

УДК 535.51

Л. Т. Міщенко, С. М. Савенков, Є. А. Оберемок

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Застосування лазерної мюллер-поляриметрії  
для дослідження здорових та вірусінфікованих  
рослин пшениці сорту Апогей, вирощених  
за умов модельованої мікрогравітації**

*Надійшла до редакції 24.11.03*

---

Рослини пшениці сорту Апогей, інфіковані виділеним нами вірусом смугастої мозаїки пшениці, показали зменшення репродукції цього вірусу в умовах модельованої мікрогравітації. Вперше застосовано метод лазерної мюллер-поляриметрії для дослідження впливу умов модельованої мікрогравітації на здорові та вірусінфіковані рослини пшениці. Отримані результати свідчать про можливість застосування методу повної мюллер-поляриметрії для виявлення структурних і функціональних змін у листках пшениці під впливом вірусної інфекції та кліностагування.

---

Вищі рослини можуть рости і розвиватися за умов космічного польоту [22]. Так, пшениця проходить усі фази онтогенезу і навіть може давати урожай зерна [8]. Останніми роками значної шкоди рослинництву завдають фітопатогени, у тому числі віруси — внутрішньоклітинні патогени. Діагностика вірусів у латентній формі зазвичай ускладнена [16], а у стресових умовах космосу інфекція може проявитися у тих рослин, що вважалися здоровими. Залежно від сили і довготривалості дії стресора живі об'єкти адаптуються до трансформованого навколишнього середовища. Якщо ж дія стресора виходить за межі адаптивних можливостей живого організму, включається механізм запрограмованої смерті (апоптозу) окремих його органел, клітин або й цілих органів [2, 3]. Тому актуальним залишається питання вивчення особливостей розвитку вірусінфікованих рослин пшениці за умов модельованої мікрогравітації в земних умовах (кліностагування). Особливу цінність для таких досліджень мають безконтактні методи дослідження (БМД). Так, поряд із високою чутливістю, точністю та інформативністю ці методи у більшості випадків не призводять до пошкодження досліджуваного об'єкта.

В основу БМД, використаного нами, закладено процес зондування досліджуваного об'єкта електромагнітним випромінюванням із заданими характеристиками, зміна яких вивчається після взаємодії з об'єктом. Найчастіше використовуються такі характеристики — носії інформації:

- 1) частота (довжина хвилі) випромінювання (спектроскопія відбиття, поглинання, люмінесценції [6, 7]);
- 2) інтенсивність випромінювання [6, 7, 11];
- 3) поляризація випромінювання (еліпсометрія, поляриметрія [1, 5, 15]);
- 4) методи, утворені при поєднанні характеристик 1, 2, 3.

Використання БМД типу 1 та 2 для дослідження об'єктів біологічної природи можна вважати вже традиційними. Вони дозволяють отримувати набір параметрів, які відносно добре піддаються фізичній інтерпретації [11]. Поляризаційні БМД (група 3) обираються переважно для дослідження прозорих слабкорозсіюючих об'єктів, оскільки розробка аналітичного алгоритму для сильнорозсіюючих об'єктів ускладнена [1, 5, 15]. Біологічні ж об'єкти часто є сильнорозсіюючими. Як наслідок, поляриметричні роботи з дослідження біоб'єктів зводять-

ся переважно до вивчення зміни певних станів поляризації (лінійної, кругової) після взаємодії з такими об'єктами з наступною спробою фізичної інтерпретації отриманих результатів [13, 14, 24, 26, 29, 30]. Але навіть такий спрощений з поляриметричної точки зору підхід дозволяє в деяких випадках вирішувати задачі, які не вирішуються традиційними методами. Так, в роботі [14] вказано на можливість використовувати поляриметричні методи для діагностики на ранніх стадіях такої небезпечної хвороби як остеопороз. В роботі [29] йдеться про застосування поляризаційно-контрастної методології для коректної гістології області шкіри, ураженої раковими клітинами. Для діагностики розвитку катаракти хрусталика ока використовували поляризоване випромінювання [13].

Равен із співробітниками вивчали розсіяння поляризованого випромінювання листками рослин, поверхня яких мала суттєві відмінності [26]. Повна інформація про вплив досліджуваного об'єкта на довільну поляризацію випромінювання може бути отримана в рамках мюллер-поляриметрії [1, 5]. Тому мюллер-поляриметрія (МП) потенційно має більше можливостей у порівнянні з методами, використаними в [13, 14, 24, 26, 29, 30].

Мета нашої роботи — з'ясувати можливість застосування методів МП для проведення діагностики рослин, уражених вірусом смугастої мозаїки пшениці, які вирощувались за умов модельованої мікрогравітації.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вирощування рослин проводили на універсальному кліностаці «Цикл-2» [9, 25], який дозволяв реалізувати кілька схем переорієнтації рослин відносно вектора сили земного тяжіння. Кліностація являє собою обертову платформу (центрифугу), що може обертатись навколо вертикальної осі зі швидкістю 0, 1, 3 і 5 об/хв. В наших досліджах платформа оберталась з постійною швидкістю 1 об/хв. На платформі радіально розташовані 4 горизонтальних осі, навколо яких обертаються вегетаційні контейнери з рослинами. Швидкість їхнього обертання незалежна від обертання платформи, її також можна задавати дискретно: 2, 4, 8 об/хв (в наших досліджах 2 об/хв). Контейнери виготовлені із прозорого органічного скла у вигляді циліндрів діаметром 100 мм і висотою 270 мм з системою отворів у кришках і на бокових поверхнях для вентиляції та зволоження. На дні контейнера міститься спеціальний штучний субстрат (базальтове волокно), змочений розчином макро- і мікроелементів у оп-

тимальному співвідношенні; рН розчину становив 6.0—6.3. У досліджах було використано шість контейнерів. Два з них закріплені таким чином, що вісь контейнера збігалася з віссю його обертання та віссю росту рослин; вони розміщені горизонтально і обертаються перпендикулярно до осі платформи («горизонтальне» кліностакування). Чотири контейнери обертаються у вертикальній площині навколо осей, перпендикулярних до осі росту рослин («вертикальне» обертання рослин). За умов обертання повздовжніх осей росту рослин у вертикальній площині, паралельній вектору сили тяжіння, відбувається постійна зміна кута між вказаним вектором та віссю росту рослини. У трьох контейнерах (один для горизонтального кліностакування і два для вертикального обертання) вирощували здорові рослини, а в трьох інших — системно інфіковані вірусом смугастої мозаїки пшениці (ВСМП). Інфікування проводили у фазі трьох листків, рослини вирощували до закінчення вегетації. Контролем служили такі самі рослини, вирощені у нерухомих контейнерах, а також у відкритих посудинах за тих же умов температури і освітлення.

Усі рослини були розміщені у спеціальній кімнаті зі штучним контрольованим мікрокліматом ( $t = 21 \pm 1^\circ\text{C}$  та збалансованим штучним освітленням 10000 люксів у режимі 16 год день/8 год ніч). Об'єктом дослідження слугував суперкарликовий надранній сорт пшениці Апогей, який вступає у фазу колосіння приблизно через 30 діб після посіву.

Для виявлення ВСМП у рослинах застосовували електронну мікроскопію (мікроскопи EM-125, Україна; JEOL, Японія) та твердофазний імуноферментний аналіз у непрямому варіанті (ELISA). Оптичну густину продукту ферментативної реакції оцінювали через 30' інкубації при кімнатній температурі на ридері фірми «Termo Labsystems Opsys MR» (США) з програмним забезпеченням «Dynex Revelation Quicklink», при двох довжинах хвиль 492/620 нм. Статистична обробка одержаних результатів проведена методом дисперсійного аналізу з використанням відповідних комп'ютерних програм. Очистку вірусу провадили за методом Бракке [16] в нашій модифікації.

Для МП були використані такі варіанти:

- 1 — пшениця, уражена ВСМП, вирощена за умов горизонтального кліностакування;
- 2 — пшениця, уражена ВСМП, вирощена за умов вертикального кліностакування;
- 3 — пшениця здорова, вирощена за умов вертикального кліностакування;
- 4 — пшениця здорова, нерухомий контроль.

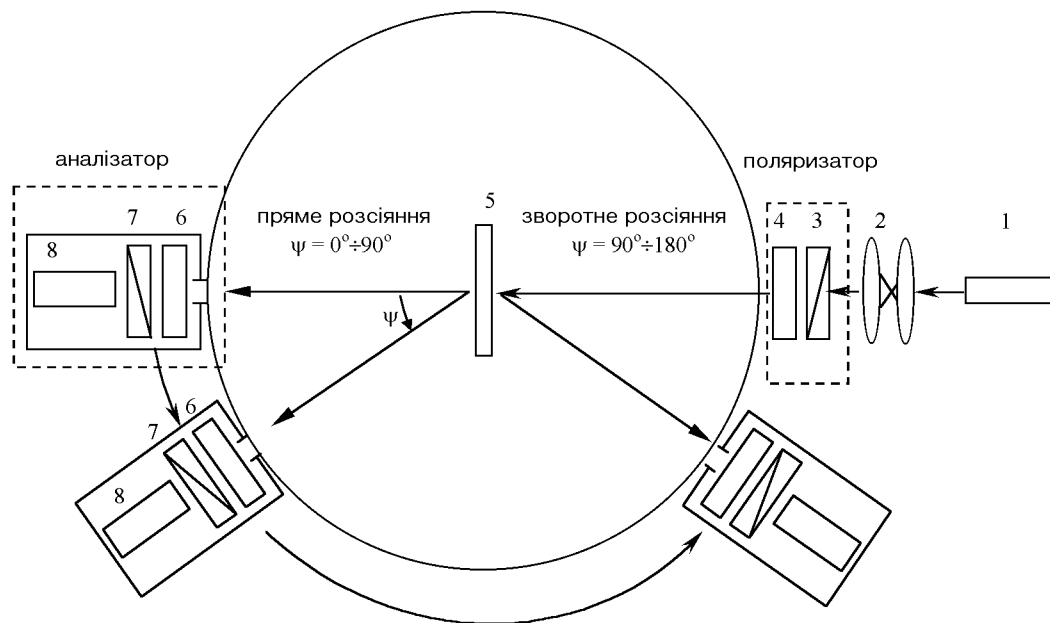


Рис. 1. Схема мюллер-поляриметра для дослідження листків пшениці: 1 — джерело випромінювання (He-Ne-лазер  $\lambda = 632.8$  нм, модель ЛГ-126); 2 — поширювач; 3 — поляризатор (може обертатися навколо оптичної осі схеми); 4 — чвертьхвильова фазова платівка (також може обертатися навколо оптичної осі схеми); 5 — досліджуваний об'єкт; 6 — чвертьхвильова фазова платівка, що обертається з постійною частотою; 7 — аналізатор (нерухомий); 8 — фотоприймач (типу ФЕП-62);  $\Psi$  — кут розсіяння ( $0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$  — пряме розсіяння;  $90^\circ < \Psi \leq 180^\circ$  — зворотне розсіяння), відраховується в горизонтальній площині

## МЕТОД МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЇ

В рамках МП процес взаємодії поляризованого електромагнітного випромінювання з об'єктом записується у вигляді матричного рівняння:

$$\mathbf{S}^{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}^{\text{in}},$$

де  $\mathbf{S}^{\text{in(out)}}$  — чотирикомпонентний вектор-стовпець (вектор Стокса випромінювання), який описує поляризацію випромінювання до (після) взаємодії з об'єктом, а  $\mathbf{M}$  — матриця  $4 \times 4$  з дійсними елементами (матриця Мюллера), яка є оператором перетворення вектора випромінювання з довільними поляризацією, довжиною хвилі та напрямком розповсюдження у вектор поляризації після взаємодії з об'єктом. Таким чином, матриця Мюллера у повній мірі є об'єктом з поляриметричної точки зору, а її конкретний вигляд повністю визначається анізотропними характеристиками об'єкта, який вона описує [1, 5].

Отже, знаючи матрицю Мюллера об'єкта, після відповідного аналізу можна робити висновки про його анізотропну структуру та про природу її формування.

## ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Вимірювались кутові залежності елементів матриць Мюллера для всіх чотирьох варіантів пшениці (по 10 листків кожного). Виміряні матриці аналізували згідно з процедурами, запропонованими в роботах [21] та [23].

Вимірювання матриць Мюллера здійснювали на поляриметрі, схема якого наведена на рис. 1. Поляриметр працює за методом чотирьох зондувальних поляризацій [27] і може бути розділений на зондувальну та приймальну частину. Зондувальна частина включає джерело випромінювання (в нашому випадку He-Ne-лазер типу ЛГ-126, який генерує на довжині хвилі  $\lambda = 632.8$  нм), поширювальну телескопічну систему для збільшення діаметра лазерного пучка (в нашому випадку до 1 см) та поляризаційний формувач (поляризатор), виконаний на основі рухомих призмового поляризатора та чвертьхвильової фазової платівки для формування випромінювання з необхідною поляризацією. Приймальна частина поляриметра складається з аналізатора поляризації, розміщеного у світлозахисній колбі з отвором для сигналу. Аналізатор

поляризації складається з чвертьхвильової фазової платівки, яка обертається зі сталою частотою, призмового поляризатора, фотоприймача (у нашому випадку — фотопомножувач типу ФЭУ-62). Детально з принципом роботи поляриметра можна ознайомитись в роботі [27]. Керування усіма вузлами поляриметра, збір та обробка даних здійснювались в автоматичному режимі за допомогою створеного відповідного апаратного та програмного забезпечення.

Слайди із зразками пшениці розміщувались у поляриметрі на місці досліджуваного об'єкта (рис. 1). Зондування зразків відбувалося нормально до їхньої площини. Технологічні особливості поляриметра дозволяли вимірювати матриці Мюллера у діапазоні кутів розсіяння  $\Psi = 0^\circ \dots 160^\circ$ , які знаходяться у горизонтальній площині. Попередні вимірювання матриць Мюллера відомих реперних об'єктів дозволяють нам стверджувати, що експериментальна похибка  $\delta M$  вимірювання елементів матриці Мюллера об'єктів (яка оцінювалась нами за відомим співвідношенням [4])

$$\delta M = \frac{\|M^0 - M^{\text{exp}}\|}{\|M^0\|},$$

де  $M^0$ ,  $M^{\text{exp}}$  — відповідно відома таблична та виміряна матриці Мюллера реперного об'єкта, не перевищувала 0.03 відносних одиниць [27, 28] для нормованої на елемент  $M_{1,1}$  матриці Мюллера.

Аналіз матриць полягав у наступному.

1. Згідно з [20] для кожної виміряної матриці ми визначали превалюючий тип детермінованого перетворення поляризації, що описується детермінованою матрицею Мюллера [1, 17]. На основі цього ж методу [20, 21] для всіх кутів спостереження визначали ентропію. Значення останньої лежать знаходяться в діапазоні 0—1 і характеризують ступінь розупорядкованості процесу взаємодії електромагнітного випромінювання з досліджуваним об'єктом.

2. Для детермінованої матриці Мюллера, що описує превалюючий тип детермінованого перетворення поляризації, ми розв'язували векторну обернену задачу поляриметрії [10, 23], тобто визначали величини параметрів анізотропії, лінійної і кругової фазової та лінійної і кругової амплітудної, що характеризує досліджуваний об'єкт для даного кута спостереження.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Під час проведення агроекологічного моніторингу ураженості посівів пшениці вірусними інфекціями з'ясовано, що найрозповсюдженішим є ВСМП,

який постійно циркулює у природних біоценозах, уражує злакові рослини, особливо озиму пшеницю, від 15 % до 60 % і більше, що призводить до значного зниження урожаю і його якості. На рис. 2 (див. вклейку) представлені симптоми ВСМП на листках пшениці, для яких характерні хлоротичність, мозаїчність, різний ступінь пожовтіння та смуги обабіч центральної жилки.

Електронно-мікроскопічне дослідження препаратів очищеного вірусу показало, що ВСМП (полтавський ізолят) має вигляд гнучких ниток діаметром 12—13 нм і довжиною  $710 \pm 50$  нм (рис. 3), характерні для потівірусів.

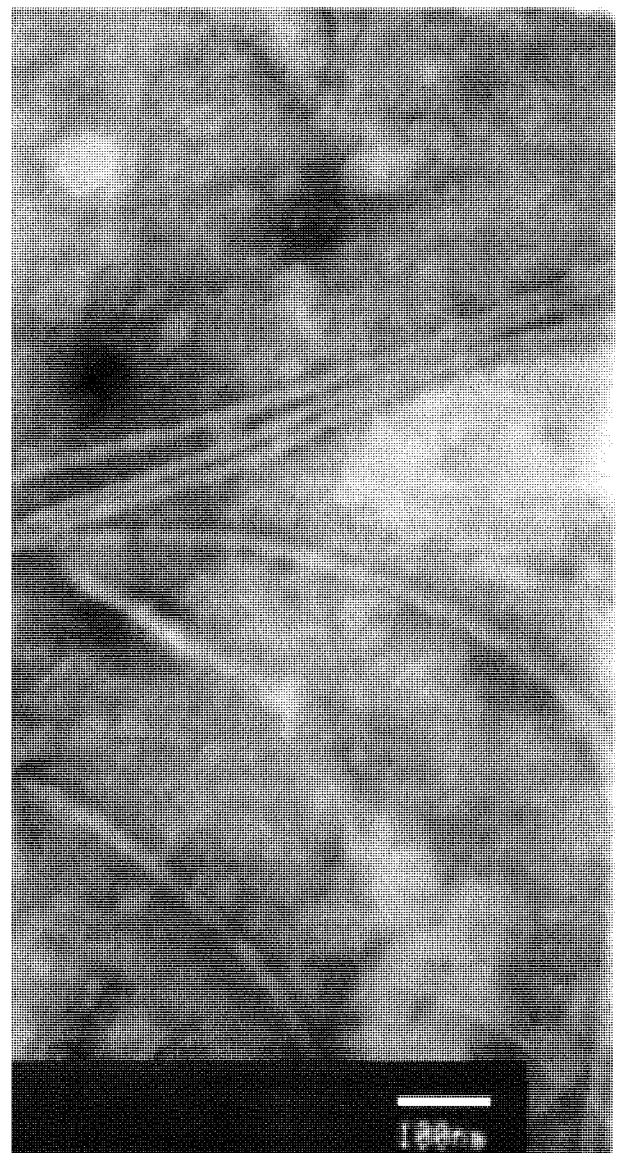


Рис. 3. Електроннограма очищеного вірусного препарату ВСМП. Інструментальне збільшення 60 000

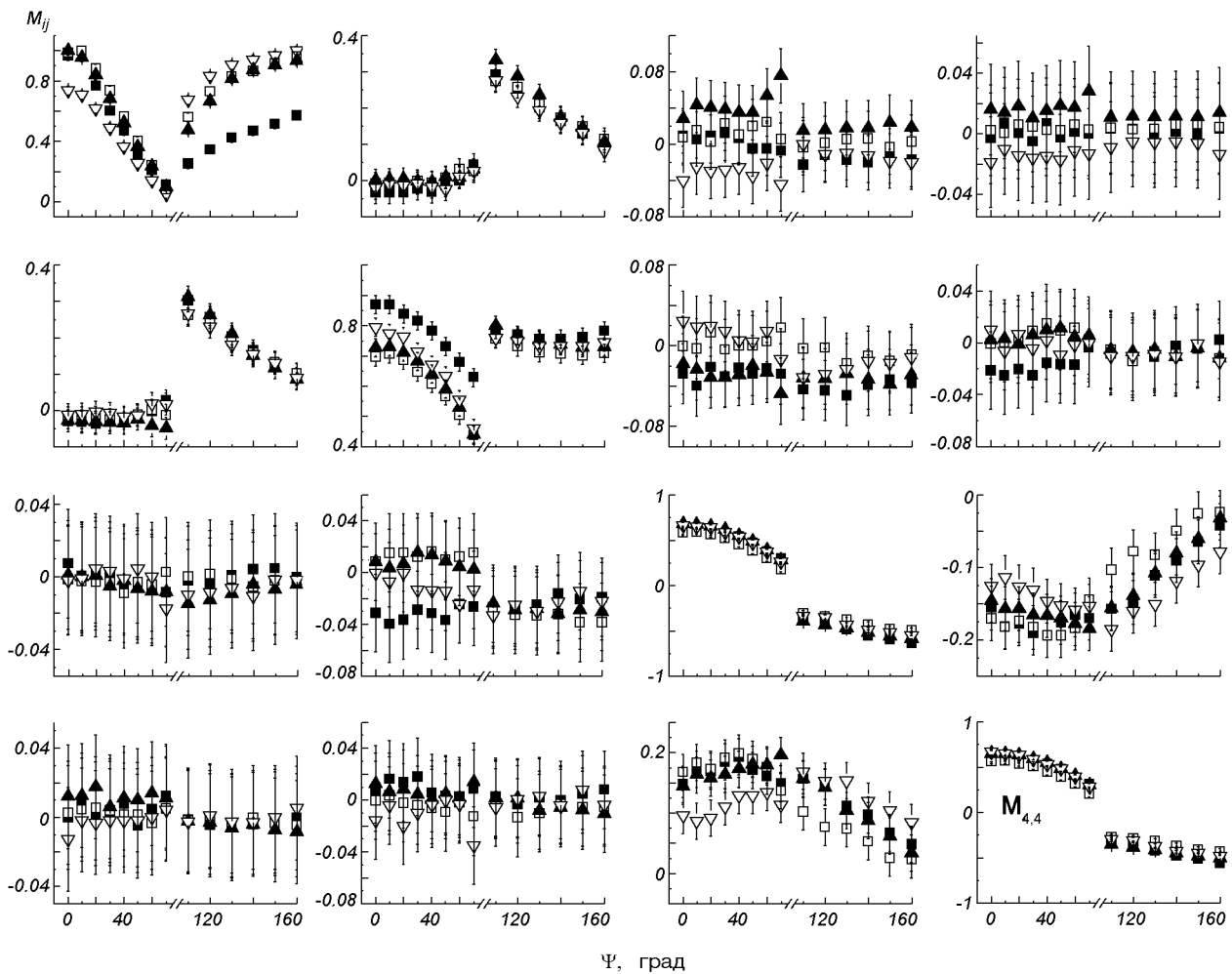


Рис. 4. Залежності значень елементів  $M_{ij}$  матриці Мюллера від кута розсіяння  $\Psi$  для листків пшениці сорту Апогей. Залежності для елемента  $M_{11}$  пронормовані на максимальне значення цього елемента серед всіх варіантів. Залежності для всіх останніх елементів нормовані на відповідні значення  $M_{11}$  у кожного варіанта на відповідному куті розсіяння

В кожний контейнер кліноштата було висаджено по 35 пророслих зерен пшениці. Для дослідження відбирали рослини протягом усього вегетаційного періоду.

При кліноштатуванні в осінньо-зимову вегетацію рослин пшениці сорту Апогей (спеціально виведеного для космічних досліджень Брюсом Бекбі в США [18, 19] і переданого нам) було з'ясовано, що найсприятливішими для росту, розвитку та урожаю зерна виявилися наземні, нерухомі варіанти. Середня вага однієї зернівки була найбільшою у нерухомих контейнерах ( $25.2 \pm 1.3$  мг). При горизонтальному кліноштатуванні всі колоски виявилися без зернівок. Така ж закономірність була встановлена у пшениці «суперкарлик», що вирощувалась

на борту орбітальної станції «Мир» [12]. При вертикальному обертанні рослин вага однієї зернівки складала  $17.2 \pm 0.9$  мг.

Репродукцію ВСМП визначали в динаміці з 11 до 27 дня з моменту інокуляції методом непрямого імуноферментного аналізу (ІФА). Встановлено, що найвищим із усіх досліджуваних варіантів титр ВСМП ( $1/2560$ ) протягом вегетаційного періоду виявився у нерухомих наземних рослин. При кліноштатуванні титр вірусу знижується, і репродукція ВСМП припиняється на 27-му добу після інфікування. Найменш сприятливі умови для репродукції ВСМП при вертикальному обертанні рослин. На 17-ту добу титр різко знижується, а на 22-гу і 27-му добу репродукцію вірусу не зафіксовано.

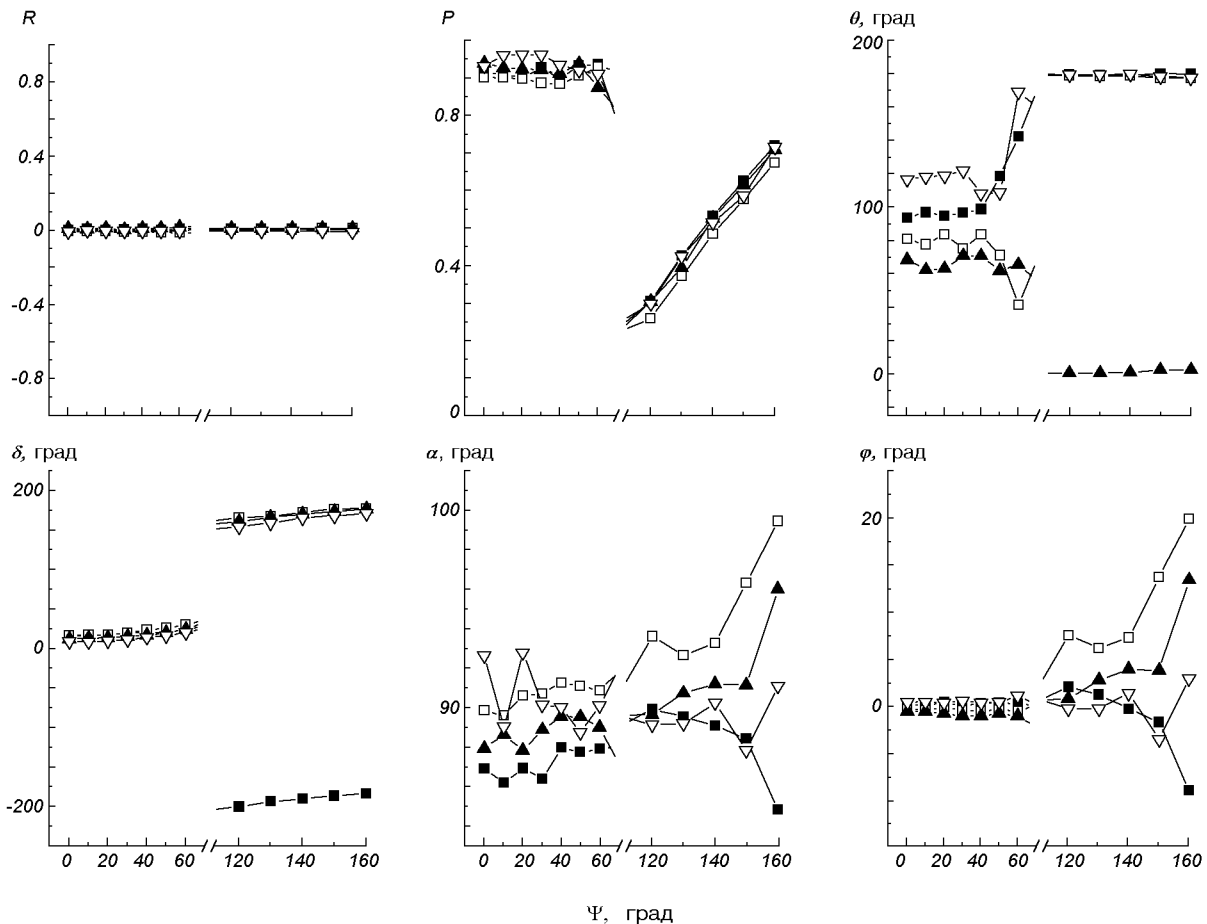


Рис. 5. Залежності значень та азимутів орієнтації амплітудної і фазової анізотропії від кута розсіяння  $\Psi$  для листків сорту Апогей. Величини амплітудних анізотропій  $R$ ,  $P$  наведені у відносних одиницях (оскільки вони характеризують відносну різницю у пропусканні власних поляризацій), а азимут лінійної амплітудної анізотропії  $\theta$ , значення та азимут лінійної фазової анізотропії  $\delta$  та  $\alpha$ , значення кругової фазової анізотропії  $\varphi$  — у градусах

Таким чином, з'ясовано, що при тривалому кліно-статуванні репродукція ВСМП у пшениці сорту Апогей не відбувається.

Опису застосування повної МП (вимірювання всіх 16 елементів матриці Мюллера) для дослідження об'єктів біологічної природи (втім числі листків пшениці) в літературних джерелах до цього часу ми не знайшли. Тому однозначна інтерпретація отриманих результатів ускладнена, і на даному етапі носитиме суто оцінковий характер.

Результати вимірювань кутових залежностей матриць Мюллера наведені на рис. 4 (розриви для кутів розсіяння  $75^\circ \leq \psi \leq 110^\circ$  відповідають рівню розсіяного сигналу, нижчому за шумовий). Кожна точка на графіку є результатом усереднення по 10 листках кожного варіанту.

У результаті аналізу експериментальних матриць Мюллера по схемі, наведеній вище, ми отримали деякі важливі параметри розсіяного світла.

На рис. 5 наведені залежності значень та азимутів орієнтації амплітудної і фазової анізотропії від кута спостереження, а на рис. 6 — значення ентропії (п. 2 схеми аналізу).

Поляриметричні параметри різних видів анізотропії та їхньої орієнтації мають різний рівень чутливості щодо умов вирощування рослин та вірусного ураження. Так, величини кругової амплітудної  $R$  (для всіх кутів спостереження) і лінійної фазової анізотропії  $\delta$  (для прямих кутів спостереження) фактично не чутливі до цих процесів. Решта параметрів, а саме: кут орієнтації  $\alpha$  лінійної фазової анізотропії (для зворотних кутів спостере-

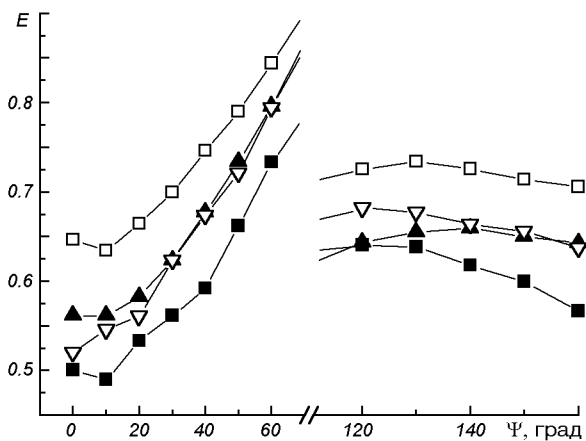


Рис. 6. Залежність величини ентропії від кута розсіяння  $\Psi$  для листків пшениці сорту Апогей

ження) і ентропія, навпаки, досить чутливі. Отже, ці параметри становлять певний інтерес для кількісного моніторингу згаданих процесів у листках.

## ВИСНОВКИ

Виділений нами полтавський ізолят за морфологією та імунологічними характеристиками є вірусом смугастої мозаїки пшениці (*Wheat streak mosaic virus*).

Умови кліностакування пригнічують репродукцію вірусу в листках пшениці сорту Апогей.

Встановлено, що найбільша різниця параметрів  $\alpha$  спостерігається для кута розсіяння  $\Psi \approx 160^\circ$  (зворотне розсіяння). Так, для здорових нерухомих рослин величина  $\alpha$  складає приблизно  $85^\circ$ , збільшуючись на 7 % в умовах кліностакування. Для вертикально кліностакованих рослин, уражених ВСМП, у порівнянні зі здоровими нерухомими рослинами, різниця  $\alpha$  збільшується приблизно на 16 %, та на 12 % для горизонтально кліностакованих рослин.

Показано, що найбільша різниця значень ентропії у зразків досягається для кута розсіяння  $\Psi \approx 10^\circ$  (пряме розсіяння). Так, у порівнянні із значенням ентропії для здорових нерухомих рослин ( $\approx 0.48$  відносних одиниць) її величина збільшується в 1.3 рази для інфікованих ВСМП вертикально кліностакованих рослин; для інфікованих ВСМП горизонтально кліностакованих рослин ентропія збільшується в 1.16 разів, а для здорових вертикально кліностакованих — в 1.12 рази.

У випадку зворотного розсіяння  $\Psi \approx 160^\circ$  ентропія складає 0.56 відносних одиниць для здорових нерухомих рослин, для вертикально кліностакованих — збільшується в 1.13 рази. Для інфікованих ВСМП вертикально кліностакованих рослин — збільшується в 1.25 рази, для ВСМП горизонтально кліностакованих — в 1.14 рази.

Отже, метод лазерної мюллер-поляриметрії може слугувати для виявлення змін в листках пшениці під впливом вірусу смугастої мозаїки і модельованої мікрогравітації.

1. Аззам Р. А., Башара Н. М. Эллипсометрия и поляризованный свет. — М.: Мир, 1981.—312 с.
2. Бойко А. Л., Силаєва А. М., Міщенко Л. Т., Решетник Г. В. Особливості ультраструктурної організації клітин мезофілу озимої пшениці за умов вірусної інфекції // Цитология і генетика.—1997.—31, № 5.—С. 71—79.
3. Ванюшин Б. Ф. Апоптоз у растений // Успехи биологической химии.— 2001.—№ 41.—С. 3—38.
4. Воеводин В. В. Вычислительные основы линейной алгебры. — М.: Наука, 1977.—251 с.
5. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. — М.: Мир, 1978.—341 с.
6. Каневский В. А., Сытник К. М., Росс Ю. К., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Лазерная томография растительности. — Киев: Ин-т ботаники АН Украины, 1992.—22 с.
7. Кондратьев, Каневский В. А., Росс Ю. К. и др. Лазерное дистанционное зондирование растительности. — Л.: АН СССР, ГАО, 1987.—168 с.
8. Левинских М. А. Онтогенез, репродукция и метаболизм высших растений в условиях космического полета: Автореф. дис.... д-ра биол. наук. — М.: Ин-т Медико-биологических проблем РАН, 2002.—49 с.
9. Мищенко Л. Т. Влияние моделированной микрогравитации на ростовые процессы и фотосинтетический аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом полосатой мозаики пшеницы // Космична наука і технологія.— 2002.—8, № 5/6.—С. 66—70.
10. Оберемок С. А., Савенков С. М. Розв'язок оберненої задачі поляриметрії для детермінованих об'єктів на основі неповних матриць Мюллера // Укр. фіз. журн.—2002.—47, № 8.—С. 803—807.
11. Посудін Ю. І. Спектроскопічний моніторинг агросфери. — Київ: Урожай, 1998.—128 с.
12. Сычев В. Н., Шепелев Е. Я., Мелешко Г. И. и др. Биологические системы жизнеобеспечения: исследования на борту орбитального комплекса «Мир» // Авиакосмическая и экологическая медицина (Россия).—1999.—№ 1.—С. 10—16.
13. Тучин В. В. Шубочкин Л. П. Применение лазеров в офтальмологии. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1984.—Ч. 1.—243 с.
14. Ушенко О. Г., Пішак В. П. Лазерна поляриметрична діагностика в біології і медицині. — Чернівці: Мед. академія, 2000.—302 с.
15. Шерклифф У. Поляризованный свет. Получение и использование. — М.: Мир, 1965.—254 с.
16. Brakke M. K. et al. Degradation of wheat streak mosaic virus capsid protein during leaf senescence // Phytopathology.— 1990.—80, N 12.—P. 1401—1405.
17. Brosseau Ch. Fundamentals of polarized light. — New York: Wiley, 1998.—345 p.



Рис. 2. Симптоми вірусу смугастої мозаїки пшениці (ВСМП) на листках пшениці



18. Bugbee B. Engineering plants for spaceflight environments // Amer. Soc. Gravitational and Space Biol. Bull.—1999.—12.—P. 67—74.
19. Bugbee B., Koerner G., Albrechtsen R., et al. "USU-Apogee". A new high-yielding dwarf wheat cultivar for life support systems // 31 Scientific Assembly of COSPAR. — The University of Birmingham (England), 1996.—P. 205.
20. Cloud S. R. Group theory and polarization algebra // Optik.—1986.—N 7.—P. 26—36.
21. Cloude S. R., Pottier E. Concept of polarization entropy in optical scattering // Opt. Ing.—1995.—34, N 6.—P. 1599—1610.
22. Kordyum E. L. Plant reproduction systems in microgravity: experimental data and hypotheses // Adv. Space Res.—1998.—21, N 8/9.—P. 1111—1120.
23. Mar'yenko V. V., Savenkov S. N. Representation of arbitrary Mueller matrix in the basis of matrices of circular and linear anisotropy // Opt. and Spectroscopy.—1994.—76, N 1.—P. 94—96.
24. McDaniel E. B., McClain S. C., Hsu J. W. P. Nanometer scale polarimetry studies using a near-field scanning optical microscope // Appl. Opt.—1998.—37, N 1.—P. 84—92.
25. Mishchenko L. T., Silayeva A. M. Effect of clinostating on physiological and biochemical characteristics of wheat plants infected by the streak mosaic virus of wheat (SMVW) // Horticulture & Vegetable Crowing (Lithuania).—1998.—17, N 3.—P. 386—394.
26. Raven P. N., Jordan D. L., Smith C. E. Polarized directional reflectance from laurel and mullein leaves // Opt. Eng.—2002.—41, N 5.—P. 1002—1012.
27. Savenkov S. N. Optimization and structuring of the instrument matrix for polarimetric measurements // Opt. Eng.—2002.—41, N 5.—P. 965—972.
28. Savenkov S. N., Muttiyah R. S., Oberemok Y. A. Transmitted and reflected scattering matrices from an English Oak leaf // Appl. Opt.—2003.—42, N 24.—P. 4955—4962.
29. Smith M. H., Lompado A., Burke P. Mueller matrix imaging polarimetry in dermatology // Proc. SPIE.—2000.—3911.—P. 132—137.
30. Walter G. Egan., Israel S., Johnson W. R., Whitehead V. S. High-resolution space-shuttle polarimetry for farm crop classification // Appl. Opt.—1992.—31, N 10.—P. 1542—1548.

---

**APPLICATION OF LASER MUELLER-POLARIMETRY  
TO THE INVESTIGATION OF HEALTHY AND INFECTED  
BY THE WHEAT STREAK MOSAIC VIRUS APOGEE  
VARIETY WHEAT GROWN UNDER SIMULATED  
MICROGRAVITY CONDITIONS**

**L. T. Mishchenko, S. M. Savenkov, Ye. A. Oberemok**

Apogee variety wheat plants inoculated by wheat streak mosaic virus isolated by us displayed the reduction of viral reproduction under simulated microgravity conditions. We employed the laser Mueller-polarimetry method for the first time to study simulated microgravity effects on healthy and infected by the wheat streak mosaic virus wheat plants. Our results are indicative of the possibility to apply the laser Mueller-polarimetry procedure to the investigation of structural and functional changes in wheat leaves caused by virus infection and clinorotation.