

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА И УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО ХЛОРОФИЛЛЬНОМУ ПОТЕНЦИАЛУ

© 2017 г. А.Ф. Сидько, И.Ю. Ботвич, Т.И. Письман, А.П. Шевырнов

Институт биофизики Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН»,
660036, Красноярск, Академгородок, 50/50

E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.16 г.

Представлены результаты оценки связи между содержанием хлорофилла, урожайностью и хлорофилльным потенциалом посевов пшеницы, ячменя и овса. Для этого использованы результаты наземного дистанционного зондирования и лабораторные данные. Для расчета хлорофилльного потенциала использованы спектры яркости посевов на территории Красноярского края, полученные при наземном дистанционном зондировании. Многолетние исследования проведены в различные сезоны, при разных условиях освещения. Спектральные измерения получены с использованием двухлучевого спектрорадиометра, установленного на подвижной рабочей платформе на высоте от 5 до 18 м. Показана хорошая корреляция между содержанием хлорофилла, урожайностью и хлорофилльным потенциалом посевов пшеницы, ячменя и овса. Также показано, что величина хлорофилльного потенциала различна для разных сортов пшеницы, ячменя и овса в течение вегетационного сезона.

Ключевые слова: спектральная яркость, хлорофилльный потенциал, хлорофилл, урожайность.

В настоящее время актуальным является применение дистанционного зондирования для мониторинга сельскохозяйственных культур [1–3]. Одним из перспективных направлений развития оптических дистанционных методов исследования посевов сельскохозяйственных культур являются разработки экспресс-методов оценки физиологических параметров растений в течение вегетационного сезона [4–6]. Наиболее удобной оптической характеристикой, позволяющей идентифицировать оптические свойства растительных ценозов, является их спектральная яркость [1,6]. Спектральная яркость посевов несет в себе значительный объем информации о физиологическом состоянии растений. Существенные изменения спектров яркости посевов в течение вегетационного периода связаны с процессом накопления и разрушения фитопигментов, структурными изменениями и видовым составом растений. Именно концентрация фитопигментов в наибольшей степени определяет динамику спектральной яркости растительности в области фотосинтетически активной радиации в диапазоне $\lambda = 380\text{--}750$ нм [6]. Наибольший вклад в формирование спектрального портрета растительного покрова вносят зеленые пигменты – хлорофиллы. Отсюда следует, что оценка связей между содержанием хлорофилла и значениями коэффициента спектральной яркости растительного покрова имеет практическое зна-

чение для развития методов дистанционного зондирования [3,5].

Чувствительным индикатором, характеризующим физиологическое состояние и биологическую продуктивность растений при дистанционном исследовании полей, являются вегетационные индексы. Наиболее известным и распространенным является нормализованный разностный индекс растительности NDVI [7]. Вегетационные индексы в основном рассчитываются с использованием отражательной способности растений на двух длинах волн. Поэтому использование этих вегетационных индексов не всегда дает возможность получить точные данные о содержании хлорофилла в листьях посевов и о приросте биомассы растений в период их активной вегетации. Следовательно, следует развивать новые методы дистанционных измерений, позволяющие получать более точную информацию о физиологическом состоянии растений. Сдерживающим фактором в их развитии является отсутствие экспериментального материала, полученного в полевых условиях в течение вегетационного сезона.

Целью данного исследования является оценка связи хлорофилльного потенциала посевов пшеницы, ячменя и овса с содержанием хлорофилла и урожайностью. Для расчета хлорофилльного потенциала использованы спектры яркости посевов на территории Красноярского

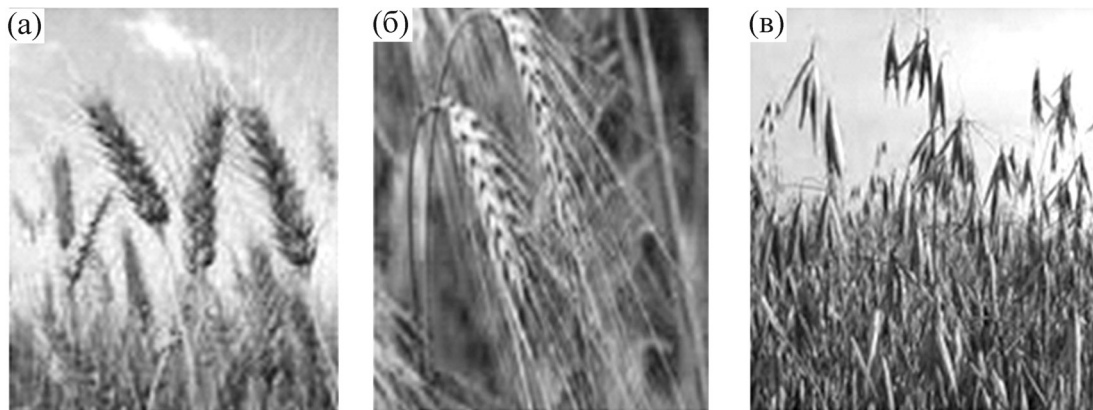


Рис. 1. Исследуемые посевы: (а) – пшеница, (б) – ячмень, (в) – овес.

края, полученные при наземном дистанционном зондировании.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами полевых исследований являлись посевы пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорт Равнина, ячменя (*Hordeum distichon*) и овса (*Owena sativa* L.) (рис. 1).

Данные сельскохозяйственные культуры наиболее распространены на территории Красноярского края. На начальной стадии и в середине вегетации эти культуры мало различимы по спектральной яркости. Различия наступают в стадии колошения. Площади исследуемых опытных участков составляли 200–600 м², производственных полей – от 200 га и выше. Ежегодно исследования проводили на 10–12 опытных полях с различной степенью предпосевной обработки растений и с различным количеством внесенных минеральных удобрений в почву на 1 м². Измеряемые участки располагались достаточно близко друг от друга, т.е. в одинаковых климатических условиях. Работы велись на протяжении 12 лет.

Регистрацию спектров яркости посевов проводили с использованием автовышки с высоты от 10 до 18 м в ясную безоблачную погоду с помощью двухлучевого спектрофотометра ПДСФ собственной разработки [8,9]. Регистрировали дифференциальные спектры яркости исследуемого объекта и эталонной поверхности. Скорость сканирования в спектральном диапазоне 400–850 нм составляла 60 с [10,11]. Площадь фотометрируемого прибором участка изменялась от 0,5 до 2 м², измерения проводили, как правило, в надири. Интервал регистрации спектров посевов составлял двое–четверо суток.

На основе спектров яркости предложен оптический метод определения хлорофилльного

потенциала $S(t)$ [11]. Данный параметр наиболее полно отражает взаимосвязь спектральной яркости посевов в период вегетации с физиологическими параметрами растений. Величина параметра $S(t)$ определяется равенством:

$$S(t) = 90(\rho_{730}(t) + \rho_{550}(t)) - \int_{550}^{730} \rho(\lambda, t) d\lambda, \quad (1)$$

где 90 – множитель, равный полуширине полосы поглощения хлорофилла от 550 до 730 нм, ρ_{550} и ρ_{730} – средние значения спектральных коэффициентов яркости посева при $\lambda = 550$ и $\lambda = 730$ нм [8,9].

Для оценки урожайности сельскохозяйственных культур в конце вегетационного сезона использовался суммарный хлорофилльный потенциал:

$$\Sigma S(t) = \int_{t_0}^t \left[90(\rho_{730}(t) + \rho_{550}(t)) - \int_{550}^{730} \rho(\lambda, t) d\lambda \right] dt, \quad (2)$$

где dt – время суммирования $S(t)$ [8,9].

Концентрацию общего хлорофилла в листьях растений определяли стандартным спектрофотометрическим методом [12]. Определение концентрации хлорофилла проводили регулярно через пять–восемь суток на протяжении вегетационного периода растений (60–90 сут).

Урожайность посевов определяли бункерным методом путем взвешивания собираемого зерна селекционным комбайном «Samro-1200» с шириной захвата 1 м, а также путем взвешивания зерна, собираемого вручную. Относительная ошибка определения урожайности составляла 5%.

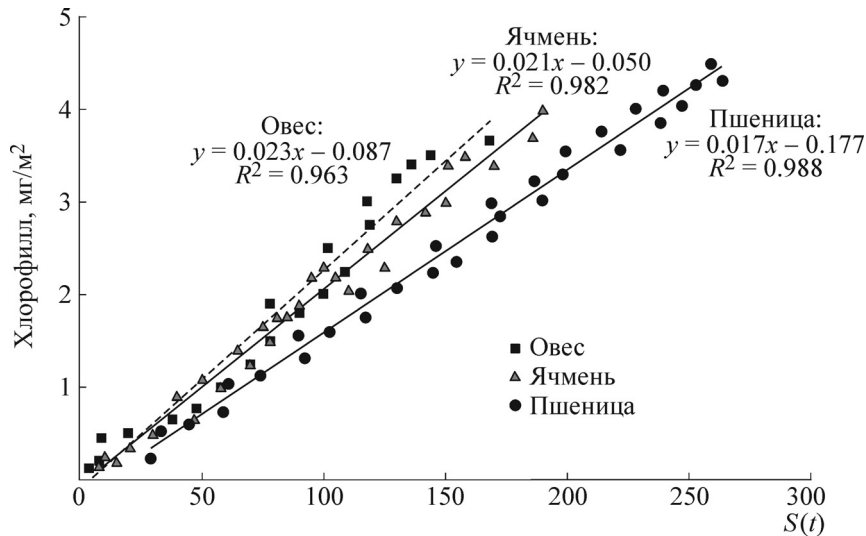


Рис. 2. Связь между хлорофилльным потенциалом $S(t)$, и количеством общего хлорофилла в листьях пшеницы, ячменя и овса в течение вегетационного сезона за 12 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены результаты оценки связи между хлорофилльным потенциалом $S(t)$ и концентрацией общего хлорофилла в листьях верхнего яруса растений для различных сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя и овса). Показано, что в период вегетации посевы различаются по оптическим характеристикам и по количеству общего хлорофилла в растениях. Максимальная величина хлорофилльного потенциала различна для разных культур. Наибольшее значение она имеет для пшеницы и ячменя, наименьшее – для овса. Это можно объяснить различной физиологией данных культур. Пшеница сорта Равнина имеет более широкий лист и более темно-зеленую окраску листа, чем овес. Ярко-зеленую окраску растения (пшеница, ячмень и овес) принимают во время интенсивного процесса накопления хлорофилла в листьях [7–9,11]. Содержание общего хлорофилла в исследуемых культурах также различно. Наибольшее содержание хлорофилла – в листьях пшеницы (от 3,1 до 4,5 мг/м²), наименьшее – в листьях овса (от 2,45 до 3,0 мг/м²). В результате проведенных исследований установлено, что между величиной хлорофилльного потенциала $S(t)$ и количеством общего хлорофилла в листьях растений существует не логарифмическая, а линейная зависимость [13]. Между этими величинами наблюдается хорошая корреляция (рис. 2). Это указывает на пригодность предложенного метода для дистанционной оценки содержания хлорофилла в посевах зерновых культур на основе хлорофилльного потенциала.

На рис. 3 представлены результаты оценки связи между урожайностью пшеницы, ячменя и овса и суммарным хлорофилльным потенциалом $\Sigma S(t)$ в течение вегетационного сезона.

Величина суммарного хлорофилльного потенциала различна для пшеницы, ячменя и овса. Наибольшее значение она имеет для пшеницы и ячменя, наименьшее – для овса. Результаты полевых исследований показали, что урожайность пшеницы выше (0,2–0,37 кг/м²), чем ячменя (0,2–0,24 кг/м²) и овса (0,15–0,24 кг/м²). Разброс по урожайности связан с изменчивостью метеорологических условий в течение 12 лет. В результате найдена хорошая корреляция между суммарным хлорофилльным потенциалом и урожайностью для разных сортов пшеницы, ячменя и овса при различных условиях выращивания ($R^2 = 0,8$). Это указывает на эффективность предложенного метода дистанционной оценки урожайности по суммарному хлорофилльному потенциалу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследование динамики хлорофилльного потенциала с одновременным определением физиологических параметров сельскохозяйственных культур позволяет использовать оптические дистанционные методы при решении многих практических задач. К ним относятся оценка содержания хлорофилла и урожайности сельскохозяйственных культур [7,14]. Динамика значений коэффициента спектральной яркости посевов в течение вегетации показала высокую информативность в области красной полосы

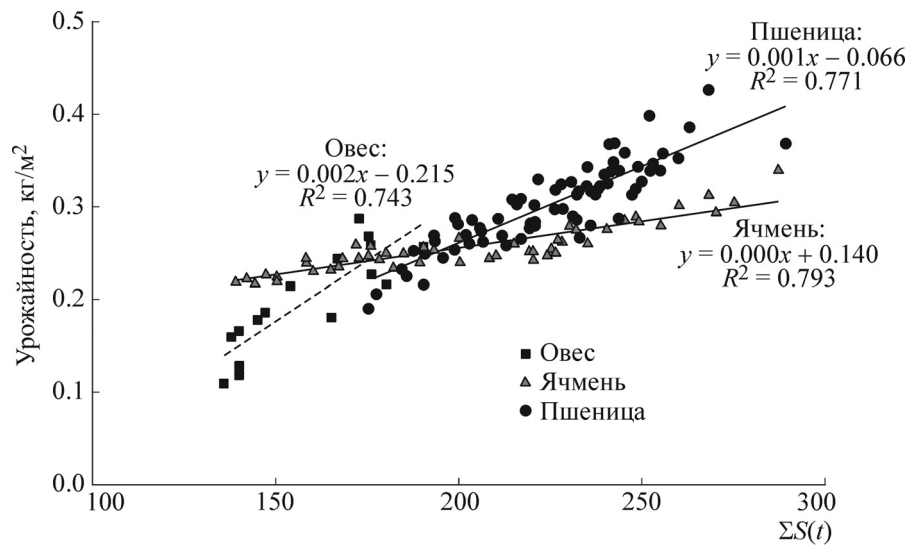


Рис. 3. Связь между суммарным хлорофилльным потенциалом $\Sigma S(t)$ и урожайностью пшеницы (выборка по 80 полям), ячменя (выборка по 58 полям) и овса (выборка по 17 полям) в течение вегетационного сезона за 12 лет.

поглощения хлорофилла, что может служить ключом для дешифровки аэрокосмических спектрональных снимков [2].

По результатам проведенных исследований показано:

1. Корреляция между хлорофилльным потенциалом и количеством общего хлорофилла для пшеницы, ячменя и овса при различных условиях выращивания составила $R^2 = 0,96-0,98$.

2. Корреляция между суммарным хлорофилльным потенциалом и урожайностью для пшеницы, ячменя и овса при различных условиях выращивания составила $R^2 = 0,8$.

3. Величина хлорофилльного потенциала $S(t)$ и суммарного хлорофилльного потенциала $\Sigma S(t)$ для различных сортов зерновых культур имеет разные значения в течение вегетационного сезона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. М. Кочубей, Н. И. Кобец и Т. М. Шадчина, *Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики* (Наук. думка, Киев, 1990).
2. В. Г. Бондур, *Исслед. Земли из космоса*, № 1, 4 (2014).
3. В. В. Козодеров, Т. В. Кондранин, Е. В. Дмитриев и др., *Исслед. Земли из космоса*, № 1, 56 (2008).
4. Н. Н. Выгодская и И. И. Горшкова, *Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности* (Гидрометеиздат, Л., 1987).
5. E. W. Chapelle, M. S. Kim, and J. E. McMurtrey, *Remote Sensing of Environment* **39**, 239 (1992).
6. D. A. Sims and J. A. Gamon, *Remote Sensing of Environment* **81**, 337 (2002).
7. L. Kouadio, N. K. Newlands, A. Davidson, et al., *Remote Sensing* **6** (10), 10193 (2014). DOI:10.3390/rs61010193.
8. I. Yu. Botvich., A. F. Sidko, T. I. Pisman, and A. P. Shevyrnogov, *J. Siber. Fed. University. Engineering & Technologies* **5**, 87 (2012).
9. А. Ф. Сидько, В. С. Филимонов, Ф. Я Сидько и И. Д. Рубцов, *Журн. прикл. спектроскопии* **29** (5), 943 (1978).
10. А. Ф. Сидько, И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман и А. П. Шевырнов, *Биофизика* **60** (4), 812 (2015).
11. A. F. Sid'ko, I. Yu. Botvich, T. I. Pisman, and A. P. Shevyrnogov, *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **129**, 109 (2013). DOI:10.1016/j.jqsrt.2013.06.001.
12. Ю. Е. Андрианова и И. А. Тарчевский, *Хлорофилл и продуктивность растений* (Наука, М., 2000).
13. X. H. Zhang, Q. J. Tian, and R. P. Shen, *Spectroscopy and Spectral Analysis* **30** (6) 1600 (2010).
14. M. Shibayama and T. A. Akiyama, *Jap. J. Crop Sci.* **55** (5), 433 (1986).

Estimation of Chlorophyll Content and Yield of Grain Crops by Chlorophyll Potential

A.F. Sid'ko, I.Yu. Botvich, T.I. Pisman, and A.P. Shevyrnogov

*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

The paper presents an analysis of the relationship between chlorophyll content, grain yield and chlorophyll potential of different wheat, barley and oat cultivars. For this aim we used the results of groundbase remote sensing technique and laboratory data. Spectral reflectance data of agricultural crops obtained using groundbase remote sensing technique in the Krasnoyarsk region were used to calculate chlorophyll potential. Multi-year experiments were carried out in different seasons, under various lighting conditions. Spectral measurements were performed using a double-beam spectroradiometer, which was installed on a mobile work platform at a height of 5 to 18 m. The study showed a good correlation between chlorophyll content, grain yield and chlorophyll potential of different wheat, and barley and oat cultivars. The values of chlorophyll potential are different for wheat, barley and oat cultivars in the growing season.

Key words: spectral reflectance, chlorophyll potential, chlorophyll, crop yield