

УДК 633.11«324»:581.132:58.035

МОНИТОРИНГ ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ УРОЖАЯ

И. С. ШАТИЛОВ, А. Г. ЗАМАРАЕВ, Г. В. ЧАПОВСКАЯ, А. А. ГЕН

(Кафедра растениеводства)

Фотометрические измерения посевов полевых культур на земле с помощью биометрического фотометра ФОМ-2М позволяют оперативно с высокой точностью достоверности оценивать биологическую и хозяйственную урожайность, выявлять и регулировать оптимальный ход формирования урожая полевых культур, выращиваемых по программируемым технологиям, вносить коррективы в технологические приемы.

В длительных стационарных опытах кафедры растениеводства Тимирязевской академии нами в 1986—1987 гг. изучался индекс отражения (ИНО) посевов озимой пшеницы. Его измерения проводились биометрическим фотометром типа ФОН-2М [1] с высоты $\approx 1,5$ м; угол поля зрения 90° . Фотометр позволяет измерять индекс отражения (I) в диапазоне освещенности от 0,5 до 13 Вт/м² с относительной погрешностью не более 5%. Временной интервал полного цикла фотометрических измерений всех вариантов не превышал 2 ч (в период с 10 до 16 ч). Фотометрируемая площадь составляла 25% общей площади каждого варианта. ИНО равен отношению спектральных коэффициентов яркости в инфракрасном (0,78—0,82 мкм) и красном (0,67—0,68 мкм) спектральных диапазонах. Указанные спектральные диапазоны соответствуют диапазонам минимального и максимального поглощения света растениями, и поэтому ИНО характеризует прежде всего мощность фотосинтезирующей массы растений. В силу взаимосвязанности физиологических процессов, протекающих в растениях при росте и старении, любые изменения в окружающей растении среде (тепло, влага, солнечная радиация, минеральное питание и др.) неизбежно проявляются через морфологические и цветковые характеристики растений и находят свое отражение в изменении ИНО. Измеряя ИНО, получают комплексный интегральный показатель, характеризующий всю предысторию состояния растений, зафиксированную в текущем состоянии агрофитоценоза [1, 2]. Высокая степень корреляции между ИНО и массой растительного покрова, листовым индексом, густотой стеблестоя, проектным покрытием, степенью поражения отмечается многими авторами [1—3, 6, 7]. Указанные свойства фотометрических измерений на земле, с борта самолета и космических аппаратов позволяют, на наш взгляд, занять особое место при программированном способе выращивания урожая, быть основными и нередко достаточными при фиксации текущего состояния агроценозов и эффективности используемой агротехники.

Измеряли ИНО посевов озимой пшеницы, выращенной на слабо-окультуренной почве в варианте без удобрений; на среднекультуренной почве в вариантах: 1 — без удобрений, 2 и 3 — нормы удобрений, рассчитанные соответственно на использование 2 и 3% физиологически активной радиации (ФАР), 4 — рекомендованная норма удобрений; на хорошо окультуренной почве в вариантах: 1 — без удобрений, 2 — норма удобрений, рассчитанная на использование 3% ФАР, 3 — рекомендованная норма удобрений. Повторность опыта 4-кратная, размер делянок 180—100 м². Пшеницу высевали 25 августа, норма — 6 млн. всхожих зерен на 1 га. Фосфорно-калийные удобрения вносили под посев, азотные (аммиачную селитру) дробно: половину нормы — в фазу весеннего кущения (конец апреля), остальное количество — в фазу колошения (середина июня). В табл. 1 приведены нормы азотных удобрений, а также условные обозначения изучаемых вариантов.

Норма аммиачной селитры (кг д. в. на 1 га)

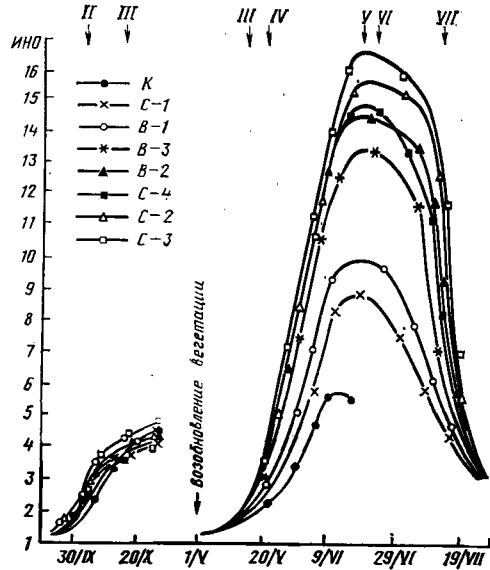
Подкормка	Слабо-окультуренная почва К	Среднеокультуренная почва				Хорошо окультуренная почва		
		С-1	С-2	С-3	С-4	В-1	В-2	В-3
1-я	0	0	45	60	22,5	0	60	22,5
2-я	0	0	45	60	22,5	0	60	22,5

Посевы обрабатывали от полегания и болезней в фазу кушения баковой смесью хлорхолинхлорида (3 кг/га), 2М-4Х (2 кг) и байлетона (0,25 кг), в фазу стеблевания — смесью хлорхолинхлорида (2 кг/га), кампозана (1 кг) и байлетона (0,25 кг). Урожай убирали комбайном «Колос». Подробно программа и методика полевых опытов изложены в предыдущих работах [4, 5].

Рассмотрим последовательно процесс вегетации озимой пшеницы по результатам фотометрических измерений на примере осредненных (пс вариантам) кривых сезонного хода ИНО $I(t)$ на рисунке.

Для осеннего периода вегетации пшеницы характерна логистическая форма кривой $I(t)$, отражающая постепенное замедление и прекращение роста растений по мере снижения температуры воздуха и почвы. Амплитуда ИНО на конец осенней вегетации I_1 (27 октября 1986 г.) и сумма ИНО ΣI_1 за период всходы — прекращение вегетации характеризуют состояние растительного покрова перед уходом в зиму.

Из табл. 2 видно, что соотношение уровней плодородия наиболее точно отражается в соотношении ΣI_1 соответствующих вариантов. В этот период между вариантами, различающимися по значениям ИНО, не наблюдалось в данных погодных условиях существенной дифференциации в накоплении надземной массы. Прежде всего это свидетельствует о том, что в первый период жизни растения интенсивно формируют корневую систему и накапливают в ней много запасных питательных веществ на зимний период. Оценивая связь показателей ИНО этого периода по коэффициентам корреляции между I_1 и ΣI_1



Сезонная динамика ИНО озимой пшеницы Мирановская 808.

1 — абсолютный контроль К; 2 — С-1; 3 — В-1; 4 — В-3; 5 — В-2; 6 — С-4; 7 — С-2; 8 — С-3.

Таблица 2

Индекс отражения и сумма ИНО за период всходы — прекращение вегетации

Показатели	К	С-1	С-2	С-3	С-4	В-1	В-2	В-3
I_1	4,60	3,89	4,13	4,61	4,01	4,87	4,53	4,53
ΣI_1	211	213	225	230	226	242	225	242
$(\Sigma I_1)_i / (\Sigma I_1)_K$	1	1,01	1,06	1,09	1,07	1,15	1,07	1,15

Матрица коэффициентов корреляции

	У	М	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I _{max}	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆
У	0	90	18	56	84	83	82	62	56	68	68	83	82
М	4	0	—	84	96	97	95	—	82	87	87	95	93
I ₁	18	—	0	55	16	—	—	—	—	—	—	—	—
I ₂	13	11	13	0	60	63	55	—	92	86	84	58	73
I ₃	6	3	18	12	0	95	98	2	59	79	81	97	94
I ₄	6	2	—	11	2	0	92	—	58	78	79	93	92
I _{max}	6	4	—	13	1	3	0	21	56	75	76	95	91
ΣI ₁	18	—	—	—	—	—	18	0	—	—	—	—	—
ΣI ₂	13	12	—	3	12	13	13	—	0	74	85	59	74
ΣI ₃	10	9	—	5	7	7	8	—	9	0	99	80	92
ΣI ₄	10	9	—	6	6	7	8	—	5	1	0	81	92
ΣI ₅	6	9	—	13	1	3	2	—	12	7	6	0	97
ΣI ₆	6	5	—	9	2	3	3	—	9	3	3	1	0

Примечание. 1. Порядок приведенных в таблице значений 10^{-2} . 2. Под диагональю матрицы приведены оценки средних квадратических отклонений соответствующих коэффициентов корреляции. 3. Условные обозначения: У — урожай зерна; М — масса надземной части растений; I₁ — значение ИНО на 27 октября 1986 г.; I₂ — на 19 мая 1987 г.; I₃ — на 19 июня; I₄ — на 24 июня; I_{max} — максимальное значение ИНО за весь период вегетации; ΣI₁ — сумма ИНО за период всходы — прекращение вегетации (27 октября 1986 г.); ΣI₂ — за период возобновление вегетации — выход в трубку; ΣI₃ — возобновление вегетации — колошение; ΣI₄ — выход в трубку — колошение; ΣI₅ — колошение — молочная спелость; ΣI₆ — сумма ИНО за весь период вегетации.

с аналогичными показателями в весенний и летний периоды вегетации, а также с урожаем (У) зерна, следует отметить (табл. 3), что в силу большого влияния условий перезимовки связь эта имеет довольно неустойчивый характер ($r_{UI_0,18 \pm 0,18}$; $r_{U\Sigma I_1,0,62 \pm 0,18}$).

Значения ИНО в межфазный период возобновление вегетации — выход в трубку (1—19 мая) прежде всего характеризуют условия перезимовки. Так, в наших опытах в вариантах В-2 и В-3 урожай был ниже, чем в варианте С-3, при одинаковой агротехнике, так как в первом случае в период перезимовки образовалась ледяная корка, вызвавшая большую изреженность посевов. При обычных приемах проведения экспериментов выделить эффект плодородия почвы в условиях неравномерного воздействия поражающих факторов было бы невозможно. Использование же данных фотометрических измерений позволяет приблизительно оценить изреженность посева, а следовательно, и ту урожайность, которую можно было бы получить при отсутствии этого явления. Например, растения в вариантах С-3 и В-2 свой рост и развитие в осенний период вегетации закончили при соотношении амплитуды ИНО $I_{1В-2}/I_{1С-3} \approx 1$. Учитывая, что эффект плодородия почвы по соотношению ИНО на 19 июня $I_{3В-1}/I_{3С-1} = 1,1$, можно предположить, что это значение соотношения, а не 0,81, установленное 17 мая, должно быть в фазу выхода в трубку. Если принять линейную модель между динамикой роста, урожайностью и ИНО, то изреженность в варианте В-2 по сравнению с вариантом С-3 была в 1,34 раза больше, а урожайность в В-2 должна быть не менее 81 ц/га.

Межфазный период выход в трубку — колошение характеризуется максимальной скоростью изменения ИНО (чувствительность биометрического фотометра позволяла в этот период зафиксировать одно-двухдневные изменения — прирост ИНО). Разные углы наклона кривых для различных вариантов свидетельствуют о том, что скорость роста ИНО в указанный период определяется уровнем питания. В начале данного периода соотношение амплитуд ИНО пропорционально урожайности.

Перегиб кривых I(t) в конце трубкования связан с началом колошения. При этом точка перегиба кривых I(t) смещается в зависимости

Сравнительные показатели ИНО для фазы колошения

Показатель	К	С-1	С-2	С-3	С-4	В-1	В-2	В-3
I_{\max}	5	8,2	16,0	16,3	14,6	9,8	14,2	13,6
$(I_{\max})_i / (I_{\max})_K$	1	1,7	3,0	3,1	2,8	1,8	2,7	2,6

от амплитуды ИНО. Это смещение, очевидно, связано с различиями в микроклиматических условиях на участках полигона, с определяемыми различиями в надземной растительной массе.

Период вегетации колошение — цветение представляет особый интерес. О его важности можно судить по высокой степени корреляции I_{\max} с урожаем зерна ($r=0,82$, $\Delta r=0,08$). Максимумы ИНО на кривых $I(t)$ в этот период являются максимумами кривых и могут служить важнейшей характеристикой агроценозов, которая определяет эффективность использования почвенно-климатических ресурсов в конкретных агрометеорологических условиях. В качестве иллюстрации в табл. 4 приведены значения I_{\max} и значения отношений максимальных ИНО во всех вариантах опыта к максимальному значению в варианте без удобрений на слабоокультуренной почве (абсолютный контроль).

Амплитуда ИНО I_{\max} может служить также критерием дозированного внесения в этот период аммиачной селитры для повышения содержания белка в зерне. Поскольку I_{\max} в этот период отражает фактическое количество надземной массы, то логично предположить, что норма аммиачной селитры в подкормку должна быть пропорциональна I_{\max} .

Ниспадающая ветка $I(t)$ связана со снижением содержания хлорофилла и созреванием озимой пшеницы. Все кривые $I(t)$ сходятся к 29 июля 1987 г. практически в одну точку (рисунок). В этот момент растения желтеют и значения ИНО определяются практически только тем зеленым фоном, который создают подгон (второе кущение), зеленая часть междоузлий и сорняки. По скорости снижения ИНО в период цветение — восковая спелость можно судить о скорости созревания культуры.

Наряду с анализом динамики дискретных значений ИНО в ходе вегетации по кривым $I(t)$ был проведен расчет суммы ИНО за отдельные периоды и всю вегетацию. Корреляция ΣI с хозяйственным урожаем, о которой можно судить по табл. 3, в большинстве случаев не хуже, чем с отдельными значениями ИНО. По сравнению с разовыми изменениями ИНО расчет его суммы более трудоемкая работа, но она позволяет получить более полную характеристику динамики агроценоза. Роль суммы ИНО особенно возрастает в условиях воздействия различных стрессовых и поражающих факторов, поскольку продолжительность постоянства амплитуды ИНО часто служит более надежным показателем урожайности, чем максимальные значения ИНО для конкретных периодов вегетации. Суммы ИНО представляют также интерес потому, что в силу хорошей корреляции между ИНО и листовым индексом они могут служить аналогом фотосинтетического потенциала посева. Причем погрешность оценки фотосинтетического потенциала по ИНО гораздо меньше, поскольку, помимо высокой репрезентативности оценок измерений, при фотометрировании фиксируется только зеленая масса (активная) растений, в то время как разделение растений на желтую и зеленую части пока не является достаточно корректной операцией. В табл. 5 приведены сопряженные результаты оценок фотосинтетического потенциала и сумм ИНО для отдельных периодов вегетации, а также коэффициенты эффективности:

$$K_{\text{ИНО}} = \Sigma I_6 / V, \quad K_{\text{ФП}} = \text{ФП} / V, \quad (i)$$

где ФП — фотосинтетический потенциал за весь период вегетации.

Фотосинтетический потенциал (тыс. м²/га·дней), сумма ИНО
и коэффициенты эффективности, урожай сырой массы и зерна (ц/га)

Дата	Показатель	С-1	С-2	С-3	С-4	В-1	В-2	В-3
20/V	ФП	63,9	146,3	211,1	132,3	75,6	129,9	128,5
	ИНО	34	46	46	44	33	37	38
14/VI	ФП	341,8	909,6	1263,4	873,5	430,9	837,1	749,0
	ИНО	198	297	305	302	185	261	278
29/VII	ФП	540,9	1377,1	1884,9	1349,8	708,1	1329,9	1173,6
	ИНО	484	804	825	774	496	694	728
27/X	ФП	—	—	—	—	—	—	—
	ИНО	106	112	115	113	121	112	121
Колоше- ние	Сырая мас- са	107	287	308	255	183	262	237
	Урожай зер- на	34,7	66,3	64,9	61,4	47,3	59,4	54,7
	К _{ФП}	15,6	20,8	29,0	22,0	15,0	22,4	21,4
	К _{ИНО}	4,52	2,80	2,62	3,04	2,71	2,65	3,08

Данные табл. 5 свидетельствуют о наличии достаточно хорошего соответствия между ФП и суммой ИНО, а также между К_{ино} и К_{ФП}. Сумма ИНО, как и I_{мах}, может, на наш взгляд, служить одной из величин, входящих в паспорт поля и характеризующих массу выноса питательных веществ.

Рассматривая общие возможности фотометрического мониторинга, следует подчеркнуть его преимущество — высокую точность оценки средних значений биометрических характеристик растительного покрова.

В настоящее время фотометрические измерения представляют собой единственный метод, который позволяет без нарушения структуры посевов получать с пространственным разрешением от 1 см до 2—3 м (в надземных условиях) характеристики пространственного распределения биометрических параметров. В описываемом опыте представительность характеристик агроценозов по ИНО была в 100 и более раз больше, чем при обычных методах наблюдений. Впервые благодаря фотометрическим измерениям была оценена пространственная неравномерность растительного покрова по ИНО. Ее вариации в отдельных вариантах (В-2 и В-3) достигли 25—40 %.

Из табл. 6 видно, что сравнительно высокой изреженности посевов в вариантах В₂ и В₃ соответствуют сравнительно большие значения коэффициентов вариации на этих участках, особенно в весенний период. Оценка вариации и пространственного распределения биометрических характеристик по ИНО дает возможность оценить корректность представления свойств агроценозов по их средним значениям и рассмотрения растительного покрова не как однородного слоя, а с учетом фактического распределения неоднородностей.

Таблица 6

Средние значения коэффициентов вариации для различных вариантов эксперимента

Дата	К	С-1	С-2	С-3	С-4	В-1	В-2	В-3
10/X	6	6	5	7	8	6	6	5
27/X	7	8	7	8	8	3	4	3
19/V	11	13	10	11	15	16	20	28
19/VI	24	9	8	8	6	7	12	16
8/VIII	10	9	9	9	10	11	12	10

Измерение сезонной динамики ИНО на примере озимой пшеницы свидетельствует о возможности использования фотометрического мониторинга и при индивидуальном управлении ходом технологических процессов на конкретном поле. Сущность управленческой задачи с использованием фотометрических измерений можно выразить следующим образом:

$$\Delta I_t = I_t^* - I_t, \quad (2)$$

где I_t^* — ИНО текущего состояния агроценоза с запрограммированным уровнем ИНО; I_t — текущее значение ИНО, соответствующее реальному состоянию агроценоза.

Согласно приведенному выражению сущность программирования урожая сводится к минимизации ΔI_t . Сравнение же эффективности планируемых и проводимых мероприятий можно проводить с помощью некоторого хозяйственно-экономического показателя, который определяется затратами на предупредительные или стимулирующие меры, приводящие к $\Delta I_t \rightarrow 0$. Особенно привлекает при этом простота формализации, постановки и машинного решения задачи.

Широкое применение фотометрических измерений посевов полевых культур позволяет оперативно, с высокой степенью достоверности оценивать биологическую и хозяйственную урожайность, выявлять и регулировать оптимальный ход формирования урожая полевых культур, выращиваемых по программируемым технологиям, вносить коррективы в технологические приемы (борьбы с сорняками и болезнями, сроки применения азотных удобрений и регуляторов роста). По результатам фотометрических измерений можно сделать выводы о возможности их использования для опытной проверки корректировки различных методик программирования урожаев, подготовки рекомендаций при программировании урожаев с использованием конкретных уровней индекса отражения, изучения вопросов эффективности агротехники, исследования микроклимата агроценозов, фенологических и биометрических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольвач В. В., Ген А. А., Конов А. Ф. Полевой спектрофотометрический комплекс. — Тр. Всесоюз. НИИСХ метерол., 1987, вып. 19, с. 65—73. — 2. Ген А. А. Экспериментальное исследование отражательных характеристик агроценозов. — Деп. в ИЦ ВНИИГМИЦД Госкомгидромета, 11.XII—86, № 590 — гм, Обнинск. — 3. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 4. Программа и методика постановки опытов и проведения исследований по программированию урожаев полевых культур / Под ред. И. С. Шатилова. — М.:

Изд-во ВАСХНИЛ, 1976. — 5. Шатилов И. С., Чаповская Г. В., Замаев А. Г. Формирование и продуктивность работы фотосинтетического аппарата с.-х. растений в севообороте. — Изв. ТСХА, 1969, вып. 6, с. 18—26. — 6. Bunnic N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation of agricultural crops in relation with morphological and optical properties. — Thesis Nedelingeu Laadbouwhogeschool. — Wegeneingen, 1978. — 7. Kamemasu E. T. — Environ, 1974, vol. 3, p. 43—47.

Статья поступила 5 декабря 1988 г.

SUMMARY

Indicator of measuring winter wheat stands was studied using biometric photometer FOM-2M. Photometry allows, in addition to biological and commercial yield, to reveal efficiently and with high reliability and to optimize the process of yield formation in farm crops raised using the practices with yield programming, and to apply corrections into technological procedures.