3 + m_4 + m_7 + m_6 + m_5) [CH_2O]_k / R_{[CH_2O]}$$

$$+ m_{1p} N^{max} / O^{max} - m_{2p}$$

$$[Vi]_{k+1} = [Vi]_k + B_v m_v - [Vi]_{k+1} v / (1 + sv)$$

$$[NH]_{k+1} = [NH]_k - N^{max} m_v - (m_3 + m_4 + m_7 + m_6 + m_5) [NH]_k / R_{[NH]} + T([K]) ([NG] - [NN]) (1 -$$

$$T([NH]_k)) / (N^{max} R^{max}) + T([NHN]_k) * (1 - T([NH]_k)) / R_{[NHN]}$$

$$[X]_{k+1} = [X]_k + B_1 m_{3p} (1 - T([X]_k)) - [X]_{k+1} s_1 / (1 + s_1)$$

$$[M]_{k+1} = [M]_k + B_1 m_{4p} (1 - T([M]_k)) - [M]_{k+1} s_2 / (1 + s_2)$$

$$[NN]_{k+1} = [NN]_k + T([K]) ([NG] - [NN]) (1 - T([NH]_k)) / N^{max}$$

$$[H_2]_{k+1} = [H_2]_k + [S] (1 - T([H_2]_k)) - p_{2p} + p_{3p} / 2$$

$$[HV]_{k+1} = [HV]_k (1 - R_1) + m_6 [CH_2O] / R_{[CH_2O]} - p_{3p}$$

$$[H^+]_{k+1} = [H^+]_k + [S] (1 - T([H_2]_k)) e^{-2.31(pH)} + 2p_{2p} - p_{3p} - 1.08p_{4p}$$

$$[NATP]_{k+1} = [NATP]_k (1 - R_1) + m_6 [ATP]_k / R_{[ATP]} + 4p_{4p} O^{max} / A^{max} -$$

$$- 53p_{2p} + 53p_{3p} / 2 - 2.88p_{4p}$$

$$[N_2]_{k+1} = [N_2]_k + 0.18p_{4p} A^{max} / N^{max}$$

$$\begin{aligned}
[\text{NNH}]_{k+1} &= [\text{NNH}]_k + 0.36p_{4p} \Delta t^{\text{max}} / N^{\text{max}} - T([\text{NNH}]_k) (1 - T([\text{NH}]_k)) + \\
&+ [S]_k / (1 + [S]_k) / R_{[\text{NNH}]} \\
[S]_{k+1} &= [S]_k + B_4 R_1^2 T([K]) T([NV]) T([NATP]) \\
[G]_{k+1} &= [G]_k + B_5 [S]_k \\
[C]_{k+1} &= [C]_k + B_2 m_{51p} (1 - T([C]_k)) \\
[B]_{k+1} &= [B]_k + B_2 m_{53p} \\
[I]_{k+1} &= [I]_k + I_V [V]_k,
\end{aligned}$$

з такими початковими даними:

$$\begin{aligned}
[\text{H}_2\text{O}]^0 &= d^0_{\text{Hmax}}, [\text{H}_2]^0 = 0, [S]^0 = 0, [\text{CO}_2]^0 = 0, [\text{H}^+]^0 = 0, [K]^0 = 0 \\
[\text{O}_2]^0 &= d^0_{\text{Omax}}, [\text{NV}]^0 = 0, [B]^0 = 0, [\text{ATP}]^0 = d^0_{\text{Amax}}, [\text{NATP}]^0 = 0, \\
[\text{CH}_2\text{O}]^0 &= d^0_{\text{Cmax}}, [\text{N}_2]^0 = 0, [V]_0 = V^0, [\text{NNH}]^0 = d^0_{\text{Nmax}}, [\text{NH}]^0 = d^0_{\text{Nmax}} \\
[S]^0 &= 0, [X]^0 = 0, [G]^0 = 0, [M]^0 = 0, [\text{NE}]^0 = 0, [N]^0 = 0, [\text{NO}_2]^0 = 0, \\
[\text{NN}]^0 &= 0, [I_V]^0 = 0.
\end{aligned}$$

Інфекційність визначається рівнянням  $[I]_{k+1} = [I]_k + I_V [V]_k$ , де  $I_V$  визначає відповідність між показниками розвитку вірусу та інфекційності,  $\text{mip}, \text{pip}$  - відповідні реальні параметри процесів.

Вибірку значень вектору  $E$  брали з доступних наукових джерел, установ, атласів.

У таблиці 1 приведена порівняльна характеристика нутурних спостережень за розвитком бульбашок у семи регіонах за маршрутом Чорнобиль-Одеса і моделі з наступними значеннями параметрів:

$$\begin{aligned}
S_k &= e^{-0.003234k}, R_V = 0.00036, e = 0.0033, C_0 = 2.37, N_{\text{max}} = 12.057, \\
R_1 &= 0.0408, L_3 = 42.75, O_{\text{max}} = 11.85, N^0 = 21.616, V_T = 0.00093, \\
A_{\text{max}} &= 5:35, B_1 = 1152.345, V_m = 0.102, N^{\text{max}} = 13.98, B_2 = 25606.244, \\
V_T &= 0.00086, D^0 = 0.00191, B_4 = 377.94, V_j = 0.00039, I_V = 0.0606, \\
R_{\text{H}^+} &= 0.2606, R_X = 0.00081, C^N = 241.7, R_T = 0.00067, C_K = 60.37, \\
R_i &= 0.00441, B_5 = 2.097.
\end{aligned}$$

Можна запропонувати критерій адекватності моделі для певної змінної стану. Якщо

$$K([N]) = ([N]_{k_M} - [N]_{k_{\text{cp}}}) / S_{[N]}^k < 1, \quad (4)$$

де  $[N]_{k_M}, [N]_{k_{\text{cp}}}$  - відповідно, значення кількості бульбашок, що дають спостереження (середнє) і модель,  $S_{[N]}^k$  - середнє-квадратичне відхилення даних спостережень, тоді модель вважається адекватною і за її значення можна прийняти значення випадкової величини рівномірно розподіленої на відрізку

$$[[N]_{k_M} - [N]_d, [N]_{k_M} + [N]_d],$$

$$[N]_d = S_{[N]}^k (1 - K([N]))$$

Так, відповідно для кількості бульбашок, загальної ваги у здорових та хворих рослин і для інфекційності (кількості некрозів) маємо такі значення критерію: 0.15, 0.19, 0.6, 0.68, 0.29. На малюнку (1) зображено графік зміни показника  $[N]$  (кількості бульбашок) за вегетаційний період ( $T=80$ ) у здорових (а) та інфікованих (б) рослин фасолі при екологічній ситуації, яка характеризує регіон Красних Окон Одеської області. Як видно з графіку, кількість бульбашок збільшується на протязі всього онтогенезу. На час  $k=T$  кількість бульбашок у інфікованій рослині десь у два рази менша ніж у здоровій.

Вралися  $t_{\max}=30$ ,  $l_{\max}=30$ ,  $v_{\max}=100$ . Тоді в моделі використовували безрозмірні величини  $[T]=[T]/t_{\max}$ ,  $[L]=[L]/l_{\max}$ ,  $[V]=[V]/v_{\max}$ .

Множина умов середовища  $E$  складається з семи показників. Якщо вегетаційний період рослини  $T$  діб, то треба ввести  $7 \cdot T$  значень умов середовища для одного повного перерахунку моделі розвитку рослини за період  $T$ . Але, бажано, під час дослідження змінювати ці величини, щоб отримувати дані розвитку рослини, бульбашок та розвитку вірусної інфекції при різних умовах в екологічній ніші. Тому, для цих потреб розроблено механізм графічного введення даних умов, який описано в підрозділі 2.6 дисертації.

Третій розділ дисертації містить опис методів вивчення впливу гамма-опромінення ( $g$ ), постійного магнітного поля ( $m$ ) та підвищеної температури ( $T$ ) на інфекційну здатність вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro* та *in vivo*.

Для гамма-опромінення на інфекційність вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro* визначається формулою:

$$I(g) = 84e^{-0.00317g} \quad (5)$$

Вралися до уваги закономірності розподілу розмірів вірусних частинок при дії різних доз опромінення. При цьому, вірусні частинки розбиті на декілька груп для зручності математичного опису. Так, "нативна" група (за розмірами частинок близько 300 нм.) визначається з рівняння:

$$y_2(g) = \begin{cases} b_1 \exp(b_2 g) + b_3, & \text{при } g > 0.0014 \\ 0, & \text{при } g \leq 0.0014, \end{cases} \quad (6)$$

де  $g$  - величина гамма-опромінювання в  $\text{Іод.} = 10 \text{ Гр.}$ , а  $y_2(g)$  - це функція відношення числа вірусних частинок другої (нативної) групи до загального числа вірусних частинок. Для даних експериментальних досліджень були отримані такі значення параметрів:  $b_1 = 0.49878$ ,  $b_2 = -0.04977$ ,  $b_3 = 0.04831$ .

Встановлено, що 1)  $di(g)/dg < 0$ ,  $dy_2(g)/dg < 0$ , 2)  $|di(g)/dg| > |dy_2(g)/dg|$ , тобто, швидкість падіння інфекційності більша за швидкість падіння "нативної" групи.

Модель впливу постійного магнітного поля на інфекційність ВТМ в умовах *in vitro* має вигляд:

$$i_1(m) = 40 + 190 \exp(-3.5m^2), \quad (7)$$

де  $m$  - величина магнітного поля в теслах  $0 < m < 1$ . Формула (7) показує, що в умовах *in vitro*, інфекційність вірусу весь час падає при підвищенні індукції ПМП.

При моделюванні впливу постійного магнітного поля на вірус тютюнової мозаїки в умовах *in vivo* бралась до уваги величина загального ураження рослинної клітини  $y(m, t)$ , яка визначалась рівністю:

$$y(m, t) = 1/3 (M(m, t) + X(m, t) + K(m, t)), \quad (8)$$

де  $M(m, t)$ ,  $X(m, t)$ ,  $K(m, t)$  - відповідно, середня міра деструкції мітохондрій, хлоропластів та крохмальних зерен, яка визначається відношенням числа змінених органел при дії ПМП з величиною індукції  $m$  (в теслах) на день  $t$  після початку дії магнітного поля до числа уражених органел на останній день дослідження ( $t=12$ ) при  $m=1$ . Побудована динамічна математична модель розвитку ураження рослини при вірусній інфекції та при дії ПМП.

Побудована модель зміни інфекційності вірусу тютюнової мозаїки за часом в залежності від величини  $m$ :

$$i(m, t) = c_{15} (1 - \exp((f_1(m) + f_2(m))t)), \quad (9)$$

де  $f_1(m)$ ,  $f_2(m)$  - функції з властивостями:

- 1)  $f_1(m) < 0$ ,  $df_1(m)/dm > 0$ ; 2)  $f_2(m) < 0$ ,  $df_2(m)/dm \leq 0$ .

Також, як і для ураженості рослини знайдена величина магнітного поля, при якій інфекційність мінімальна, і показано, що для досліджуваних даних експериментів ці величини співпадають і дорівнюють 0.2 тесла.

Побудовано математичний опис процесу катастрофічного падіння інфекційності вірусу тютюнової мозаїки при дії підвищеної температури в умовах *in vitro*:

$$i(T) = i_{\max} / (1 + C \cdot T + (T/T_{\text{кр.}})^N), \quad (10)$$

де  $T$  характеризує величину температури середовища в градусах Цельсія,  $i(T)$  - показник кількості некрозів на листках рослин-індикаторів, які були уражені вірусом, що піддавався дії температури  $T$ . В формулі параметр  $i_{\max}$  характеризує інфекційність не обробленого підвищеною температурою вірусу. Другий параметр  $T_{\text{кр.}}$  характеризує критичне значення температури, вище якого вірус різко інактивується. Параметер  $N$  визначає степінь інактивації вірусу при переході температурного показника через критичну точку. Параметр  $C$  характеризує степінь докатастрофічного спаду інфекційності вірусу при підвищенні температури. Для вірусу тютюнової мозаїки отримано:  $i_{\max} = 116.54$ ,  $C = 0.01497$ ,  $T_{\text{кр.}} = 87.67$ ,  $N = 316$ .

#### Основні висновки роботи:

1. За допомогою визначеної біоструктури об'єкту дослідження, що використовує потенційні та реальні сили процесів, можна будувати математичні моделі росту та розвитку організму при вірусній інфекції, де остання розглядається як "зайвий" процес.

2. Розроблена адекватна модель розвитку рослин квасолі та бульбашкової азотофіксації при вірусній інфекції в певних умовах навколишнього середовища, яка базується на процесній біоструктурі, дозволяє досліджувати закономірності розвитку об'єкту при різноманітних змінах екологічних умов.

3. За допомогою розробленого методу графічного вводу даних, який базується на створенні масштабованного екрану для малювання траєкторій, можна значно скоротити час досліджень закономірностей тих чи інших характеристик моделі при зміні екологічних умов.

4. Створений адекватний математичний опис процесу порушення морфології вірусних частинок при дії великих доз гамма-опромінювання в умовах *in vitro*, який базується на виділенні "нативної" групи вірусних частинок шляхом їх розбиття на декілька груп за розмірами (в роботі розглянуто три групи), дозволив дослідити закономірності зв'язків між зміною морфологічних та інфекційних характеристик вірусу: швидкість падіння інфекційності вірусу більша за швидкість падіння морфології вірусу (числа вірусних частинок другої "нативної" групи).

5. Побудовані адекватні математичні моделі впливу постійного магнітного поля на розвиток рослини та на інфекційні властивості вірусу за гіпотезою про складну взаємодію впливів ПМП одночасно на вірус і на рослину підтверджують, що, як і для функції ураженості рослини, так і для функції інфекційності вірусу є екстремальна величина ПМП (0.2 тесла), яка визначає максимальне пригнічення вірусної інфекції.

6. Побудована адекватна математична модель катастрофічного зниження інфекційності вірусу тютюнової мозаїки в умовах *in vitro* при дії підвищеної температури, яка базується на рівнянні порогових реакцій, дає змогу знайти точки початку вірусного пригнічення і повної втрати інфекційності.

Основні висновки дисертації викладені в наступних публікаціях:

1. Загородний Ю.В., Вейко І.В., Войко А.Л. Исследование поведения вируса табачной мозаики при действии на него гамма-излучения. //Допов. НАН України. -№4. -1993. -с.169-171.

2. Загородний Ю.В., Вейко І.В., Войко А.Л. Математичне моделювання дії постійного магнітного поля на вірус тютюнової мозаїки та на рослину клітину. //Допов. НАН України. -№5. -1995. -с.131-132.

3. А.Л. Войко, О.В. Молчанец, О.И.Ильченко, М.Д.Мельничук, Ю.В.Загородний. Состояние растительного организма при вирусной инфекции и нарушении факторов внешней среды. //Тезиси докладов, Радиобиологический съезд. -Киев, 20-25 мая 1993г. -с.125-126.

4. A.L.Boyko, B.S.Prister, Yu.V.Zagorodniy,

V.P. Pollschuk. The virus infection influence on the cultivated plants at the different ecological niches.// Abstracts, International Conference "Fundamental and Applied Problems in Phytovirology".-Ukraine, Crimea, Yalta, 22-26 Mfy 1994.-p.33.

У вищевказаних працях автору належить основна частина з математичним моделюванням та дослідження побудованих моделей.

Загородний Ю.В. Построение и исследование математических моделей влияния фитовирусов на растительный организм при изменении экологических условий.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02 - математическое моделирование в научных исследованиях, Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины. Киев, 1996.

Защищается 4 научные работы, рассматривающие проблемы построения и исследования математических моделей процессов роста растений, клубеньковой азотификации при вирусной инфекции с помощью разработанного механизма моделирования таких процессов и соответствующего программного обеспечения

Ключові слова:

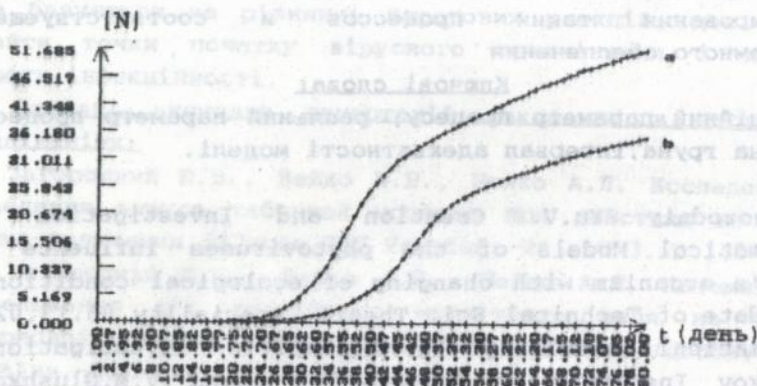
потенційний параметр процесу, реальний параметр процесу, нативна група, інтервал адекватності моделі.

Zagorodnyi Yu.V. Creation and Investigation of Mathematical Models of the phytoviruses influence on plant's organism with changing of ecological conditions. Candidate of Technical Sci. Thesis, speciality 05.13.02 - mathematical modelling in scientific investigations. Glushkov Institute of Cybernetics named V.M.Glushkov, National Academy of Sciences of Ukraine, Kijiv, 1996.

4 scientific papers consider the problems of creation and investigation of different mathematical models of plants growth processes, processes of nodule nitrogen fixing under the influence of phytoviruses reproductions with help of worked out mechanism for such processes modelling and corresponding software.

кількість бульбашок				вага бульбашок				некротизм	
здорові рослини		хворі рослини		здорові рослини		хворі рослини		досл.	мод.
досл.	мод.	досл.	мод.	досл.	мод.	досл.	мод.		
27.6	26.9	14.6	14.6	11.0	6.2	3.9	3.6	11.7	12.0
28.6	23.6	13.2	13.0	9.4	7.0	3.6	3.0	13.2	15.1
39.6	39.6	27.3	25.4	13.1	12.0	5.6	4.3	12.0	10.6
34.0	22.7	19.9	18.1	7.0	7.0	2.9	2.9	19.7	19.9
48.0	47.3	32.3	33.6	15.0	15.0	6.6	6.5	10.2	9.6
56.5	46.2	34.0	29.0	15.7	15.2	6.4	6.1	9.4	11.3
57.3	54.0	37.2	37.7	15.5	17.5	9.1	10.6	9.6	9.4

Таблиця 1 Порівняльна характеристика даних натурних спостережень (середнє) та моделі для різних регіонів за маршрутом Чорнобиль-Одеса.



Мал 1. Динаміка росту числа бульбашок за вегетаційний період у здорових (а) та інфікованих (б) рослин за даними моделі у регіоні Одеської області.

ЛІБ ім. В. Стефаніка  
АН України

---

Зам. 43                      Формат 60x84.1/16                      обл. вид. арк. 1,0.  
Підписано до друку 08.04.1996р.                      Тир. 100.

---

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М.Воголюбова НАН України

445768

AB 34.486

**AB 34.486**