

УДК 551.507:631.10

Angular Distribution of the Reflective Characteristics of Agrocenosis Ground Remote Sensing

Alexander F. Sidko^{a*}, Irina Yu. Botvich^{a,b},
Tamara I. Pisman^a and Anatoly P. Shevyrnogov^{a,b}

^aInstitute of Biophysics KSC of SB RAS
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

^bSiberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 23.06.2014, received in revised form 07.07.2014, accepted 24.09.2014

The article presents the results of a study of spectral reflectance characteristics of crops produced in the field of optical remote methods. It was established that during the vegetation period the main factors affecting the reflectance of agrocenosis, are morphological and physiological parameters, architectonic, height of the Sun h_0 and the viewing angle φ . Found that the minimum brightness of crops accounted for angles $25^\circ - 30^\circ$ with respect to nadir. By increasing the angle of view is shown the effect of back shine in the red and infrared. This leads to an increase of spectral brightness coefficients in these areas. Found that the optimal time of measurement of reflection factor agrocenosis is between 11 to 16 hours.

Keywords: spectral characteristics, agricultural plants, spectral brightness coefficient, height of the Sun, the viewing angle.

Угловое распределение отражательных характеристик агроценозов по наземным дистанционным измерениям

А.Ф. Сидько^а, И.Ю. Ботвич^{а,б},
Т.И. Письман^а, А.П. Шевырногов^{а,б}

^аИнститут биофизики СО РАН
50 Академгородок, Красноярск, 660036, Россия

^бСибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

В статье представлены результаты исследования угловых спектрально-отражательных характеристик посевов сельскохозяйственных культур, полученные в полевых условиях

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: Sidko@ibp.krasn.ru

оптическими дистанционными методами. Установлено, что в летний период вегетации основными факторами, влияющими на отражательную способность агроценозов, являются морфологические и физиологические параметры, архитектура посева, высота Солнца h_0 и угол визирования φ . Установлено, что минимум яркости посевов приходится на углы 25–30° относительно надир. При увеличении угла визирования проявляется эффект обратного блеска в красной и инфракрасной областях спектра. Это приводит к увеличению значений коэффициента спектральной яркости в этих областях. Установлено, что оптимальное время проведения измерений отражательных характеристик посевов агроценозов – период с 11 до 16 часов.

Ключевые слова: спектральные характеристики, сельскохозяйственные культуры, коэффициент спектральной яркости (КСЯ), высота Солнца h_0 , угол визирования.

Введение

Современный уровень развития средств и методов исследования Земли из космоса, программных комплексов обработки космических данных и широкое распространение геоинформационных систем (ГИС) позволяют получить качественно новую информацию о состоянии наземных и водных объектов и динамике изменения их состояния. Важнейшей задачей спутникового мониторинга растительных покровов суши и наземных дистанционных оптических методов являются новые методические разработки, связанные с идентификацией сельскохозяйственных угодий и оценкой морфофизиологических характеристик растений [1-5]. Развитие средств космического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур дает возможность улучшить получение спектрофотометрической информации с последующей качественной и количественной интерпретацией [1, 4]. Сложность идентификации растительных объектов на спутниковых снимках заключается в том, что в течение вегетационного периода морфология растений претерпевает значительные изменения [4]. В период вегетации также меняется угловое распределение отражательных характеристик посевов [2, 5]. Требуемая информация может быть получена и качественно интерпретирована только на основе использования данных спутникового и наземного дистанционного зондирования [6, 7].

Несмотря на большое разнообразие видов растений, посевов сельскохозяйственных культур, они обладают схожими спектрами отражения и поглощения. Это обусловлено в значительной мере поглощательной способностью фитопигментов хлорофилла, каротиноидов и других пигментов в области ФАР (фотосинтетически активной радиации $\lambda = 380-750$ нм). Содержание и тип пигментов в течение вегетации в наибольшей степени влияют на форму кривой и динамику спектральной яркости растений [8-10].

Отражательная способность посевов сельскохозяйственных культур несет в себе значительный объем информации о виде, стадии развития и морфофизиологическом состоянии растений. Такие исследования позволяют определить взаимосвязь спектрофотометрических характеристик системы почва – растительность с их физиологическими параметрами в различные периоды вегетации [6, 11-14].

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются для решения самых разнообразных задач, в том числе и для оценки состояния растительного покрова (РП) [15, 16]. Дистанционное зондирование РП позволяет оценивать динамику развития и состояние РП от глобальных исследований в масштабах стран, регионов и континентов до небольших участков

растительности. Результаты показывают, насколько велико число различных факторов, влияющих на спектральную яркость и отражательную способность растительности [3, 8, 10].

Настоящая статья посвящена исследованию углового распределения спектральных отражательных характеристик различных видов сельскохозяйственных посевов на основе наземных дистанционных измерений в зависимости от углов визирования и высоты Солнца h_0 в летний период вегетации.

Методика и объекты исследования

Исследования спектральных характеристик посевов сельскохозяйственных культур проводили одновременно в Центральных и Южных районах Красноярского края в летний период вегетации растений. В качестве основных растительных объектов исследования использовали посевы пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и ячменя (*Hordeum distichon* L.) сорта Винер. Площади исследуемых участков посевов составляли от 200 га и более. Регистрация отражательной способности РП проводилась в полевых условиях в июне–июле. На рис. 1 представлен общий вид, а на рис. 2 – оптическая схема регистрации спектрально-отражательных характеристик посевов.

Выбор этих объектов обусловлен следующими соображениями: культуры пшеница и ячмень – основные зерновые культуры, высеваемые и культивируемые на большей территории нашей страны. Посевы сельскохозяйственных культур признаны удобными модельными объектами для изучения их спектральной яркости и отражательной способности дистанционными методами [9]. Данные культуры к настоящему времени достаточно хорошо изучены с физиологической и биологической точек зрения, это основные зерновые культуры, высеваемые и культивируемые на большей территории нашей страны.

Наиболее удобными характеристиками, позволяющими идентифицировать оптические свойства растительных ценозов, являются их спектральная яркость и отражательная способность [1, 2]. Под спектральным коэффициентом яркости исследуемого объекта (поверхности)



Рис. 1. Дистанционная регистрация спектральных коэффициентов яркости посевов агроценозов спектрофотометром, установленным в корзине автовышки



Рис. 2. Оптическая схема регистрации спектрально-отражательных характеристик посевов

$\rho_\lambda(\vartheta, \varphi)$ понимают отношение яркости исследуемой $B_\lambda(\vartheta, \varphi)$ поверхности в направлении (ϑ, φ) в интервале длин волн $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ к яркости идеально рассеивающей ортотропной поверхности $B_0(\vartheta, \varphi)$, в том же направлении, находящейся в тех же условиях освещения:

$$\rho_\lambda(\vartheta, \varphi) = \frac{B_\lambda(\vartheta, \varphi)}{B_0(\vartheta, \varphi)}, \quad (1)$$

где (ϑ, φ) – полярный и азимутальный углы соответственно.

Регистрация спектров яркости РП проводилась нами с автовышки с высоты от 10 до 18 м в ясную безоблачную погоду двулучевым спектрофотометром ПДСФ. Двулучевой дифференциальный спектрофотометр (ПДСФ) является собственной разработкой. Он регистрирует дифференциальный спектр яркости объекта исследований и эталонной поверхности. Спектрофотометр регистрировал спектры отражения от посевов сельскохозяйственных культур с площади 1,2-1,3 м². В объектив спектрофотометра попадали не отдельные фитоэлементы (листья), а участки посевов. Время сканирования составляло 60 с в спектральном диапазоне от 400 до 850 нм. Измерение спектров производилось со спектральным разрешением ± 2 нм. [17]. В качестве эталона сравнения использовалась свеженапыленная алюминиевая площадка (1 м²), покрытая окисью магния (MgO) (рис. 1 и 2). Данный эталон обладает наилучшими фотометрическими отражающими свойствами и наиболее полно отвечает условиям ортотропных поверхностей, что способствует получению наиболее точных значений спектральных коэффициентов яркости исследуемых объектов в полевых условиях. Для получения более полной картины о распределении КСЯ по исследуемому объекту регистрировали от 20 до 30 спектров, по которым рассчитывали их средние значения [6, 7]. Регистрируемые спектры яркости были оцифрованы и занесены в специально разработанную базу данных «Информационная база данных спектров яркости отражения посевов» в среде Microsoft Access, которая позволила упорядочить хранение данных, облегчить их ввод, поиск и обработку. База данных содержит сведения о дате регистрации растительных объектов, спектральном разрешении и значениях КСЯ [9, 11, 12].

Геометрия растительных покровов очень сложна и практически не поддается точному математическому описанию. В общем случае оптические свойства РП определяются пятью физическими факторами:

- 1) оптическими свойствами листа;
- 2) геометрией растительного покрова (индексом листовой поверхности LAI и угловым распределением фитоэлементов растения);
- 3) отражательной способностью системы почва – растительность (проективное покрытие B);
- 4) углом освещения и визирования;
- 5) атмосферным пропусканием солнечного излучения.

Оптические свойства растительного покрова определяются отражательной и поглощательной способностью фитоэлементов растений (стебли, листья, колосья), а также их наземной растительной массой [2, 18].

Листовой индекс LAI (м²/м²) или относительная поверхность растительного ценоза определяется отношением суммарной односторонней площади листьев растения к площади почвы, занятой этим растением [2]:

$$LAI = k \cdot \ell \cdot d \cdot N, \quad (2)$$

где l – длина листа; d – наибольшая ширина листа; k – коэффициент пропорциональности, определенный экспериментально для листьев данной культуры; N – количество листьев растений, отнесенных к единице площади почвы.

Проективное покрытие (B) определяется как доля почвы, закрытая растительностью при вертикальном наблюдении (в нади́р), которая существенно зависит от листового индекса растений и углового распределения фитоэлементов [2]. В общем виде коэффициент проективного покрытия B определяется из соотношения для доли просветов фитоэлементов растений относительно почвы:

$$B = 1 - e^{-1/D - (G / \cos(\varphi))L}, \quad (3)$$

где D – относительная дисперсия – параметр, характеризующий тип размещения фитоэлементов в пространстве; φ – угол визирования; G – интегральная функция распределения углов наклона фитоэлементов.

Как уже отмечалось, коэффициент проективного покрытия (B) тесно связан с угловым распределением фитоэлементов растений (φ), а следовательно, существенно влияет на спектры и индикатрису отражения от растительного посева в целом. Поскольку спектральный коэффициент яркости системы почва – растительность зависит от величины наземной растительной массы, то форма индикатрисы тоже зависит от растительной массы, и каждый вид растений характеризуется собственным семейством индикатрис (диаграмм) яркостей [2, 19, 20].

Результаты и обсуждение

Ранее проведенные исследования показали, что растительный покров посева с различной архитектурой, структурой фитоэлементов и различными оптическими свойствами листа имеет зависимость коэффициента спектральной яркости от угла визирования φ [18]. В результате исследований КСЯ агроценозов не в нади́р показано, что они могут служить источником дополнительной информации по распознаванию и классификации растительности, в том числе при различных стрессах [2, 21, 22].

Шероховатая, неровная поверхность верхней границы растений, взаимное экранирование и затенение фитоэлементов внутри посева определяет максимум обратного рассеяния – обратный блеск. В этом случае происходит увеличение яркости растений посева при увеличении угла между линией визирования и направлением падения солнечных лучей. Коэффициенты отражения фитоэлементов (листья, колосья) растений посева, как правило, превышают коэффициенты пропускания, и это проявляется в асимметрии углового распределения яркости посева в целом в сторону обратного отражения (обратный блеск). На рис. 3 представлены результаты зависимости КСЯ посева ячменя от углов визирования в период всходов (стадия кушения), когда высота растений не превышала 12-15 см. При этом коэффициент проективного покрытия (B) составлял (0.4÷0.5). В этот период развития растения не полностью перекрывают почву.

Результаты исследований показали, что на начальной стадии вегетации посева при наблюдении в нади́р сказывается влияние почвы (кривая 4), но по мере увеличения угла визирования от нади́ра влияние почвы уменьшается (кривые 1, 2, 3). При этих углах визирования доминирующим фактором становится отражение от фитоэлементов растений. Минимум яркости

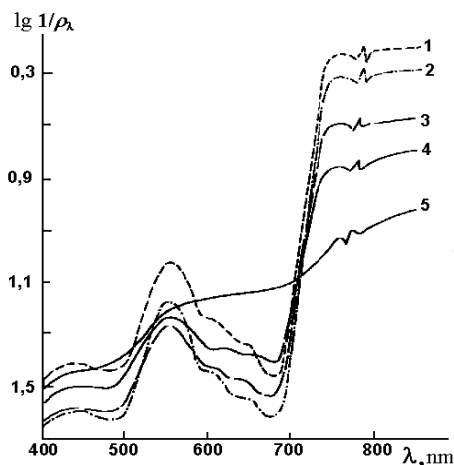


Рис. 3. Кривые КСЯ посева ячменя в стадии кущения в зависимости от угла визирования φ относительно надира: 1 – (70–75°); 2 – (60–70°); 3 – (25–30°); 4 – 0°, 5 – почва у края поля

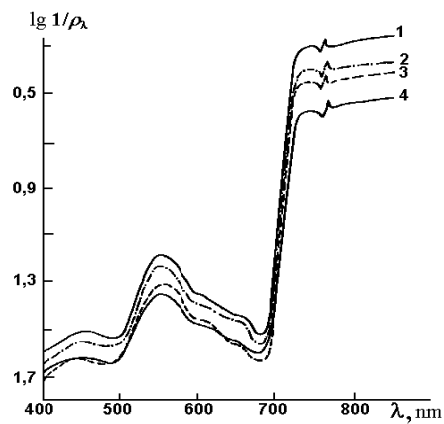


Рис. 4. Кривые КСЯ посева пшеницы в стадии выхода в трубку в зависимости от угла визирования φ относительно надира: 1 – (70–75°); 2 – (50–55°); 3 – (15–20°) и 4 – 0°

приходится на углы визирования $\varphi = 25\text{--}30^\circ$ относительно надира. С дальнейшим увеличением угла визирования относительно надира (кривая 1 и 2) начинает проявляться эффект обратного блеска, особенно в красной и инфракрасной областях спектра (БИКР), что приводит к резкому увеличению значений КСЯ в этих областях. При этом высота Солнца в зените в районе проводимых исследований составляла $33\text{--}34^\circ$.

На рис. 4 показаны спектры яркости посева пшеницы ρ_λ в стадии выхода в трубку, высота растений составляла $30\text{--}35$ см, при этом почва была полностью закрыта. Коэффициент проективного покрытия (B) равнялся 1. Регистрация спектров производилась при тех же условиях. Исследования показали, что в этот период развития растений различия КСЯ при изменении угла визирования φ относительно надира изменяются незначительно. Эти отличия не превышали 25 % в области БИКР и 10–13 % в зеленой области (кривые 1 и 4). Это обусловлено тем, что фитоэлементы посева расположены преимущественно горизонтально, растения однородны и система почва – растительность близка к ламбертовским рассеивателям. Для показа наибольших контрастов спектры яркости посевов приведены в логарифмическом масштабе.

Типичные кривые результатов углового распределения интенсивности отражения КСЯ посева пшеницы в стадии колошения представлены на рис. 5. Показаны индикатрисы отражения яркости посева пшеницы, полученные для характерных точек перегиба кривой КСЯ ($\lambda = 820, 680, 550$ нм). Наблюдение проводилось под различными углами визирования. Угол визирования прибора φ менялся (от 15 до 85°). Высота Солнца h_0 менялась от 80 до 20° над линией горизонта. Регистрация проводилась в июле с 9.30 до 18.30 с интервалом в 2 ч.

Исследования индикатрис отражения КСЯ ρ_λ посевов пшеницы в стадии колошения показали, что в утренние и вечерние часы, когда высота Солнца h_0 над уровнем горизонта имеет минимальные значения ($10\text{--}25^\circ$), наблюдается эффект «зеркального блеска». При малых высотах Солнца h_0 наблюдается два отчетливо выраженных максимума интенсивности – в направлении

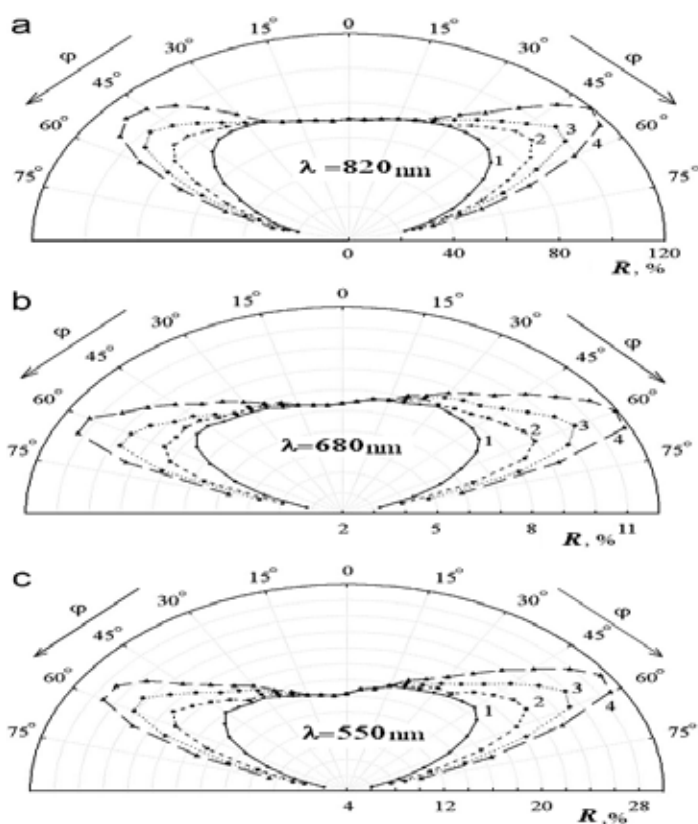


Рис. 5. Индикатрисы отражения посева пшеницы в стадии колошения от углов визирования φ и высоты Солнца h_0 : 1 – $h_0 = 55^\circ$; 2 – $h_0 = 45^\circ$; 3 – $h_0 = 35^\circ$; 4 – $h_0 = 20^\circ$. Угол визирования φ менялся от 15° до 85° . Индикатрисы представлены в полярных координатах

зеркального отражения и в противоположном направлении. Данный эффект наблюдается при спектрофотометрировании посева с автовышки по лучу Солнца. Прибором фотометрируется не вся толща посева, а лишь его вертикальная часть – колосья. Колосья представляют собой цилиндрические поверхности. Величина данного эффекта может достигать более 100 % в ближней инфракрасной области (БИКР) и монотонно убывает в коротковолновой области. Так, в области 550 нм он уже составляет 20–30 % от реальных значений КСЯ. Начиная с 10 и до 17 ч местного времени значения КСЯ ρ_λ посева в стадии колошения принимают свои истинные, достоверные значения. Значения ρ_λ не меняются при регистрации их как по направлению Солнца, так и против Солнца. При большой высоте его ($h_0 > 60^\circ$) индикатрисы отражения по своей форме яркости близки к сферическим (рис. 5) [2, 19]. Следовательно, подстилающую поверхность можно считать ортотропной.

Проведенные исследования индикатрис отражения в работе [23] различных видов посевов показали, что они также имеют существенные различия, которые зависят от высоты Солнца h_0 и характеризуются наличием зеркального и антизеркального отражения. Зеркальное отражение обусловлено структурой растений и проявляется более ярко в области БИКР, где доминирует однократное отражение, а пропускание света фитоэлементами ценоза (листья) незначительно. Зеркальное отражение от фитоэлементов растений происходит на границе между воздухом и

восковым слоем кутикулы листа. Необходимо отметить, что для различных культур данный эффект будет различным, что закладывает основу для видовой диагностики растительных покровов [14, 15]. Эффект смещения максимума яркости от надира в зеркальную сторону – сторону, противоположную падению солнечных лучей, – обусловлен зеркальным отражением падающего светового потока от листьев. При этом смещение максимума КСЯ обнаруживается сильнее в плоскости вертикали Солнца в спектральных областях сильного поглощения света растениями, где отраженный поток радиации определяется однократным рассеянием [2, 23].

Следовательно, основными факторами, влияющими на отражательную способность РП, являются: содержание фитопигментов, наземная фитомасса, листовой индекс, архитектура растений, проективное покрытие в системе почва – растительность, фаза фенологического развития растения, высота Солнца h_0 и угол визирования покрова φ .

Заключение

Спектрофотометрическая информация об угловом распределении КСЯ посевов агроценозов, полученная в полевых условиях дистанционными методами, может быть применена для построения имитационных моделей спектрально отражательной способности системы почва – растительность в направлении надир. Это позволит рассматривать растительность (посева) как оптически тонкий слой рассеивающей и подстилающей среды и делать прогнозы динамики пространственного распределения видового состава и морфофизиологического состояния. Показано, что угловые измерения спектральной яркости посевов могут быть использованы при изучении пространственного распределения различных видов растительности и ее экологического состояния. Анализ и обработка электронной базы спектрофотометрической информации, полученной на основании полевых наземных измерений динамики КСЯ различных видов растительных покровов в период их вегетации, позволяют сделать следующие выводы:

Выводы

1. Показано, что основными факторами, влияющими на отражательную способность растительных покровов, являются морфофизиологические параметры, архитектура растений, высота Солнца – h_0 и угол визирования – j .
2. Установлено, что минимум яркости посевов приходится на углы 25–30° относительно надира. При увеличении угла визирования начинает проявляться эффект обратного блеска, особенно в красной и инфракрасной областях спектра (NIR), что приводит к резкому увеличению значений коэффициентов спектральной яркости в этих областях.
3. Установлено, что оптимальное время проведения измерений КСЯ посевов для идентификации агроценозов – период с 11 до 16 часов.

Работа выполнена при поддержке Программой РАН, Проектом № 12 “Арктика”.

Список литературы

[1] Кочубей С.М., Кобец Н.И., Шадчина Т.М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. Киев: Наукова думка, 1990.

- [2] *Выгодская Н.Н., Горшкова И.И.* Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
- [3] *Zhutar A. Y.* // Journal of Applied Spectroscopy. 2000. V.67(2). P. 307–311.
- [4] *Козодеров В. В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е, В. и др.* // Исследования Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.
- [5] *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* // Геоматематика. 2009. № 3. С. 28–31.
- [6] *Сидько А.Ф.* // Изв. РАН. Сер. биол. наук. 2004. № 5. С. 547–555.
- [7] *Сидько А.Ф., Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П.* // ДАН. 2008. Т. 419, № 3. С. 417–420.
- [8] *Schepers J.S., Blackmer T. M., Wilhelm W., Resende M.* // J. Plant Physiol. 1996. V. 148. P. 523–529.
- [9] *Сидько А.Ф., Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П.* // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 64–70.
- [10] *Erol H. and Akdeniz F.* // Int. J. Remote Sens. 1996. V. 17. P. 357–3371.
- [11] *Pugacheva I.Yu., Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P.* // Advances in Space Research. 2010. № 45. С. 1224–1230.
- [12] *Сидько А.Ф., Шевырногов А.П.* // ДАН. 1997. Т. 354, № 1. С. 120–122.
- [13] *Сидько Ф.Я., Соколов В.И., Сидько А.Ф., Филимонов В.С.* // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. наук. 1980. Вып. 1. С. 103–108.
- [14] *Zipoli G. and Grifont D.* // Int. J. Remote Sensing. 1994.V. 15 (16). P. 3309-3314.
- [15] *Ranson K. J., Daughtry C. S. T., Biehl L. L., and Bauer M. E.* // Remote Sensing of Environment. 1985. V. 18. P. 147–161.
- [16] *Сидько А.Ф., Филимонов В.С., Сидько Ф.Я., Рубцов И.Д.* // Журнал прикладной спектрофотометрии. 1976, Т. 29, вып. 5. С. 943–948.
- [17] *Zhang X. H., Tian Q. J., Shen R. P.* // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2010.V. 30 (6). P. 1600-1605.
- [18] *Ranson K. J., Daughtry C. S. T., Biehl L. L., and Bauer M. E.* // Remote Sensing of Environment. 1985. V. 18. P. 147–161.
- [19] *Jorgensen R. N., Hansen P. M. and Bro R.* // Int. J. Remote Sensing. 2006. V. 27(5). P. 919–937.
- [20] *Daughtry C. S. T., Walthall C. L., Kim M. S. and al.* // Remote Sens. Environ. 2000. V. 74. P. 229–239.
- [21] *Schepers J. S., Blackmer T. M., Wilhelm W., Resende M.* // J. Plant Physiol. 1996. V. 148. P. 523–529.
- [22] *Кондратьев К.Я., Федченко П.П.* Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.