

МЕТОД ОЦЕНКИ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ ЛИСТА ПШЕНИЦЫ ПО СПЕКТРУ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ

¹Николаев С.В., ²Урбанович Е.А., ³Шаяпов В.Р., ¹Орлова Е.А., ¹Афонников Д.А.

¹Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия

³Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

Для цитирования: Николаев С.В., Урбанович Е.А., Шаяпов В.Р., Орлова Е.А., Афонников Д.А. Метод оценки спектра поглощения листа пшеницы по спектру диффузного отражения // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т 48. № 5. С.68–76. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-5-9

For citation: Nikolaev S.V., Urbanovich E.A., Shayapov V.R., Orlova E.A., Afonnikov D.A. Metod otsenki spectra pogloshchenia lista pshenitsy po spektru diffusnogo otrazheniya [A method of evaluating the absorption spectrum of wheat leaf by the spectrum of diffuse reflection]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2018, vol. 48, no. 5, pp. 68–76. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-5-9

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

Для оценки состояния растений в ходе нормального роста и при развитии инфекций широко применяют методы спектрального анализа. В сочетании с математическими методами распознавания образов из спектров отражения конструируют информативные индексы, которые различаются для растений в разных изучаемых физиологических (и патофизиологических) состояниях. Такой подход предполагает настройку индексов для конкретных разделяемых состояний. Информация о содержании пигментов является более универсальной, позволяющей судить о состоянии растения на основе физиологических представлений независимо от решаемой задачи. В последнее время для получения информации о содержании пигментов развиваются методы отражательной спектроскопии. По спектру диффузного отражения производится оценка спектра поглощения на основе модели распространения света в дисперсной среде. Одной из моделей такого типа является модель Кубелки – Мунка. В случае большой оптической толщины образца, когда поток, проходящий через образец, на вы-

A METHOD OF EVALUATING THE ABSORPTION SPECTRUM OF WHEAT LEAF BY THE SPECTRUM OF DIFFUSE REFLECTION

¹Nikolaev S.V., ²Urbanovich E.A.,

³Shayapov V.R., ²Orlova E.A., ¹Afonnikov D.A.

¹The Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia

³Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russia

Spectral analysis methods are widely used to assess the condition of plants during normal growth and the development of infections. In combination with mathematical methods of pattern recognition from reflection spectra, different indices are constructed, which vary for plants in different studied physiological (and pathophysiological) states. This approach involves setting up indices for specific shared states. Information about the content of pigments is more universal, and allows to talk about the state of the plant on the basis of physiological concepts, regardless of the task being solved. Methods of reflective spectroscopy have recently been developed to obtain information about the content of pigments. The absorption spectrum is estimated from the diffuse reflection spectrum based on the light propagation model in a disperse medium. One of the models of this type is the model Kubelka-Munch. In the case of the large optical thickness of the sample,

ходе практически равен нулю, можно применять упрощенную формулу, в которую не входит толщина образца. В остальных случаях необходимо эту толщину измерять, что для таких биологических объектов, как лист растения, проблематично из-за сложного рельефа листа. Приведены метод измерения и результаты изучения применимости формулы Кубелки – Мунка для получения спектров поглощения из спектров отражения листа пшеницы без измерения его толщины. Выведена формула для вычисления функции Кубелки – Мунка (отношения коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния) по двум измерениям коэффициентов диффузного рассеяния от образца, которые производятся с двумя подложками – с поглощающей и отражающей. Метод позволяет вычислить отношение коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния без измерения толщины исследуемого образца. Данный показатель можно использовать в качестве оценки спектра поглощения с некоторым коэффициентом пропорциональности. Описанный метод можно рекомендовать как наиболее универсальный и точный для определения отношения коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния листа в лабораторных условиях.

Ключевые слова: пшеница, грибная инфекция, спектральный анализ листьев, спектр диффузного отражения

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развиваются методы мониторинга посевов с целью прогнозирования динамики и планирования агротехнологических мероприятий для управления состоянием растений [1–3]. Для осуществления такого планирования разрабатывают и применяют модели нормальных и патологических процессов в растениях и посевах [4, 5]. Широкое внедрение динамического управления состоянием посевов требует развития технологии адаптации этих моделей в каждом конкретном случае, например, при мониторинге грибной инфекции в посевах и планировании мероприятий по борьбе с инфекцией.

Оптические (в том числе спектральные) методы измерений удовлетворяют требованиям их стандартизации и технологичности. Спектры отражения, полученные в полевых или в лабораторных условиях,

when the flow passing through the sample at the output is almost zero, one can use a simplified formula, which does not include the thickness of the sample. In other cases, it is necessary to measure this thickness, which is problematic for such biological objects as a plant leaf, because of the complex relief of the leaf surface. The article presents the measurement method and results of studying the applicability of the formula Kubelka-Munch for obtaining absorption spectra from reflection spectra of a wheat leaf without measuring its thickness. The formula is derived for calculation of Kubelka-Munch function (ratio of the absorption coefficient to the diffusion coefficient) by two measurements of diffusion scattering coefficients from the sample, which are performed with absorbing and reflecting substrates. The method allows to calculate the ratio of the absorption coefficient to the diffusion coefficient without measuring the thickness of the sample under study. This index can be used as an assessment criteria of the absorption spectrum with some proportionality factor. It is possible to recommend the method described as the most valid and accurate one for the determination of the absorption coefficient to the diffusion coefficient ratio of a leaf in the laboratory conditions.

Keywords: wheat, fungal infection, spectral analysis of leaves, diffuse reflection spectrum.

используют для распознавания стадий развития грибной инфекции в посевах пшеницы [2]. В основе такого применения лежат выделение дескрипторов из спектральных данных и построение решающих функций методами распознавания образов [6–8]. В то же время механистические модели развития гриба (например, ржавчины) на листе могут потребовать детальных экспериментальных данных по изменению состояния клеток растения, которое проявляется, например, в виде пятен хлороза. Эти и другие изменения в состоянии клеток сопряжены с изменением состава пигментов в локальных областях листа [9, 10].

Для получения локальных спектральных характеристик листовой пластинки можно применять многоканальную или гиперспектральную съемку [11]. Однако для извлечения данных о спектрах поглощения ткани листовой пластинки (которые дают инфор-

мацию о химическом составе среды) необходимо применить модельные представления о происхождении детектируемого прибором диффузно рассеянного от листа излучения. Одной из ранних теорий рассеяния света является модель Кубелки – Мунка [12], которая используется как в исходной форме, так и в виде модификаций [13–15].

Цель исследования – разработать метод применения модели Кубелки – Мунка для расчета спектра поглощения материала образца произвольной толщины без измерения его толщины.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Растения пшеницы сорта Родина выращивались при естественном освещении в культуральных сосудах при температуре 18–23 °С в течение 15 дней. Непосредственно перед измерением вырезали фрагмент длиной 0,5–0,7 см на расстоянии 3–4 см от начала листовой пластинки.

Модель Кубелки – Мунка. Рассмотрим систему, состоящую из дисперсионной среды высотой X с пигментными частицами, в которой распространяется электромагнитная волна, падающая на верхнюю границу, и подложки с коэффициентом отражения



Рис. 1. Схема к математической модели Кубелки – Мунка:

j, i – световые потоки по оси ox и против оси ox соответственно

Fig. 1. Scheme to the mathematical model Kubelka-Munch:

j, i – light flows along the axis ox and against the axis ox , respectively

R_g (см. рис. 1). Предположим, что действие пигментных красителей приводит к полному рассеянию светового потока. Пусть толщина $X < l, w$, где l, w – характерные длина и ширина среды, тогда мы можем пренебречь краевыми эффектами. В таких предположениях можем представить весь световой поток, распространяющийся в светорассеивающем слое, двумя перпендикулярными к границам составляющими: i – распространяющаяся против оси ox , и j – по оси ox .

Рассмотрим в среде элементарный слой толщиной dx . Пусть K – коэффициент поглощения в элементарном объеме, S – коэффициент рассеяния. K и S будем считать постоянными во всем объеме. Следующие дифференциальные уравнения на изменение потоков i и j в элементарном слое можем записать [16]:

$$dj = -(S + K) \cdot j \cdot dx + S \cdot i \cdot dx;$$

$$-di = -(S + K) \cdot i \cdot dx + S \cdot j \cdot dx.$$

Кубелка [17] получил точное решение данной линейной системы уравнений с граничным условием $\frac{j(0)}{i(0)} = R_g$:

$$R(x) = \frac{1 - R_g \cdot (a - b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot x))}{a - R_g + b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot x)}, \quad (1)$$

где $R(x) = \frac{j(x)}{i(x)}$ – коэффициент отражения на расстоянии x от подложки;

$$a = 1 + \frac{K}{S}, \quad b = \sqrt{a^2 - 1}.$$

В случае, когда толщина среды стремится к бесконечности (приближение толстой среды), уравнение (1) приобретает вид

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 \cdot R_\infty}, \quad (2)$$

где R_∞ – коэффициент отражения средой при достаточно большой толщине слоя.

Методика измерений для оценки величины $\frac{K}{S}$ листа. Для вычисления $\frac{K}{S}$ листа проводили измерения двух спектров отражения от листа, помещаемого сначала

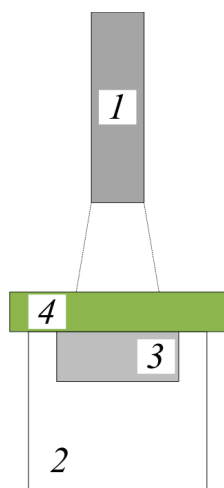


Рис. 2. Схема экспериментальной установки
Fig. 2. Scheme of the trial installation

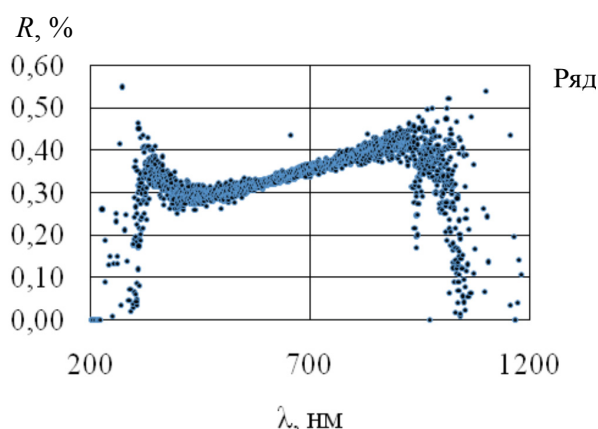


Рис. 3. Спектр отражения порошка
из углеродного материала
Fig. 3. Reflection spectrum of the powder
from the carbon-base material

на отражающую, затем на поглощающую подложку. Экспериментальная установка (см. рис. 2) состоит из зонда отражения / обратного рассеяния 1, расположенного над кюветой 2, в которой находятся подложка 3 и листовая пластинка 4. В торце зонда 1 по окружности расположены шесть оптоволокон, соединенных с осветителем, состоящим из галогеновой и дейтериевой ламп. В центре торца зонда – оптоволоконно, идущее к спектрометру «Колибри-2» (ВМК «Оптоэлектроника», Россия). Выходной спектр записывается на ПК. Для калибровки использовали уплотненный порошок

сульфата бария (BaSO_4), обладающий 98%-м диффузионным отражением в видимом диапазоне. Его же использовали в качестве абсолютно отражающей подложки. В качестве абсолютно поглощающей подложки взяли уплотненный порошок из углеродного материала (УМ). Диффузное отражение данного порошка не превышает 0,5% (см. рис. 3). Можно считать, что $R_g = 0$ для УМ с вносимой погрешностью 0,5%. Полученные спектры диффузного отражения использовали для вычисления $\frac{K}{S}$ листа по формуле, вывод которой рассмотрен ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формула для оценки спектра поглощения тонкой среды без измерений ее толщины. По описанной выше методике измерим два значения коэффициентов отражения R_1 и R_2 на верхней границе ($x = X$), соответствующие разным подложкам с коэффициентами отражения R_{g1} и R_{g2} . Получим систему двух линейных уравнений:

$$R_1 = \frac{1 - R_{g1}(a - b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot X))}{a - R_{g1} + b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot X)},$$

$$R_2 = \frac{1 - R_{g2}(a - b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot X))}{a - R_{g2} + b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot X)}.$$

Выразив $b \cdot \text{cth}(b \cdot S \cdot X)$ из первого уравнения и подставив во второе, придем в итоге к уравнению

$$\frac{K}{S} = \frac{(R_1 - R_2)(1 + R_{g1} \cdot R_{g2}) + (1 + R_1 \cdot R_2)(R_{g2} - R_{g1})}{2 \cdot (R_1 \cdot R_{g2} - R_2 \cdot R_{g1})} - 1, \quad (3)$$

в котором не используется никаких допущений, кроме применимости формулы (1).

Поскольку в первом измерении $R_{g1} = 0$ – абсолютно поглощающая подложка, во втором $R_{g2} = 1$ – абсолютно отражающая подложка, формула (3) принимает вид

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_1) \cdot (1 - R_2)}{2 \cdot R_1}. \quad (4)$$

Для применения формулы (4) необходимо соблюдения следующие условия измерений при разных подложках: 1) спектр должен

сниматься с одной и той же области листа; 2) расстояние от зонда до листа должно оставаться постоянным.

Следует отметить, что формулы (2) и (4) позволяют вычислить отношение коэффициента поглощения K к коэффициенту рассеяния S , которое называется функцией Кубелки – Мунка. При условии независимости S от длины волны функция Кубелки – Мунка пропорциональна спектру поглощения. Условие независимости S от длины волны выполняется, когда размер рассеивающих частиц значительно превышает длину волны (обсуждение этого вопроса можно найти в работе [18]).

Сравнение оценок спектров отражения / поглощения листа пшеницы, полученных разными методами. Поскольку условия 1 и 2 для применения формулы (4) сложно осуществить в измерительном эксперименте при смене подложек, изучены погрешности, вносимые в оценку функции Кубелки – Мунка по формуле (2) при использовании черной подложки и «свободного образца», когда образец не лежит на подложке. Последнее близко к ситуации дистанционного зондирования листа в посеве. Измерения спектров отражения листа проводили по следующей схеме: три измерения с черной подложкой, три – с белой и

три измерения «свободного листа», когда лист закреплялся на расстоянии 10 см над столом. При этом расстояние до зонда такое же, как при измерении с подложками. На рис. 4 приведены усредненные коэффициенты отражения для данных измерений. Спектры отражения листа с черной подложкой (серая линия) и без подложки, т.е. «свободного листа» (синяя линия), совпадают, что естественно, так как прошедший сквозь лист свет рассеивается и поглощается окружающими телами.

Затем вычисляли функцию $\frac{K}{S}$ (см. рис. 5) по спектрам диффузного отражения от листа с поглощающей подложкой (черная, УМ) и отражающей (белая, BaSO_4): a (серая линия) – функция, посчитанная по спектрам с черной и белой подложками по формуле (4); b (черная) – по спектру с черной подложкой по формуле (2); v (синяя) – по спектру с белой подложкой по формуле (2). Видно, что оценка спектра поглощения листа, рассчитанная по формуле (2) из спектра отражения с поглощающей подложкой, дает хорошее совпадение с оценкой по формуле (4), в то время как оценка спектра поглощения с отражающей подложкой дает существенное расхождение. Относительные величины этих отклонений приведены на рис. 6.

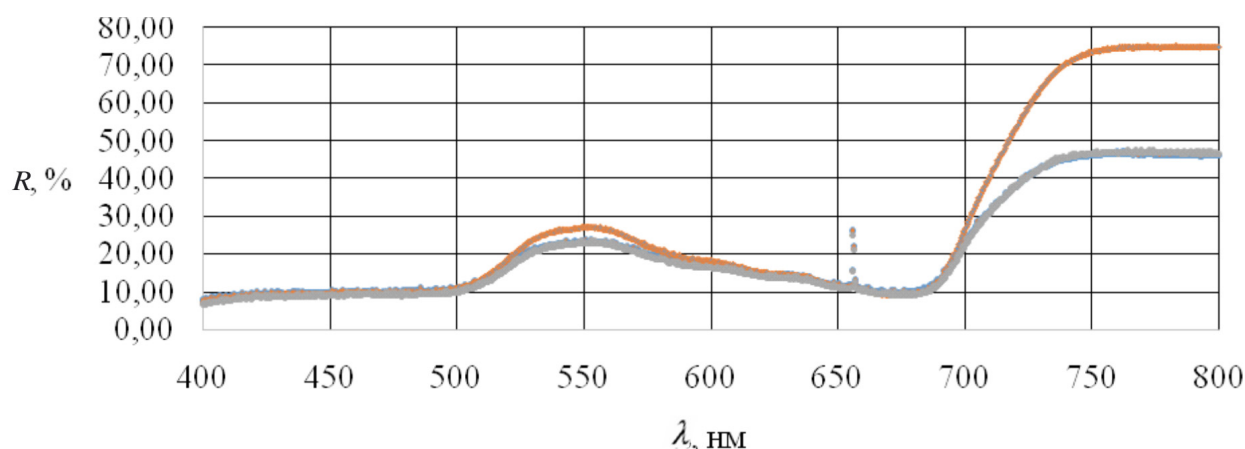


Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузного отражения листа растения от длины волны: Серая линия – с черной подложкой, синяя – отражение листа без подложки, оранжевая – с белой подложкой

Fig. 4. Dependence of the coefficient of a plant leaf diffuse reflection on the wavelength
Grey line – with black substrate; blue line – leaf reflection without substrate; orange line – with white substrate

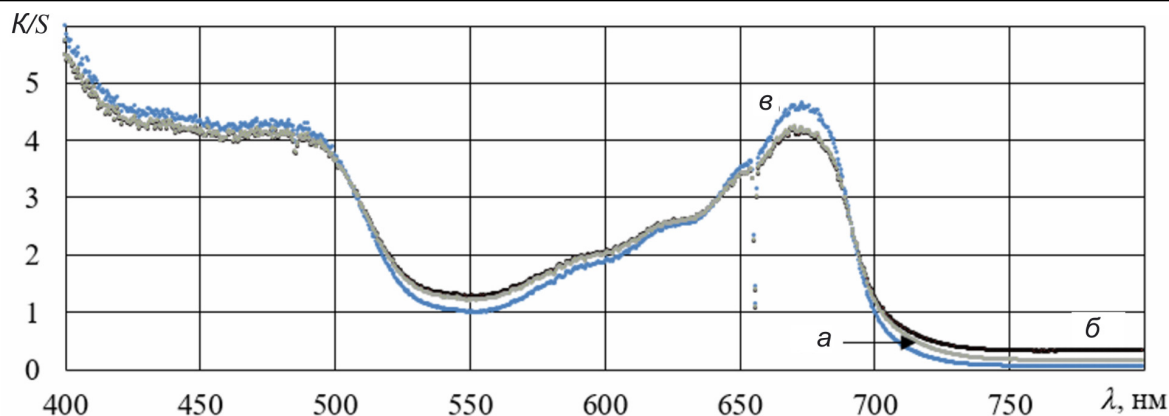


Рис. 5. Функция $\frac{K}{S}$ для листа растения:

a – по спектрам с черной и белой подложками по формуле (4);
 $б$ – по спектру с черной подложкой по формуле (2); $в$ – по спектру с белой подложкой по формуле (2)

Fig. 5. Function $\frac{K}{S}$ for a plant leaf:

a – across spectra with black and white substrates by formula (4); $б$ – across spectrum with black substrate by formula (2); $в$ – across spectrum with white substrate by formula (2)

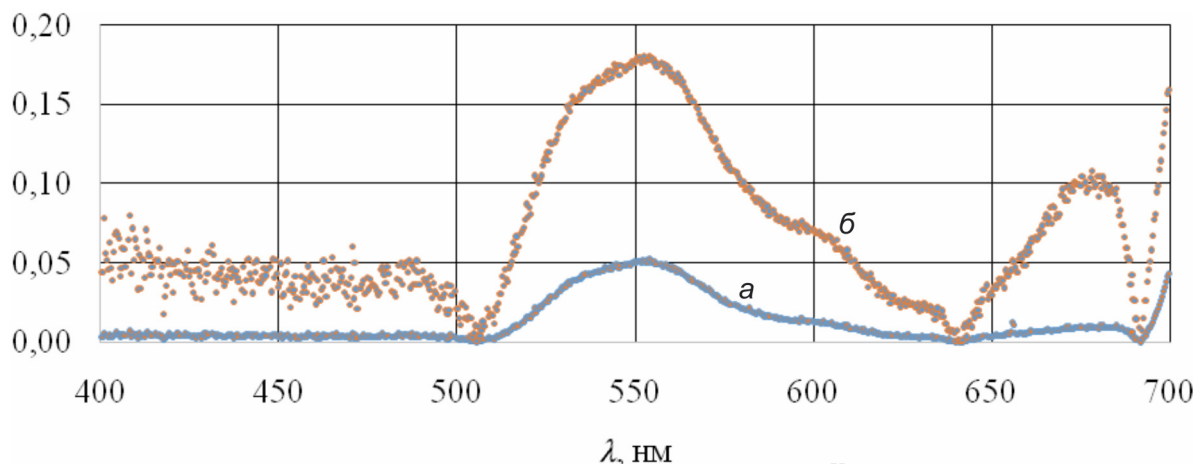


Рис. 6. Спектры относительного отклонения оценки $\frac{K}{S}$ по формуле (2)
от оценки по формуле (4) для листа растения:
 a – черная подложка; $б$ – белая

Fig. 6. Spectra of relative deviation of assessment $\frac{K}{S}$ by formula (2)
from the assessment by formula (4) for a leaf plant:
 a – black substrate e; $б$ – white substrat

ВЫВОДЫ

Выведена формула (4) для вычисления функции Кубелки – Мунка (отношения коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния $\frac{K}{S}$) по двум измерениям коэффициентов диффузного рассеяния от образца, которые производятся с двумя разными подложками – одно с поглощающей, другое с отражающей. Метод позволяет вычислить $\frac{K}{S}$ без измерения толщины исследуемого

образца. Величина $\frac{K}{S}$ может использоваться как оценка спектра поглощения с некоторым коэффициентом пропорциональности. Данный метод можно рекомендовать как наиболее универсальный и точный для определения величины $\frac{K}{S}$ листа в лабораторных условиях.

Спектрофотометрические исследования листа на белой подложке вносят существенную погрешность в спектры диффузного отражения и, как следствие, в величину

$\frac{K}{S}$. Погрешность, связанная с проникновением в измеренный сигнал излучения, отраженного от любой подложки, всегда будет иметь место, поэтому измерения, проведенные без учета отражательных свойств подложки, будут некорректными. Вычисления $\frac{K}{S}$ для листа пшеницы по упрощенной процедуре с использованием формулы (2) дают удовлетворительный результат при использовании поглощающей подложки или геометрии «свободного листа» (расхождения в видимом диапазоне длин волн от 400 до 700 нм составили менее 5%). Этот факт позволяет применять различные модификации геометрии «свободного листа» при получении спектров диффузного отражения непосредственно в посеве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bajwa S.G., Rupe J.C., Mason J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. N 2. P. 127.
2. Bravo C., Moshou D., West J., McCartney A., Ramon H. Early Disease Detection in Wheat Fields Using Spectral Reflectance // Biosystems Engineering. 2003. Vol. 84. N 2. P. 137–145.
3. Pan Z., Li X., Yang X.B., Andrade D., Xue L., McKinney N. Prediction of Plant Diseases through Modelling and Monitoring Airborne Pathogen Dispersal // Plant Sciences Reviews. 2010. CABI 191.
4. Audsley E., Milne A., Paveley N. A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems // Annals of Applied Biology. 2005. Vol. 147. N 2. P. 161–172.
5. Торнли Д.Г.М. Математические модели в физиологии растений. Киев: Наукова думка, 1982.
6. Mahlein A.K., Rumpf T., Welke P., Dehne H.W., Plumer L., Steiner U., Oerke E.C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 128. P. 21–30.
7. Ashourloo D., Mobasheri M.R., Huete A. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*) // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. N 6. P. 4723–4740.
8. Chemura A., Mutanga O., Sibanda M., Chidoko P. Machine learning prediction of coffee rust severity on leaves using spectroradiometer data // Tropical Plant Pathology. 2018. Vol. 43. N 2. P. 117–127.
9. Khan A.J., Deadman M.L., Al-Maqbali Y.M., Al-Sabahi J., Srikanthakumar A., Rizvi S.G. Biochemical changes in sorghum leaves infected with leaf spot pathogen, *Drechslera sorghicola* // The Plant Pathology Journal. 2001. Vol. 17. N 6. P. 342–346.
10. Robert C., Bancal M.O., Ney B., Lannou C. Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status // New Phytologist. 2005. Vol. 165. N 1. P. 227–241.
11. Bauriegel E., Giebel A., Geyer M., Schmidt U., Herppich W.B. Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging // Computers and Electronics in Agriculture. 2011. Vol. 75. N 2. P. 304–312.
12. Kubelka P., Munk F. An article on optics of paint layers // Zeitschrift für Technische Physik. 1931. Vol. 12. P. 593–601.
13. Al Makdessi N., Jean P.A., Ecartot M., Gorretta N., Rabatel G., Roumet P. How plant structure impacts the biochemical leaf traits assessment from in-field hyperspectral images: A simulation study based on light propagation modeling in 3D virtual wheat scenes // Field Crops Research. 2017. Vol. 205. P. 95–105.
14. Xu K., Lin Y., Wei X., Ye H. Biomimetic Material Simulating Solar Spectrum Reflection Characteristics of Yellow Leaf // Journal of Bionic Engineering. 2018. Vol. 15. N 4. P. 741–750.
15. Al Makdessi N., Ecartot M., Roumet P., Rabatel G. A spectral correction method for multi-scattering effects in close range hyperspectral imagery of vegetation scenes: application to nitrogen content assessment in wheat // Precision Agriculture. 2018. P. 1–23.
16. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике / пер. с англ. М: Мир, 1978. 592 с.
17. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I // Josa. 1948. Vol. 38. N 5. P. 448–457.
18. Torrent J.O.S.É., Barron V. Diffuse reflectance spectroscopy // Methods of soil analysis. 2008. Part 5. P. 367–387.

REFERENCES

1. Bajwa S.G., Rupe J.C., Mason J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. *Remote Sensin*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 127.
2. Bravo C., Moshou D., West J., McCartney A., Ramon H. Early Disease Detection in Wheat Fields Using Spectral Reflectance. *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 84, no. 2, pp. 137–145.
3. Pan Z., Li X., Yang X.B., Andrade D., Xue L., McKinney N. Prediction of Plant Diseases through Modelling and Monitoring Airborne Pathogen Dispersal. *Plant Sciences Reviews*, 2010. CABI 191.
4. Audsley E., Milne A., Paveley N. A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems / *Annals of Applied Biology*. 2005, vol. 147, no. 2, pp. 161–172.
5. Tornli D.G.M. Matematicheskie modeli v fiziologii rastenii [Mathematical models in plant physiology]. Kiev: Naukova dumka [Scientific thought], 1982.
6. Mahlein A.K., Rumpf T., Welke P., Dehne H. W., Plumer L., Steiner U., Oerke E.C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 2013, vol. 128, pp. 21–30.
7. Ashourloo D., Mobasheri M.R., Huete A. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*). *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 4723–4740.
8. Chemura A., Mutanga O., Sibanda M., Chidoko P. Machine learning prediction of coffee rust severity on leaves using spectroradiometer data. *Tropical Plant Pathology*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 117–127.
9. Khan A.J., Deadman M.L., Al-Maqbali Y.M., Al-Sabahi J., Srikandakumar A., Rizvi S.G. Biochemical changes in sorghum leaves infected with leaf spot pathogen, *Drechslera sorghicola*. *The Plant Pathology Journal*, 2001, vol. 17, no. 6, pp. 342–346.
10. Robert C., Bancal M.O., Ney B., Lannou C. Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status. *New Phytologist*, 2005, vol. 165, no. 1, pp. 227–241.
11. Bauriegel E., Giebel A., Geyer M., Schmidt U., Herppich W.B. Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, vol. 75, no. 2, pp. 304–312.
12. Kubelka P., Munk F. An article on optics of paint layers. *Zeitschrift für Technische Physik*, 1931, vol. 12, pp. 593–601.
13. Al Makdessi N., Jean P.A., Ecartot M., Gorretta N., Rabatel G., Roumet P. How plant structure impacts the biochemical leaf traits assessment from in-field hyperspectral images: A simulation study based on light propagation modeling in 3D virtual wheat scenes. *Field Crops Research*, 2017, vol. 205, pp. 95–105.
14. Xu K., Lin Y., Wei X., Ye H. Biomimetic Material Simulating Solar Spectrum Reflection Characteristics of Yellow Leaf. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 741–750.
15. Al Makdessi N., Ecartot M., Roumet P., Rabatel G. A spectral correction method for multi-scattering effects in close range hyperspectral imagery of vegetation scenes: application to nitrogen content assessment in wheat. *Precision Agriculture*, 2018, pp. 1–23.
16. Dzhabd D., Vyshetski G. *Tsvet v nauke i tekhnike* [Blossom in science and engineering]. per. s angl. M: Mir, 1978. 592 p.
17. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I // *Josa*, 1948, vol. 38, no. 5, pp. 448–457.
18. Torrent J.O.S.E., Barron V. Diffuse reflectance spectroscopy. *Methods of soil analysis*, 2008, part 5. pp. 367–387.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаев С.В., кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук

Урбанович Е.А., студент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Шаяпов В.Р., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук

Орлова Е.А., ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук

✉ **Афонников Д.А.**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук; **адрес для переписки:** Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 10, e-mail: ada@bionet.nsc.ru

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. по проекту «Разработка цифровых технологий раннего обнаружения и локализации поражений посевов сельскохозяйственных культур № 324-2018-0020».

AUTHOR INFORMATION

Nikolaev S.V., Candidate of Science in Biology, Researcher of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Urbanovich E.A., student of the Novosibirsk State University

Shayapov V.R., Candidate of Science in Physics and Maths, Researcher of the Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Orlova E.A., Lead Researcher of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

✉ **Afonnikov D.A.**, Candidate of Science in Biology, Lead Researcher of the Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, address: 10, Academician M.A. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia; e-mail: ada@bionet.nsc.ru

*Дата поступления статьи 05.08.2018
Received by the editors 05.08.2018*