

УДК 528.8:632:578/579:635.64

Використання дистанційного зондування для оцінки дії стресових факторів на рослинність

О. А. Войнов

Інститут агроекології і біотехнології УААН

Надійшла до редакції 03.10.97

Приведені результати дистанційних польових досліджень інформативності спектрального електромагнітного випромінювання у видимій і ближній ІЧ-смугах спектру з метою оцінки фітопатологічного стану томатів. Встановлено, що найінформативнішою є ближня ІЧ-область. Застосування дистанційних методів дозволяє виявити захворювання на ранніх стадіях розвитку (інкубаційний період) до появи його візуальних ознак.

У численних дослідженнях, проведених у різних країнах, виявлена можливість застосування дистанційних методів (ДМ) для обстеження територій, зайнятих сільськогосподарськими культурами, з метою оцінки їхнього фітосанітарного стану [1, 7, 11, 14, 17, 18]. Часто для цього використовують так званий коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ).

Дистанційно оцінити фітопатологічний стан сільськогосподарських угідь за допомогою КСЯ дозволяє різниця в реакції хворих та здорових рослин на сонячне випромінювання в різних його ділянках [3, 5]. Поглинання променевої енергії в смузі фізіологічно активної радіації (0.35—0.75 мкм) визначається головним чином такими пігментами, як хлорофіли та каротиноїди. В смузі спектру $\lambda\lambda$ 0.75—1.2 мкм пігменти практично нейтральні і оптичні властивості зеленого листа визначаються переважно структурою тканин листа. В цій смузі спектру тканини мезофілу здорового листа з високим тургором прекрасно відбивають падаюче випромінювання. Внаслідок дії екстремальних факторів відбувається падіння тургору тканин і кількісні зміни хлорофілу в клітинах стовбчатої паренхіми [3, 6, 12, 16].

На перших етапах розробки методів дистанційного зондування (ДЗ) дослідження повинні бути комплексними, тобто дані необхідно підтвердити різноманітними даними контактних наземних вимірювань, які є метрологією для дистанційних досліджень [2, 3, 19]. Наприклад, патофізіологічні зміни у рослинному організмі на початкових етапах захворювання можна зафіксувати, застосовуючи фізіологічні методи дослідження клітин продишового комплексу, а також біоелектричні показники рослинних тканин [8, 9]. Поява візуальних ознак ураження рослин тим чи іншим патогеном свідчить про незворотність фізіологічних та біохімічних змін.

У наше завдання входило відпрацювання методів оцінки дії стресових факторів на рослинний організм на основі змін КСЯ. Як стресові фактори, які найчастіше призводять до змін в розвитку рослин, було вибрано вірусну інфекцію та підвищені норми азотних добрив. Останнє часто трапляється при неякісному внесенні добрив на полях. Оцінку негативного впливу факторів проводили на одній з найпоширеніших овочевих культур — томатах, вирощених на дослідних ділянках Інституту екологічної генетики АН Молдови.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Схема досліду включала: контроль (№ 60), трьохкратну норму азотних добрив (№ 180), зараження рослин нульовим штамом вірусу тютюнової мозаїки (ВТМ-0) і сумарну дію підвищених доз живлення і зараження (азот + вірус). Ґрунт — чорнозем звичайний. Розмір ділянки складав 7.3×2.5 м.

Розсаду висадили 18—19 травня, зараження рослин інфекційним інокулюмом виконано у фазі початку бутонізації першої китиці (18 червня). Вимірювання проводили на 7-й, 21-й і 41-й день після інокуляції (відповідно 25 червня, 8 і 28 липня).

При першому вимірюванні розвиток патогена знаходився на початковій (інкубаційній) стадії, коли видимі прояви ураження відсутні, при другому вимірюванні симптоми хвороби візуально ледь проявлялись, тоді як при третьому їх було чітко видно.

КСЯ вимірювали в інтервалі довжин хвиль 400–1070 нм, через кожні 10 нм за допомогою польового спектрофотометра, розробленого в ДКБ «Інтеграл» Ленінградського держуніверситету. Прилад працює на принципі порівняння яскравості об'єкта і освітленості від неба. Під час вимірювань спектрометр встановлювали на тринозі на висоті 0.6—0.7 м від землі, кутове поле зору приладу дорівнювало 17° . За такої висоти в об'єктив спектрометра попадала ділянка діаметром 20—25 см. Час реєстрації одного спектру — 1 хв, відносна помилка вимірювань КСЯ — 1—3 %. Значення КСЯ записували на гнучкий магнітний диск.

Для оцінки впливу варіантів досліду на кількісний склад пігментів одночасно з дистанційною зйомкою визначали кількість хлорофілів та каротиноїдів в листі рослин.

ОБРОБКА ДАНИХ

Для розрахунків було використано стандартну програму дисперсійного аналізу, розроблену в ЦАМ АН Молдови. В якості спектральних характеристик

нами взяті значення КСЯ на окремих ділянках спектра відбиття і розраховані на їх основі різні вегетативні індекси (ВІ). Перевагу віддано чотирьом довжинам хвиль: синій 480 (С), зеленій 560 (З), червоній 670 (Ч) та ближній інфрачервоній (БІЧ) 860 нм, які найбільш інформативно відображають зелену рослинність [13].

В якості ВІ застосовані дві категорії комплексних спектральних характеристик: індекси-відношення і ортогональні n -вимірні індекси. Індекси відношення створені шістьма можливими парними комбінаціями КСЯ в чотирьох вибраних діапазонах при діленні більшої довжини хвилі на меншу: З/С, Ч/С і т. д. До них можна віднести і більш складні — так звану нормалізовану різницю (НР), розраховані як відношення різниці КСЯ БІЧ та види мого діапазону спектру до їх суми.

В даному дослідженні було використано три таких ВІ:

$$НР_c = (БІЧ - С) / (БІЧ + С),$$

$$НР_z = (БІЧ - З) / (БІЧ + З),$$

$$НР_ч = (БІЧ - Ч) / (БІЧ + Ч).$$

Із багатовимірних індексів для аналізу були вибрані:

— чотири- і двовимірний індекси зеленості:

$$G_4 = -0.288С - 0.300З - 0.581Ч + 0.700БІЧ,$$

$$G_2 = -0.851Ч + 0.526БІЧ;$$

— чотири- і двовимірний індекс яскравості:

$$B_4 = 0.277С + 0.402З + 0.509Ч + 0.709БІЧ,$$

$$B_2 = 0.525Ч + 0.851БІЧ.$$

Ці індекси добре зарекомендували себе при дослідженні фітоценозів. Коефіцієнти рівнянь при значеннях КСЯ у відповідних смугах спектру розраховані за методом, запропонованим Джексоном [15].

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

Посилення азотного живлення призвело до поступового збільшення загального хлорофілу ($a+b$) та каротиноїдів (табл. 1). На 41-й день їхні величини дорівнювали відповідно: в контролі — 6.04 і

Таблиця 1. Кількість пігментів в листі томатів під впливом ВТМ-0 та азотних добрив на 7-й, 21-й та 41-й день

Варіанти	Хлорофіл а			Хлорофіл а+b			Каротиноїди			Хлорофіл + каротиноїди		
	7	21	41	7	21	41	7	21	41	7	21	41
Контроль (№ 60)	3.31	3.00	4.71	4.17	3.28	6.04	1.37	1.26	1.83	5.54	4.54	7.87
№ 180	3.52	3.48	4.83	4.41	4.31	6.24	1.51	1.53	1.84	5.92	5.84	8.08
ВТМ-0	3.28	3.06	4.02	4.28	3.90	5.28	1.41	1.36	1.62	5.59	5.26	6.90
ВТМ+№ 180	3.10	3.70	3.06	4.07	4.62	4.14	1.29	1.57	1.29	5.36	6.26	5.43

Таблиця 2. Р-значення впливу азотного живлення (А) та вірусного ураження (В) на кількість пігментів у листі томатів

Пігменти	7-й день			21-й день			41-й день		
	А	В	АВ	А	В	АВ	А	В	АВ
Хлорофіли: <i>a</i>	0.947	0.067	0.106	0.0005	0.040	0.310	0.006	0.0001	0.002
<i>b</i>	0.253	0.947	0.172	0.0005	0.0109	0.813	0.670	0.0005	0.838
<i>a+b</i>	0.922	0.138	0.110	0.0002	0.017	0.436	0.024	0.0001	0.008
<i>a/b</i>	0.004	0.0005	0.947	0.674	0.327	0.802	0.0005	0.0002	0.0001
Каротиноїди	0.813	0.024	0.072	0.008	0.493	0.947	0.0018	0.0001	0.001

1.83 мг/дм²; при № 180 — 6.24 і 1.84 мг/дм².

Дещо складніший зв'язок спостерігається між пігментами та вірусним зараженням. Спочатку захисна реакція томатів на стрес призвела до посилення синтезу пігментів і їхнього накопичення. Так, на 21-й день після зараження кількість хлорофілів у варіанті з ВТМ-0 дорівнювала 3.90 мг/дм², каротиноїдів — 1.36, у контролі відповідно 3.28 і 1.26; на 41-й день хлорофілів у досліді було 5.28, а у контролі — 6.04 мг/дм², каротиноїдів — 1.62 і 1.83 мг/дм². Аналогічна залежність спостерігається і у варіанті ВТМ-0 + № 180 із значним зменшенням кількості пігментів на 41-й день розвитку хвороби: сума хлорофілів досягла величини 4.14 проти 6.04 у контролі; сума хлорофілів з каротиноїдами — 5.43, тоді як у контролі — 7.87 мг/дм².

Аналізуючи значимість ($P < 0.05$) впливу азотних добрив і вірусу на накопичення пігментів, можна стверджувати, що захворювання більш суттєво впливає на вміст пігментів (табл. 2).

РЕАКЦІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОМАТІВ НА СТРЕС

Опираючись на одержані дані про реакцію пігментів на стрес, а також на літературні джерела, можна передбачити, що досліджувані фактори повинні вплинути і на використанні нами спектральні характеристики рослин томатів.

На рис. 1 показаний спектр відбиття для томатів сорту «Ністру» на 21-й день після зараження вірусом. Добре видно, що в інтервалі довжин хвиль λ 760—1070 нм (БІЧ) величина КСЯ контрольних рослин менша аналогічних значень рослин у варіанті з азотними добривами, але більше величини КСЯ хворих рослин. В червоній смузі спектру спостерігається зворотна тенденція.

На рис. 2, а показаний розподіл інформативності КСЯ по спектру для розпізнавання здорових і хворих рослин томатів серед всієї сукупності об'єктів незалежно від фенофази розвитку. Видно, що

найінформативнішою є БІЧ-смуга спектру, але міра її інформативності не перевищує значення 0.3. Це закономірно, зважаючи на те, що часові варіації КСЯ можуть переважити варіації, зумовлені стресом рослин.

Спектральний розподіл інформативності КСЯ для різних стадій розвитку патологічного процесу представлено на рис. 2, б—г. Для стадії інкубації вірусу характерне зростання інформативності не тільки в БІЧ, але і в синьо-зеленій та червоній частинах спектру; при наявності візуальних проявів зараження висока інформативність зберігається тільки в БІЧ-частині, досягаючи значень 0.6 і більше. На пізнішій стадії хвороби розпізнавання хворих і здорових рослин за значеннями КСЯ знижується,

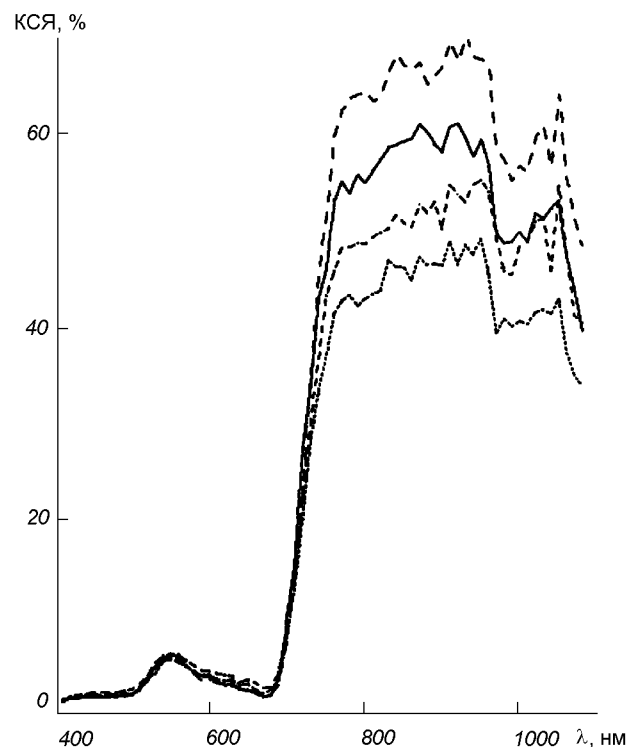


Рис. 1. КСЯ томатів сорту «Ністру» на 21-й день ураження ВТМ-О: суцільна лінія — контроль, штрихова — № 180, штрих-пунктирна — ВТМ-0, пунктир — ВТМ-0 + № 180

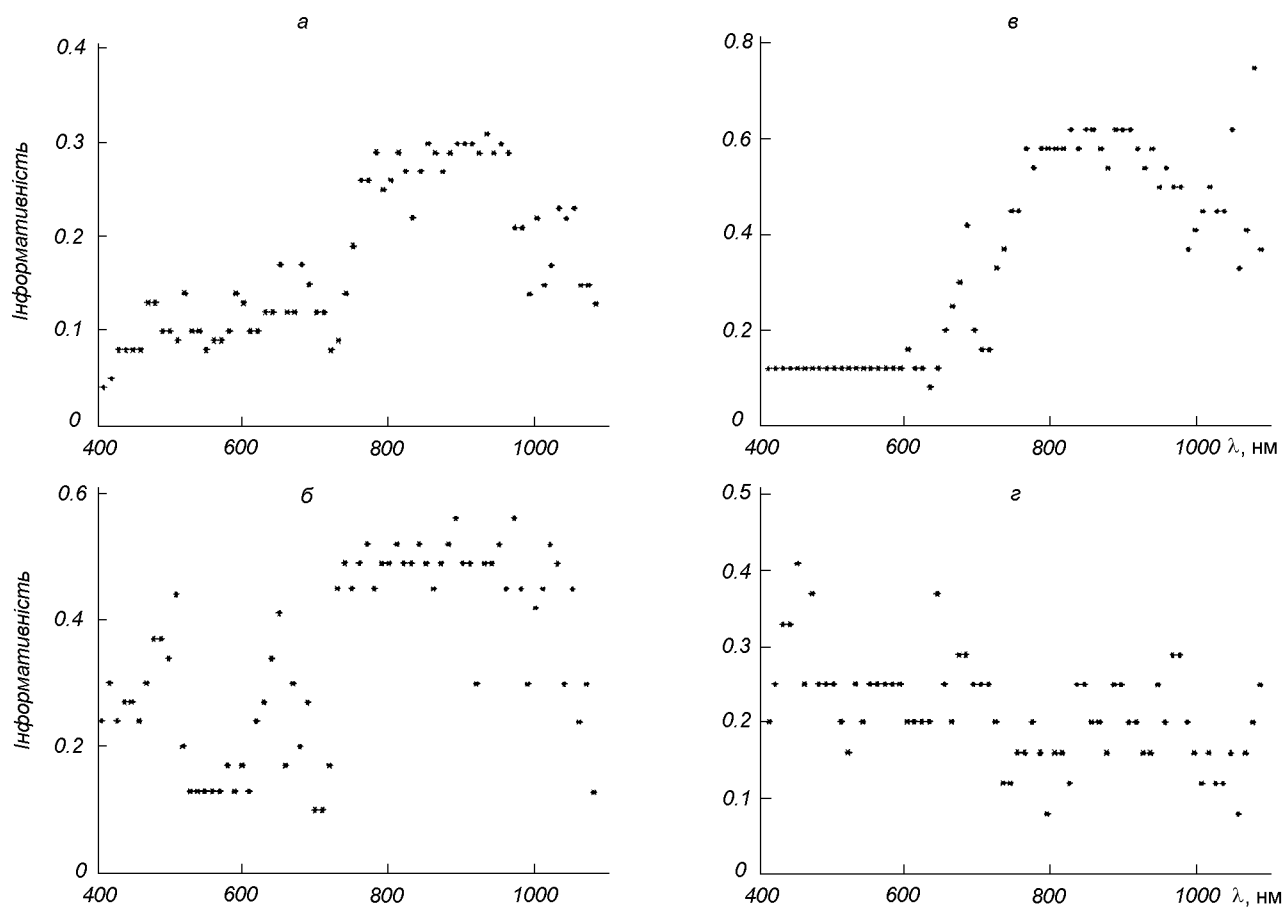


Рис. 2. Розподіл інформативності КСЯ томатів для різних ділянок спектру: а — протягом сезону, б — на стадії інкубації BTM-0, в — за візуальних ознак ураження BTM-0, г — на пізній стадії розвитку BTM-0

при відсутності будь-якого чітко визначеного максимуму інформативності.

Як видно із табл. 3, інформативність спектральних характеристик перш за все залежить від фази розвитку рослин і інтенсивності стресу. При цьому найбільша інформативність (якщо виходити із абсолютних значень) була на 21-й день після зараження. Як і слід було очікувати, із окремих ділянок

спектру найінформативнішими були Ч і БІЧ, і як наслідок, комбінації КСЯ на цих довжинах хвиль: НРч і БІЧ/Ч. Достатньо хорошою інформативністю вирізняються також комбінації КСЯ в БІЧ- і 3-діапазонах: НРз і БІЧ/3. Слід відмітити, що використання n -вимірних ортогональних перетворень не дає переваг у порівнянні з простими відношеннями, а часто навіть поступається перед використанням

Таблиця 3. Оцінка інформативності (%) спектральних ознак рослин томатів в залежності від фази розвитку захворювання BTM-0

Дата реєстрації	Спектральна характеристика																
	С	З	Ч	БЧ	З/С	К/С	К/З	БЧ/С	БЧ/З	БЧ/К	НРс	НРз	НРч	G ₂	G ₄	B ₂	B ₄
25.06	76.4	61.0	71.5	73.0	76.6	53.1	80.1	93.0	82.2	82.6	92.7	82.2	83.7	76.3	77.1	72.7	73.1
08.07	68.7	70.2	88.6	86.1	68.8	90.9	91.7	88.8	86.8	88.5	88.9	87.0	88.3	86.5	86.7	84.8	84.4
28.07	76.0	68.7	77.1	64.8	65.3	70.9	77.5	72.1	73.6	78.2	73.4	74.6	82.8	62.0	61.2	63.7	63.5
По всьому масиву																	
	43.8	41.6	55.1	49.0	41.7	48.8	56.7	56.5	63.8	69.7	57.3	65.9	72.5	50.0	50.5	46.9	44.8

Таблиця 4. *P*-значення впливу азотного живлення (А) та вірусного зараження (В) на спектральні характеристики томатів

Спектральна характеристика	7-й день			21-й день			41-й день		
	А	В	АВ	А	В	АВ	А	В	АВ
С	1.000	0.006	0.417	0.430	0.017	0.530	0.155	0.020	0.802
З	0.246	0.294	0.469	0.133	0.151	0.710	0.262	0.101	0.453
К	0.661	0.017	0.526	1.000	0.0001	0.265	0.067	0.028	0.980
БІЧ	0.609	0.006	0.981	0.115	0.0005	0.965	0.902	0.901	0.990
З/С	0.115	0.024	0.922	0.445	0.068	0.852	0.947	0.220	0.151
Ч/С	0.414	0.813	0.947	0.028	0.0001	0.147	0.072	0.068	0.883
Ч/З	0.609	0.049	0.976	0.017	0.0001	0.176	0.049	0.014	0.404
БІЧ/С	0.302	0.0005	0.472	0.530	0.0001	0.469	0.407	0.024	0.791
БІЧ/З	0.649	0.0001	0.681	0.902	0.0001	0.294	0.457	0.087	0.469
БІЧ/Ч	0.771	0.0005	0.625	0.096	0.0001	0.249	0.087	0.014	0.289
НРс	0.504	0.0001	0.743	0.302	0.0001	0.259	0.327	0.053	0.980
НРз	0.625	0.0001	0.661	0.643	0.0001	0.277	0.397	0.147	0.637
НРч	0.980	0.0005	0.902	0.040	0.0001	0.063	0.155	0.077	0.947
G ₂	0.637	0.003	0.998	0.101	0.0002	0.984	0.980	0.681	0.998
G ₄	0.643	0.003	1.000	0.110	0.0002	0.990	0.984	0.703	0.962
B ₂	0.598	0.008	0.947	0.120	0.0005	0.980	0.838	0.987	0.955
B ₄	0.000	0.008	0.813	0.120	0.001	0.947	0.771	0.980	0.984

значень КСЯ на одній ділянці спектру.

Проаналізуємо тепер табл. 4, де в значеннях *P* приведені узагальнені результати оцінки впливу азотного живлення та вірусного зараження на спектральні характеристики.

Вплив азоту на всіх фазах розвитку безпосередньо на значеннях КСЯ суттєво (при $P = 0.05$) не відчувається. В той же час на 21-й день азотний вплив виявлено комплексними спектральними характеристиками, зокрема відношеннями Ч/С, НРч, і особливо Ч/З ($P = 0.017$). Відношення Ч/З — єдиний параметр, чутливий до азоту і на 41-й день. Оскільки у всіх цих трьох ВІ є КСЯ в червоній частині спектру, можна вважати, що визначальним моментом тут є вміст хлорофілу в листі томатів. І дійсно, якщо на 7-й день суттєва різниця вмісту хлорофілів *a* і *b* між варіантами азотного живлення була відсутня, то на 21-й день *P*-значення різниці досягло 0.002 (табл. 2). На 41-й день кількість хлорофілу в листі (5—6 мг/дм²) перевищує поріг, до якого, як вважають деякі дослідники [6], вміст пігментів суттєво впливає на зміну спектрального відбиття листя, і виявити підвищені дози азоту можливо лише за відношенням Ч/З.

Вплив вірусної інфекції, на відміну від азоту, було виявлено спектральним вимірюванням вже через тиждень після інокуляції, як безпосередньо за КСЯ (Ч-, БІЧ-ділянки), так і за ВІ, особливо БІЧ/З, БІЧ/Ч, НРч, НРз. На 21-й день хвороба виявляється практично всіма спектральними характеристиками, і особливо добре — індексами-відношеннями.

ВПЛИВ ВЗАЄМОДІЇ АЗОТУ І ВІРУСУ

В цілому аналіз даних табл. 4 показує, що найбільш чутливими до дії вірусу та азотного живлення є КСЯ томатів в БІЧ- і Ч-діапазонах і їхньої комбінації (БІЧ/Ч, НРч). Використання більш складних ВІ, в тому числі G_4 , який враховує відбиття на всіх чотирьох ділянках спектру, не тільки не дає переваг в порівнянні з простими відношеннями, а навіть інколи погіршує результати (збільшення *P*).

Порівняння табл. 1, 2 і 4 показує, що вплив підвищених доз азоту виявляється дещо краще при визначенні кількості пігментів, ніж за реакцією спектрального відображення. Мабуть, це закономірно, якщо врахувати, що спектральні характеристики являються вторинними по відношенню до пігментів. Але при індикації вірусного захворювання, яке впливає не лише на вміст пігментів, а і на морфологічні властивості листя, чутливість спектральних характеристик дещо вища, ніж пігментного апарату.

ВИСНОВКИ

Результати дослідів на помідорах показали, що під впливом захворювання ВТМ-0 змінюється кількість пігментів, що відображається на оптичних характеристиках. Це підтверджує можливість використання дистанційних методів для діагностики стресового стану рослин. Найінформативнішою серед КСЯ і

комплексних вегетаційних індексів для розпізнавання здорових і хворих рослин виявилась БІЧ-зона спектру.

Застосування спектральних характеристик сприяє виявленню хвороби на ранній стадії її розвитку, тобто під час інкубаційного періоду, що дає можливість вчасно провести захисні заходи.

1. Войнов О. А., Райлян В. Я., Девятаев О. С. Оценка состояния полей озимой пшеницы дистанционными методами // Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1989.—С. 51—54.
2. Войнов О. А., Райлян В. Я., Коробов Р. М. Некоторые статистические характеристики спектральных параметров растительного покрова озимой пшеницы // Тр. НПО «Планета».—1990.—Вып. 39.—С. 136—150.
3. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987.—248 с.
4. Дадыкин В. П., Беденко В. П. Внешние условия и усвоение растением лучистой энергии // Вестн. с.-х. науки.—1961.—№ 6.
5. Кочубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
6. Лялько В. И., Колоша О. И. Метод ранней диагностики перезимовки озимых посевов с применением дистанционной инфракрасной съемки // Изв. АН СССР. Сер. биол.—1985.—№ 3.—С. 456—458.
7. Фадеев Ю. Н., Алимухамедов С. Н., Буданов В. Е. Аэрокосмический контроль фитосанитарного состояния агроресурсов // Вестн. с.-х. науки.—1984.—№ 3.—С. 129—134.
8. Шабала С. Н., Войнов О. А. Динамика физиологических характеристик растений — как элемент системы экологического мониторинга // Успехи соврем. биол.—1994.—114, вып. 2.—С. 144—159.
9. Шабала С. Н., Войнов О. А. и др. Критерии оценки эффективности действия гербицидов лабораторными экспресс-методами по переходным биоэлектрическим реакциям // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. — Киев: Аграрна наука, 1996.—С. 103—110.
10. Шульгин И. А., Клешиин А. Ф. О корреляции между оптическими свойствами и содержанием хлорофилла в листьях растений // Докл. АН СССР.—1959.—125, № 6.—С. 1371—1373.

11. Basu P. et al. Estimation of pea yield loss from severe root rot and drought stress using aerial photographs and a loss conversion factor // Can. J. Plant Sci.—1978.—58, N 1.—P. 159—164.
12. Boatwright G. O., Whitehead V. S. Early warning and crop condition assessment research // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 54—64.
13. Bunnik J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relations with their morphological and optical properties. — Wageningen, 1978.—180 p.
14. Hilty Y. W., Ausmus B. S. Infrared photography of southern corn leaf blight // Phytopathology.—1972.—62, N 8.—P. 804.
15. Jackson R. D. Spectral indices in n. Space // Remote Sens. Environ.—1983.—13.—P. 409—421.
16. Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato R. J., Idso S. B. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 99—106.
17. Kanemasu E. T. Using ERTS-1 data systems to predict wheat disease severities and to estimate crop growth // IEEE Int. Conf. Commun. Minneapolis Minn., New York.—1974.—P. 32D-1—32D-3.
18. Steven M. D. Reflection in the red and near infrared bands by healthy and stressed crops // Proc. 9th Ann. Conf. Remote Sens. Soc.—1983, P. 152.
19. Wiegand C.L., Richardson A.J., Nixon P.R. Spectral components analysis: a bridge between spectral observations and agrometeorological crop models // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.—1986.—24, N 1.—P. 83—89.

USE OF REMOTE SENSING METHODS FOR EVALUATING THE ACTION OF STRESS FACTORS ON VEGETATION

O. A. Voinov

We discuss the results of field investigations on the information content of the electromagnetic emission from tomato plants in the visible and near-IR spectral regions with the aim to evaluate their phytopathological condition. The near-IR region is shown to be more informative. Remote sensing methods allow the plant phytopathological state to be detected at early stages of plant development (before the appearance of visual symptoms).