

А.Е. Замойский, А.Н. Солдатов

Дистанционный люминесцентный анализ растительности

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 27.12.99 г.

Показаны основные принципы и преимущества предлагаемого метода относительного люминесцентного анализа растительности. Найдены экспериментальные зависимости параметра, выражающего относительную люминесцентную составляющую, от высоты Солнца, от проективного покрытия растений, в частности для озимой ржи. Приведены формулы, по которым можно рассчитать обеспеченность сельскохозяйственных культур минеральным питанием.

Введение

Дистанционные методы исследования состояния растительности развивались в основном по двум направлениям. К первому направлению развития относится пассивное зондирование, в котором по спектральному отражению солнечной энергии от растительного покрова оцениваются его различные свойства. Этот метод широко освещен в работах П.П. Федченко, Н.Н. Выгодской и И.Н. Горшковой. Авторы учли влияние на результат исследований практически всех природных факторов: оптические свойства отдельных фитоэлементов, проективное покрытие растительного покрова, пространственную ориентацию листьев, отражательные свойства почв, высоту Солнца, влияние его прямой и рассеянной радиации. В дальнейшем появилась возможность, используя данный метод, анализировать содержание хлорофилла в растениях, физическое состояние озимых культур после перезимовки, степень их засоренности. Были попытки прогнозировать урожай сельскохозяйственных культур, используя при этом аппаратуру, разработанную специально для авиалайнеров.

Нами была проведена пробная работа в Алтайском государственном университете в 1988 г. [1]. При самолетном зондировании определялась изреженность озимой пшеницы в осенние и весенние периоды. Знание размеров площадей с плохим состоянием озимых культур было необходимо для прогноза урожая. Так, для поля с озимой пшеницей (исследуемого в нашей работе) пассивный дистанционный метод зондирования дает среднее значение площади поля, занятого растительностью, $S = 60\%$. Визуальный способ дает оценку величины площади $S = 74\%$. Среднеквадратическая погрешность определения S дистанционным методом в данном случае равна 7,3%.

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции открыл перед исследователями возможности определять в различные периоды вегетации растений их физиологическое состояние. Клетки растений обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовой и видимой частях спектра. Основные процессы жизнедеятельности клеток растений – процессы фотосинтеза и дыхания – связаны с флуоресценцией в видимой области спектра. Флуоресценция в синне-зеленой области характеризуется наличием двух основных полос излучения: первой, с максимумом в области спектра $\lambda = 440$ нм, и второй, с максимумом в области $\lambda = 525$ нм. Основными ве-

ществами, ответственными за эту область, являются восстановленные пиридиннуклеотиды и окисленные флавопротеины. Эти вещества находятся во всех без исключения клетках растений и тесно связаны с энергопроводящими системами клетки. Ответственными за красную область флуоресценции клеток растений с характерными максимумами при $\lambda = 690$ и 740 нм являются основные пигменты фотосинтеза – хлорофиллы. Флуоресценция растений в этой области спектра связана с эффективностью фотосинтетического процесса и определяется механизмами переноса световой энергии в пигментных системах [2].

Использование приемов лазерно-индуцированного метода в перспективе открывает возможность контролировать режим полива сельскохозяйственных культур, обеспеченность их минеральным питанием и влияние на них гербицидов. В работе [2] освещены некоторые результаты исследований растительности методами лазерного зондирования. Показано, что спектр люминесценции травянистых растений имеет три характерных максимума на длинах волн $\lambda = 440, 690, 740$ нм, при этом обобщение результатов исследований показало, что имеется связь интенсивностей полос с колебаниями норм минерального питания: недостаток калия увеличивает более чем втрое интенсивность флуоресценции на длинах волн $\lambda = 690$ и 740 нм по сравнению с небольшим ее ослаблением на $\lambda = 440$ нм, дефицит азота ведет к слабому уменьшению интенсивности флуоресценции на $\lambda = 440$ нм и существенному ее ослаблению (более чем в три раза) на длинах волн $\lambda = 690$ и 740 нм, недостаток фосфора ослабляет интенсивность флуоресценции на длинах волн $\lambda = 690$ и 740 нм в два раза по сравнению с незначительным уменьшением ее на длине волны $\lambda = 440$ нм.

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции растений обладает высокими возможностями качественно и рационально контролировать использование минеральных добавок. Однако этот метод требует дорогостоящих приборов и оборудования, поэтому экономически сельскому хозяйству не выгоден.

Постановка задачи

В настоящей статье предлагается использование метода относительной флуоресценции. За основу метода приняты приемы измерений пассивного дистанционного

зондирования, однако оптические каналы регистрации флуоресценции растительности заимствованы у лазерно-индуцированного метода. В качестве величины, описывающей состояние растительности, введен параметр ψ , характеризующей относительный прирост интенсивности отраженного сигнала:

$$\psi = (I_d - I_o)/I_o, \quad (1)$$

где I_d – интенсивность отраженного сигнала в области флуоресценции растений; I_o – интенсивность отраженного сигнала опорного оптического канала.

В нашем случае за опорный оптический канал принимается тот участок спектра отражения, где растения имеют минимальную интенсивность флуоресцентного сигнала. По результатам измерений это соответствует области спектра $\lambda = 550$ нм, $\Delta\lambda = 16$ нм. За информационный канал отвечает область спектра с максимумом пропускания $\lambda = 690$ нм, $\Delta\lambda = 8$ нм.

Формула (1) позволяет не только обнаружить флуоресцирующий сигнал, но и частично устранить влияние внешних факторов на результаты измерений, связанных, например, с архитектурой растительности, освещенностью и т.д.

Основное влияние на интенсивность люминесценции в нашем случае оказывает спектр солнечного излучения, так как солнечная энергия выступает в роли облучателя исследуемого объекта. Переменчивость интенсивностей спектральных линий солнечного излучения в ходе дня очевидна. Относительный метод требует учета данного фактора. Как правило, озимые культуры после перезимовки изрежены, поэтому при измерении на результат будет оказывать влияние спектр излучения от почвы.

Экспериментальная часть работы

Объектом наблюдения была выбрана озимая рожь в фазе колошения. Место исследования – Алтайский край, село Озеро-Красилово. Тип почвы – дерново-слабоподзолистая.

Рожь зондировалась с высоты 2 м линзовым шестиканальным фотометром конструкции П.П. Фед-ченко [3] в нади́р. В качестве спектральных селекторов применялись интерференционные светофильтры, имеющие максимумы пропускания на длинах волн $\lambda = 440, 550, 585, 635, 690, 1060$ нм. В качестве фотоприемника использовался фотодиод ФД-7К. Электрические сигналы фотодиода фиксировались микроамперметром М2020.

Для изучения зависимостей интенсивности спектра люминесценции от высоты Солнца были выбраны 3 участка с одинаковым проективным покрытием растительности, равным 100%. По определению – «Проективное покрытие B это величина, характеризующая проекцию фитоэлементов на горизонтальную плоскость, определяется в основном визуально по направлению в нади́р» [4]. Влияние изреженности сельскохозяйственных культур на люминесцентный сигнал изучалось на 6 участках, имеющих существенное различие в проективном покрытии. Изреженность и проективное покрытие для злаков имеют идентичные значения.

Приведенные на рис. 1 данные показывают зависимость относительной люминесцентной составляющей (ψ) от высоты Солнца (h_\odot), которая представлена в градусах и радианах.

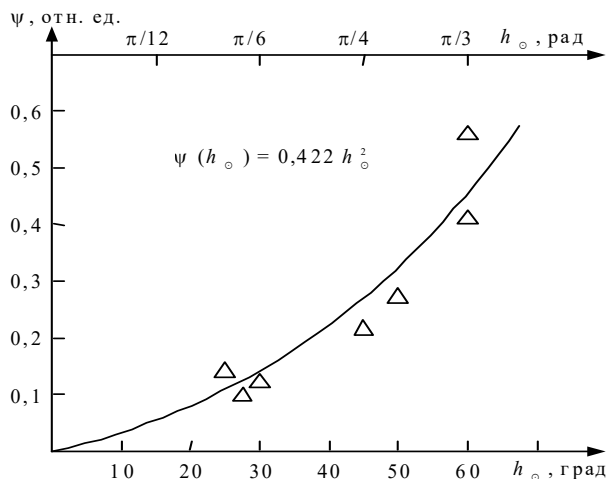


Рис. 1. Зависимость параметра ψ от высоты Солнца h_\odot : Δ – эксперимент, — — аппроксимация

На рис. 2 приведены результаты измерений зависимости относительной люминесцентной составляющей (ψ) от проективного покрытия B растительности, выраженного в процентах и относительных единицах. Высота Солнца в ходе эксперимента изменялась в пределах $56 \dots 60^\circ$.

Функцию $\psi = \psi(h_\odot)$ можно представить в следующем виде:

$$\psi(h_\odot) = ah_\odot^2, \quad (2)$$

где h_\odot – высота Солнца, выраженная в радианах; a – коэффициент, характеризующий люминесцентные свойства растения. Для озимой ржи $a = 0,422$. Относительная погрешность измерений равна 9,4%.

Зависимость параметра ψ от проективного покрытия B аппроксимируется линейной функцией:

$$\psi(B) = 0,625 B - 0,05, \quad (3)$$

где B представлено в относительных единицах. Относительная погрешность измерений 7,8%.

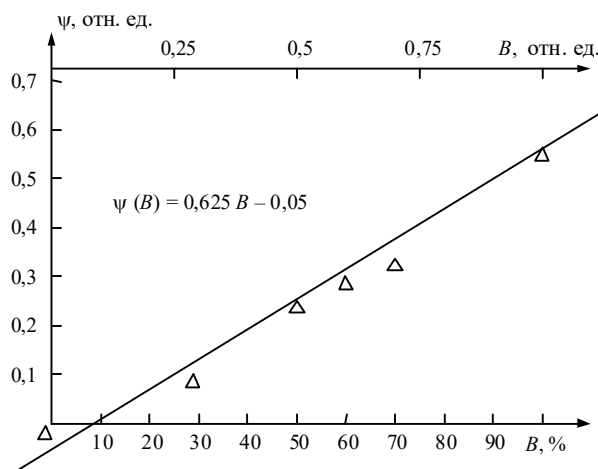


Рис. 2. Зависимость параметра (ψ) от проективного покрытия ржи B : Δ – эксперимент, — — аппроксимация

Общую зависимость ψ от B и h_{\odot} представим в виде произведения функций (2) и (3):

$$\psi(B, h_{\odot}) = \psi(B) \psi(h_{\odot}). \quad (4)$$

Для озимой ржи функция (4) будет иметь следующий вид:

$$\psi(B, h_{\odot}) = 0,422h_{\odot}^2 (0,625B - 0,05). \quad (5)$$

Функция (5) определена для случая, когда рожь находилась в нормальном физиологическом состоянии. Содержание азота, окиси фосфора, окиси калия (N : P₂O₅ : K₂O) соответствовало 1,3 : 0,6 : 2,4% в сухом веществе, что соответствует оптимальному ржи в фазе колошения.

При недостатке или избытке минерального питания значения параметра будут колебаться. Учтем влияние минерального питания параметром η , тогда

$$\frac{I_{690} - I_{550}}{I_{550}} = \eta a h_{\odot}^2 (0,625B - 0,05).$$

Для каждого типа растений и химических элементов его корневого питания η имеет различное значение. В общем случае η есть функция отклонения ΔC химического элемента корневого питания в растительных клетках от нормы:

$$\eta = \eta(\Delta C).$$

A.E. Zamoyskii, A.N. Soldatov. Relative Luminescent Analysis of Vegetation.

In this paper the main principles of the proposed method of relative luminescent analysis are described. Experimental dependence of relative luminescent component on the Sun height and vegetation projective coverage, for the winter rye, in particular, are shown. Formulae for calculation of agricultural plants adequate provision with fertilizers are found.

Связь отклонения концентрации вещества ΔC с флуоресцентным сигналом выразим в следующем виде:

$$\eta = k\Delta C,$$

где k – коэффициент, имеющий смысл биологического эквивалента, связывающего концентрацию вещества с его способностью индуцировать излучение в области длин волн $\lambda = 690$ нм.

Выводы

1. Для проведения люминесцентного анализа растений в натуральных условиях получены формулы, учитывающие влияние на результат измерений высоты Солнца и проективного покрытия растительности.

2. Определена математическая модель, связывающая концентрацию питательных веществ в клетках растения с его способностью индуцировать излучение в видимой области света.

1. Андрухова Т.В., Букатый В.И., Замойский А.Е. // Тезисы докладов к научно-практической конференции. Барнаул: ВНИЦ АИУС АГРОРЕСУРСЫ, 1989. С. 23.
2. Кондратьев К.Я., Каневский В. Лазерное дистанционное зондирование растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 168 с.
3. Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 231 с.
4. Выгодская Н.Н., Горшкова И.И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 58.