

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

**СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ  
ПО НАЗЕМНЫМ ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

© 2013 г. А. Ф. Сидько<sup>1, 2\*</sup>, И. Ю. Ботвич<sup>1, 2</sup>, Т. И. Письман<sup>1</sup>, А. П. Шевырнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

\*E-mail: Sidko@ibp.krasn.ru

Поступила в редакцию 21.06.2012 г.

Представлены результаты исследования отражательных и спектрально-поляризованных характеристик лесных древостоев, посевов с.-х. культур, полученных в полевых условиях. Установлено, что минимум яркости посевов приходится на углы 25°–30° относительно надира. Показано, что хвойные и лиственные древостои обладают схожими спектрами отражения поляризованного света. При этом у всех хвойных древостоев поляризованная составляющая будет меньше, чем у лиственных. Показано, что у широколиственных посевов с.-х. культур (кукуруза) поляризованная составляющая оказывает большее влияние на отражательную способность в красной и ИК-областях спектра.

**Ключевые слова:** спектрально-поляризованные характеристики, сельскохозяйственные культуры, лиственные и хвойные древостои, коэффициент спектральной яркости, поляризация

DOI: 10.7868/S0205961413020115

### ВВЕДЕНИЕ

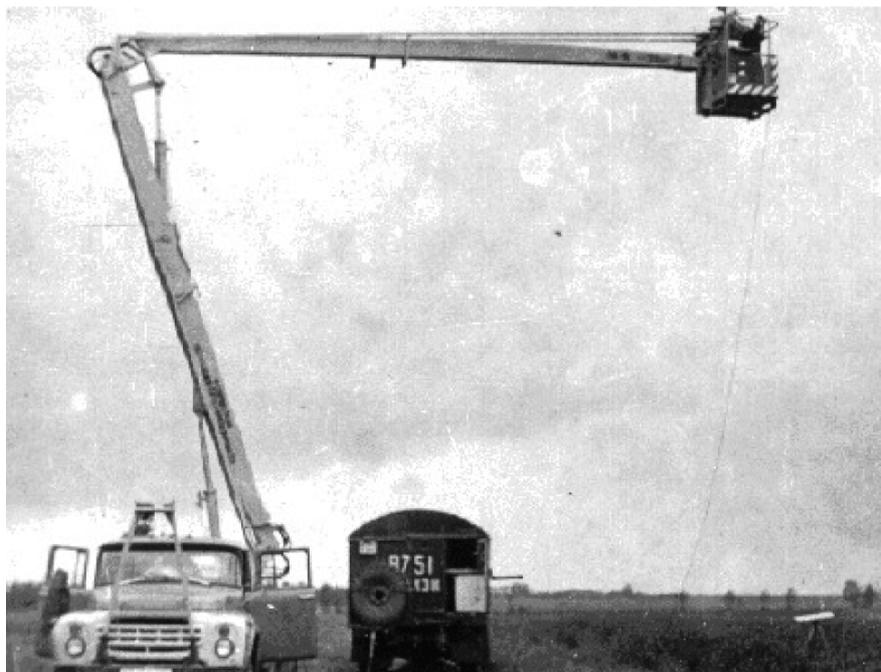
Важнейшей задачей спутникового мониторинга растительных ценозов суши и развития наземных дистанционных оптических методов являются методические разработки идентификации с.-х. (сельскохозяйственных) угодий, определение видового состава растительности и оценка морфофизиологических характеристик растений (Козодеров и др., 2008; Черепанов, Дружинина, 2009; Gitelson et al., 2005; Suomalainen et al., 2009). Развитие средств космического мониторинга посевов с.-х. культур, хвойных и лиственных древостоев дает возможность улучшить сбор и получение спектрофотометрической информации с последующей качественной и количественной интерпретацией экспериментального материала (Козодеров и др., 2008; Черепанов, Дружинина, 2009).

Отражательная способность растительных покровов (РП) несет в себе значительный объем информации о морфофизиологическом состоянии растений. Интенсивность зеркально отраженного солнечного света от РП часто настолько велика, что покровы, наблюдаемые в направлении на Солнце, кажутся белесыми, а не зелеными (Vanderbilt et al., 1985a). Из закона Френеля следует, что свет, отраженный гладкими поверхностями листьев растений, является поляризованным.

Величина поляризованной составляющей существенно зависит от угла падения света на поверхность листа, показателей преломления воскового слоя и шероховатости его поверхности (Розенберг, 1985; Кизель, 1973; Выгодская, Горшкова, 1987; Vanderbilt et al., 1985a). Данная информация зависит от вида растительности, она потенциально связана с морфофизиологическим состоянием и стадией развития РП. Поляризационные измерения являются потенциальным источником полезной информации о состоянии растительности посевов с.-х. культур при спутниковых измерениях.

Данные исследования позволяют определять взаимосвязь спектрофотометрических характеристик растительности с параметрами, характеризующими их состояние, в том числе по морфофизиологической структуре посевов с.-х. культур в различные периоды вегетации.

Настоящая статья посвящена исследованию спектрально-поляризованных характеристик лесных сообществ и с.-х. посевов для оценки возможности применения наземных дистанционных методов при анализе оптической информации отраженного и поляризованного света.



**Рис. 1.** Дистанционная регистрация спектральных коэффициентов яркости растительных покровов (посевов) спектрофотометром, установленным в корзине автовышки.

## МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по оценке отраженного и поляризованного света лесных сообществ и с.-х. посевов проводились нами в центральных и южных районах Красноярского края. В качестве основных растительных объектов исследования использовались: хвойные и лиственные древостои, посевы пшеницы (*Triticum aestivum*) и кукурузы (*Zea mays L. ssp. mays*). Площади фотометрируемых участков составляли от 200 га и более. Регистрация отражательной способности РП проводилась в полевых натуральных условиях (рис. 1). На рис. 1 представлен общий вид, а на рис. 2 – оптическая схема регистрации спектрально-поляризованных характеристик РП.

Регистрация поляризованных спектров яркости РП (СКЯ) проводилась нами с автовышки с высот от 10 до 18 м в ясную безоблачную погоду двулучевым спектрофотометром ПДСФ. Для получения поляризованных спектров на канал измерения надевалась вращающаяся на 360° насадка (с поляридом) с делением по градусам (через 2°) по методике, описанной ранее (Сидько, 2003; Сидько, Shevurnogov, 2000; Сидько, 2004). В качестве эталона сравнения использовалась свеженапыленная алюминиевая площадка (1 м<sup>2</sup>), покрытая окисью магния (MgO) (рис. 1, 2). Данный эталон обладает наилучшими фотометрическими отражающими свойствами и наиболее полно отвечает условиям ортотропных поверхностей, что способствует получению наиболее точных значений

СКЯ исследуемых объектов в полевых условиях. Он ортотропен и обладает косинусной характеристикой при высотах Солнца  $h_0 \geq 25^\circ$ . Измерение спектров производилось в спектральном диапазоне от 400 нм до 850 нм со спектральным разрешением  $\pm 2$  нм. Угол регистрации объектов составлял 20°–30° от надира. Для получения более полной картины о распределении СКЯ по исследуемому объекту регистрировали от 20 до 30 спектров, по которым рассчитывались средние значения.

Геометрия РП очень сложна и практически не поддается точному математическому описанию, однако было установлено, что для оценки их отражательных свойств особо важны три физических параметра: индекс листовой поверхности (LAI), проективное покрытие (LAD) и угловое распределение листьев. Оптические свойства РП определяются отражательной и поглощательной способностью фитоэлементов растений (стебли, листья, хвоя), а также их наземной растительной массой (Выгодская, Горшкова, 1987; Vanderbilt et al., 1985a; Xinli Hu, 2009). В общем случае оптические свойства РП определяются следующими пятью физическими факторами:

- 1) оптическими свойствами листа;
- 2) геометрией покрова (LAI) и угловым распределением фитоэлементов;
- 3) отражательной способностью почвы;
- 4) углом освещения и визирования;

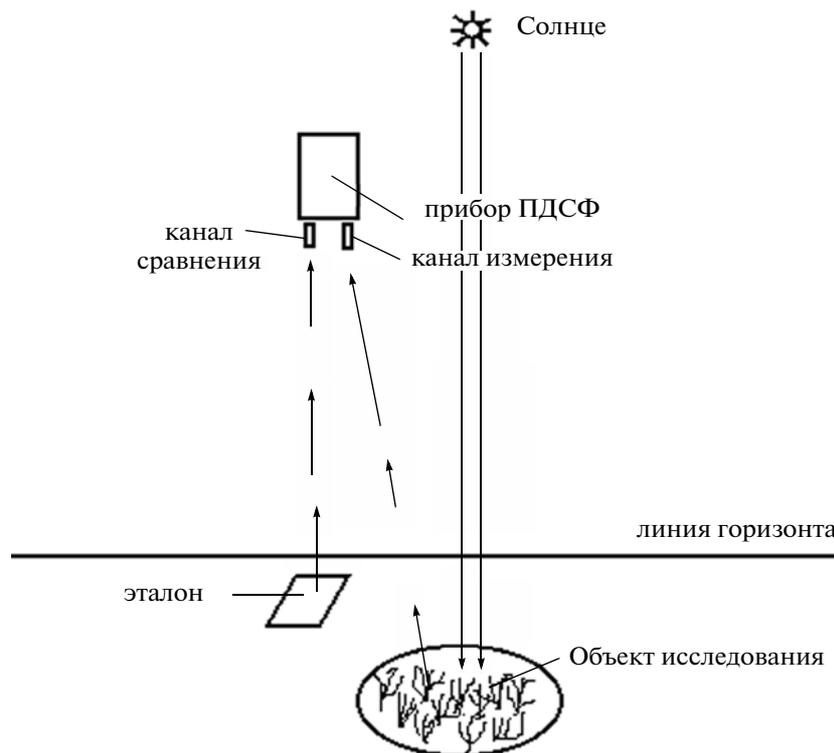


Рис. 2. Оптическая схема регистрации спектрально-поляризованных характеристик РП.

5) атмосферным пропусканием солнечного излучения.

Листовой индекс LAI ( $\text{м}^2/\text{м}^2$ ), или относительная поверхность растительного ценоза определяется отношением суммарной односторонней площади листьев растения к площади почвы, занятой этим растением (Выгодская, Горшкова, 1987)

$$\text{LAI} = kldN,$$

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. При регистрации спектров яркости поляризованной составляющей и неполяризованной составляющей СКЯ для хвойных и лиственных древостоев площадь фотометрируемого покрова LAI составляла  $0.7\text{--}0.8 \text{ м}^2$ , а для посевов и травостоев  $1.2\text{--}1.3 \text{ м}^2$ .

Проективное покрытие ( $B$ ) или сомкнутость покрова (LAD) определяется как доля почвы, закрытая растительностью при вертикальном наблюдении (в надир), которая существенно зависит от листового индекса растений и углового распределения фитоэлементов. В общем виде  $B$  определяется из соотношения для доли просветов фитоэлементов растений относительно почвы

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

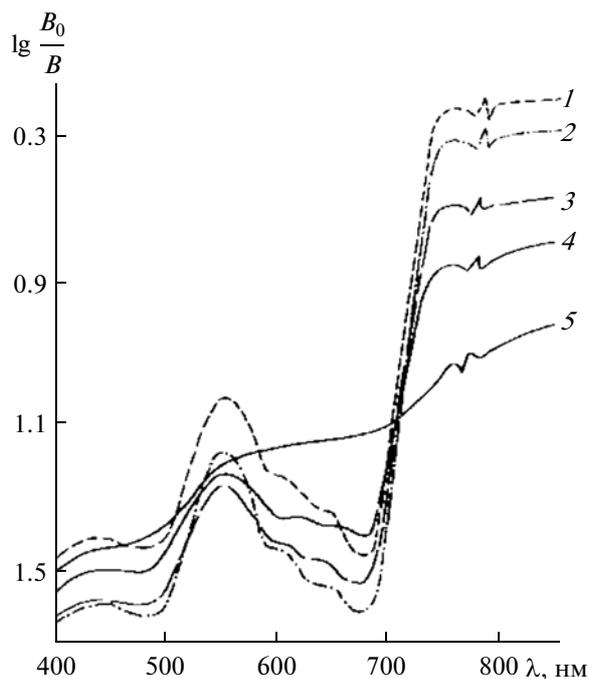
где  $D$  – относительная дисперсия – параметр, характеризующий тип размещения фитоэлементов в пространстве;  $j$  – угол визирования;  $G$  – интегральная функция распределения углов наклона фитоэлементов.

Как уже отмечалось, коэффициент проективного покрытия тесно связан с угловым распределением фитоэлементов растений, а, следовательно, существенно влияет на индикатрису отражения от растительного покрова в целом. Поскольку 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 (Выгодская, Горшкова, 1987).

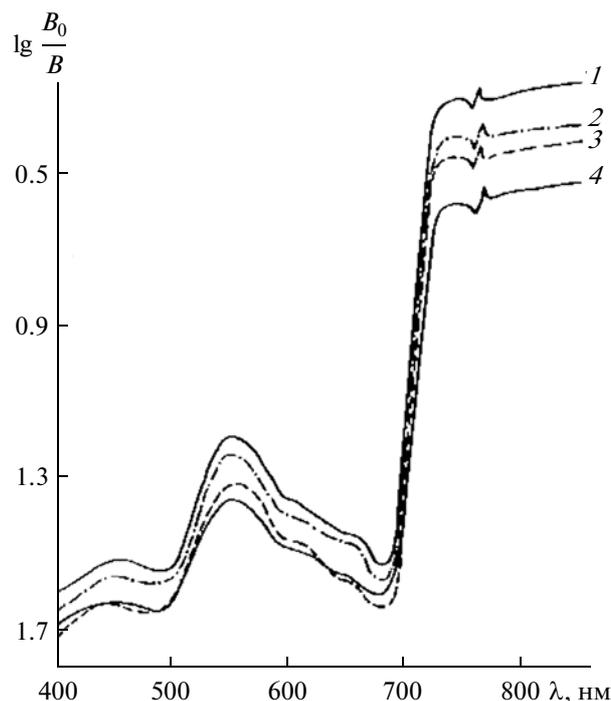
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

### *Исследование отражательных свойств растительности*

Ранее проведенные исследования показали, что РП с различной архитектурой, структурой фитоэлементов и различными оптическими свойствами листа должны иметь различную угловую зависимость СКЯ от угла визирования (Sid'ko, Shevyrnogov, 2000; Сидько, 2008; Pugacheva, 2010).



**Рис. 3.** Спектры коэффициентов яркости посева ячменя в стадии всходов в зависимости от угла визирования: 1 – 70°–75°; 2 – 60°–70°; 3 – 25°–30°; 4 – 0° от надира; 5 – почва у края поля.



**Рис. 4.** Кривые СКЯ посева пшеницы в стадии кушения в зависимости от угла визирования: 1 – 70°–75° от надира; 2 – 50°–55°; 3 – 20°–15°; 4 – надир.

Измерения СКЯ, проведенные не в надир, показали, что они могут служить источником дополнительной информации по распознаванию и классификации растительности. Шероховатая, неровная поверхность верхней границы растений, взаимное экранирование и затенение фитоэлементов внутри посева определяет максимум обратного рассеяния – обратный блеск и уменьшение яркости РП 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) (рис. 3).

На рис. 3 представлены зависимость СКЯ посева ячменя от углов визирования в период всходов, когда высота растений не превышала 15 см. В этот период развития растения не полностью перекрывают почву. Результаты исследований показали, что на начальной стадии вегетации посева при наблюдении в надир сказывается влияние почвы (кривая 4), но по мере увеличения угла визирования от надира это влияние уменьшается (кривые 1, 2, 3). При этих углах визирования доминирующим фактором становится отражение от фитоэлементов растений. Минимум яркости приходится на углы 25°–30° относительно надира. С дальнейшим увеличением угла визирования

(кривая 1 и 2) начинает проявляться эффект обратного блеска, особенно в красной и ИК-областях спектра, что приводит к резкому увеличению значений СКЯ в этих диапазонах.

На рис. 4 представлены спектры яркости посева пшеницы в стадии кушения, высота растений составляла 30–35 см, при этом почва была полностью закрыта. Регистрация спектров производилась при тех же условиях. Было установлено, что в этот период развития растений различия СКЯ при изменении угла визирования относительно надира минимальны, отличия не превышали 25% в ИК-области 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 является близкой к ламбертовским рассеивателям. Дневной ход кривых СКЯ в этот период имеет незначительные отклонения и подчиняется нормальному закону распределения.

Другие результаты углового распределения интенсивности отражения СКЯ наблюдаются у посева пшеницы в стадии колошения. На рис. 5 представлены индикатрисы отражения посева, полученные под различными углами и при различной высоте Солнца  $h_0$ . Шероховатость верхней границы РП, взаимное экранирование и затенение фитоэлементов внутри посева обуславливает максимум обратного рассеяния – обратный

блеск и уменьшение яркости РП при увеличении угла между линией визирования и направлением падения солнечных лучей. Коэффициенты отражения фитоэлементов (листья, колосья) растений посева, как правило, превышают коэффициенты пропускания, это проявляется в асимметрии углового распределения яркости посева в целом в сторону обратного отражения (зеркальный блеск). Эффект смещения максимума яркости от надира в зеркальную сторону обусловлен зеркальным отражением падающей радиации от листьев и наличия затенений внутри посева.

Исследования индикатрис отражения посевов пшеницы в стадии колошения и дневного хода СКЯ показали, что в утренние и вечерние часы, когда высота Солнца  $h_0$  над уровнем горизонта имеет минимальные значения ( $10^\circ$ – $25^\circ$ ), наблюдается эффект “зеркального блеска”. Данный эффект наблюдается при спектрофотометрировании с автовышки по лучу в результате того, что прибором фотометрируется не вся толща РП, а лишь его вертикальная часть – колосья. Колосья представляют собой цилиндрические поверхности. Величина данного эффекта может достигать более 100% в ближней ИК-области и монотонно убывает в коротковолновой области. Так, в области 550 нм, он уже составляет 20–30% от реальных значений СКЯ. Начиная с 10:00 и до 17:00 значения СКЯ посева в стадии колошения принимают истинные, достоверные значения и не меняются при регистрации их как по лучу, так и против Солнца.

Проведенные исследования индикатрис отражения различных видов посевов с.-х. культур показали, что последние имеют существенные различия, которые зависят от высоты Солнца, а также характеризуются наличием зеркального отражения. Зеркальное отражение обусловлено структурой растений и проявляется более ярко в ИК-области, 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 РП (Vanderbilt, 1985a).

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 СКЯ обнаруживается сильнее в плоскости вертикали Солнца в спектральных областях сильного поглощения света растениями, где отраженный поток радиации определяется однократным рассеянием. Следовательно, основными фактора-

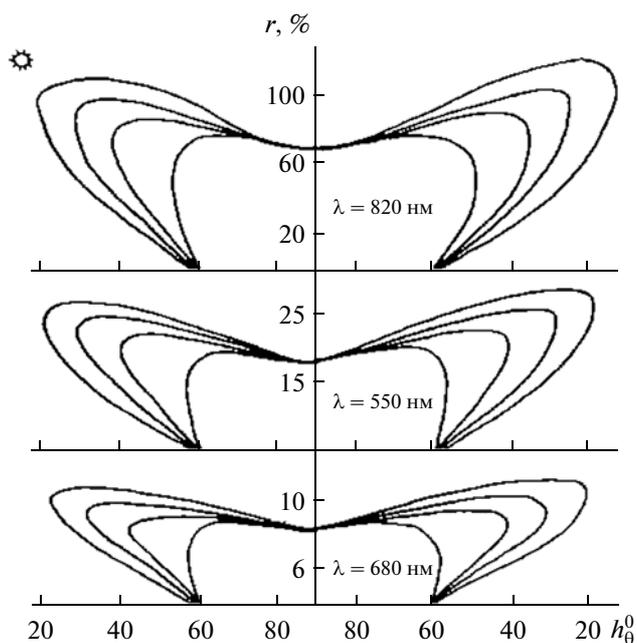


Рис. 5. Индикатрисы отражения посева пшеницы в стадии колошения при наблюдении в надир, в зависимости от угла Солнца  $h_0$ .

ми, влияющими на отражательную способность РП, являются, следующие: содержание фитопигментов, наземная фитомасса, архитектура растений, проективное покрытие в системе почва – растительность, метеорологические условия, фаза фенологического развития растения, высота Солнца  $h_0$  и угол визирования покрова.

#### Исследование поляризованных свойств растительности

Поляризованные характеристики излучения удобно определять из совокупности значений четырех величин параметров Стокса, которые имеют размерность интенсивности (яркости) и могут быть измерены (Борботько, Беляев, 2008; Кизель, 1973; Розенберг, 1955; Vanderbilt, 1985b). Если обозначить параметры Стокса  $I$ ,  $G$ ,  $U$ ,  $V$ , то для квазимонохроматического луча они могут быть выражены следующим образом:

$$I = (E_x^2 + E_y^2), \quad G = (E_x^2 - E_y^2), \\ U = (2E_x E_y \cos \delta), \quad V = (2E_x E_y \sin \delta),$$

где  $E_x$  и  $E_y$  – амплитуды составляющих электрического вектора вдоль осей  $O_x$  и  $O_y$  в прямоугольной системе координат, перпендикулярной к направлению распространения излучения;  $\delta$  – разность фаз между составляющими вдоль осей. Так как поляризационные характеристики определяются величинами, имеющими размерность яркости, то поляриметры конструктивно состоят из

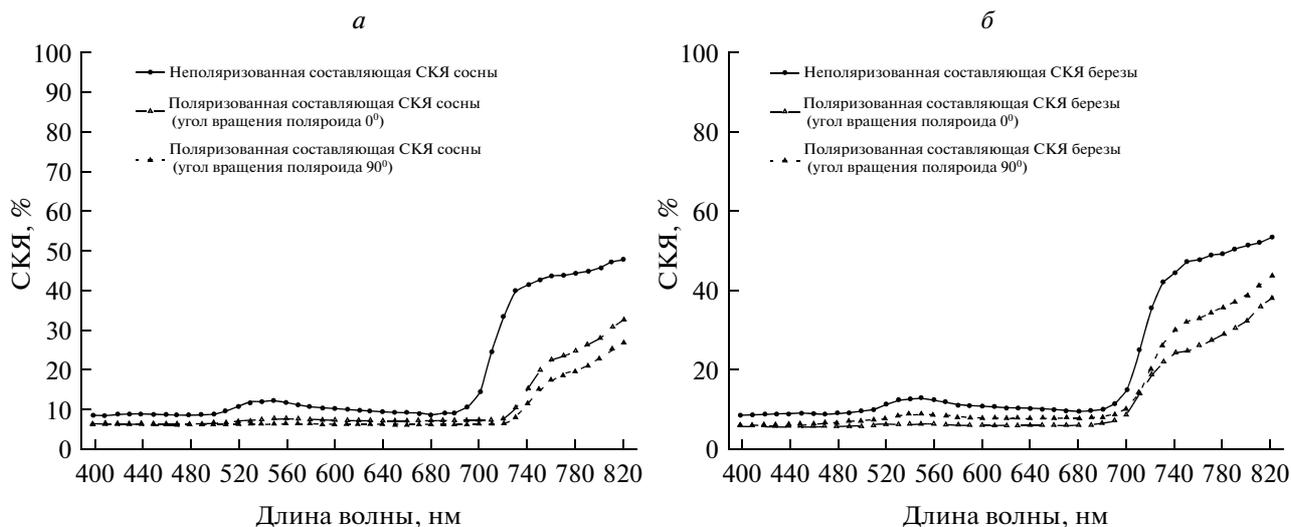


Рис. 6. Кривые СКЯ: *a* – сосны; *б* – березы.

тех же элементов, что и радиометры, используемые для измерения яркостных характеристик природных образований.

Широкое применение при дистанционном исследовании нашли поляриметры, в которых степень поляризации определяется методом амплитудной модуляции при вращении самого анализатора. На основании закона Малюса прошедшую через анализатор (поляроид) радиацию при его вращении можно представить в следующем виде:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

для плоско-поляризованного света  $I_{\min} = 0$  и  $P = 1$ , для естественного (неполяризованного) света  $I_{\max} = I_{\min}$  и  $P = 0$ .

Известно, что информация, которая содержит в себе поляризованную составляющую СКЯ РП, потенциально связана с физиологическими параметрами, видовым составом и фазой вегетации растений и в общем случае характеризует состояние растительности (Vanderbilt, 1985). При интерпретации аэрокосмической информации прямо или косвенно используются данные локальных спектрофотометрических измерений растительных объектов (спектральные портреты). Наземные дистанционные методы по чувствительности и точности определения спектрального состава излучения, отраженного от системы почва-растительность, намного превосходят результаты измерений, выполненных другими методами – фотографическими и спектрографическими (Выгодская, Горшкова 1987; Козодеров 2008; Черепанов, Дружинина, 2008).

Исследование степени поляризации рассеянного света, отраженного от РП, тесно связано с учетом оптических свойств их фитоэлементов (ли-

стья, хвоя, стебли и др. элементы), которые определяются характеристиками кутикулы поверхностей, покрытых слоем воска. Этот восковой слой в основном определяет структуру поверхности растительных тканей в микроскопическом масштабе. Эпикутикулярные кристаллы воска имеют различную геометрическую конфигурацию и могут быть упорядочено-ориентированы под различными углами к кутикуле листа, что и определяет поляризационные и рассеивающие свойства растений. Отраженный свет будет полностью поляризованным, если угол отражения совпадает с углом Брюстера ( $55^\circ$ ) (Розенберг, 1955; Suomalainen et al., 2009). При других углах наблюдения излучение, отраженное от РП, будет только частично поляризовано, а степень поляризации будет описываться формулами Френеля. Основной причиной поляризации рассеянного света фитоэлементами является отражение, поскольку при перемещении и изгибании листьев растений от солнечного света световое пятно на поверхности листьев смещается (Vanderbilt, 1985).

Зеркальная составляющая отраженного света от листьев будет зависеть от показателя преломления поверхностного слоя воска и его геометрической структуры. При дистанционном измерении поляризации от РП основным источником излучения является прямой солнечный неполяризованный свет. Зависимость поляризационной составляющей СКЯ ( $R_p$ ) от длины волны для зеленых растений не типична. Происходящие изменения структуры поверхности листьев влияют на оптические свойства отражения и рассеяния. На рис. 6 показаны типичные кривые СКЯ березы и сосны в июле.

Результаты измерений показали, что хвойные и лиственные древостои обладают схожими спек-

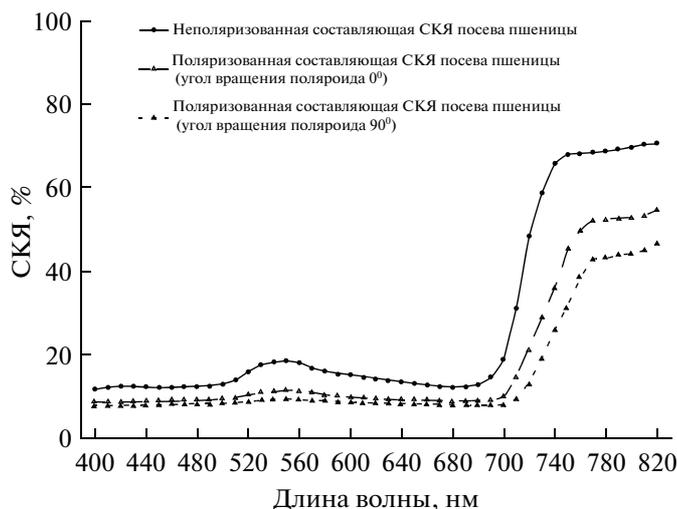


Рис. 7. Типичные спектры яркости посева пшеницы.

трами отражения поляризованного света. При этом у всех хвойных древостоев имеющих игольчатое строение кроны, поляризованная составляющая будет меньше, чем у лиственных. Хвойные древостои являются сильно рассеивающими объектами в обратном направлении, поэтому являются слабыми поляризаторами. Лиственные древостои (рис. 6б) имеют большую степень поляризованной составляющей  $R_p$  в обратном направлении, чем хвойные (рис. 6а). Так, в зеленой области спектра она составляет 15–25%, а в ИК-области составит 5–10%. Следует выделить в этом ряду осину, имеющую характерное своеобразное строение листа, которое увеличивает степень поляризации ее. Она будет больше на 8–10%. При вращении поляроида на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$  на канале измерения, СКЯ от объектов исследования носят одинаковый повторяющийся характер.

На рис. 7 приведены спектры яркости посева широколиственной пшеницы сорта “Равнина”, а на рис. 8 – травы под пологом леса. Кривые СКЯ травостоев и посевов с.-х. угодий имеют отличия от хвойных и лиственных древостоев. Так, посевы и травостои обладают высокими отражательными свойствами, даже при углах регистрации, близких к надиру. Регистрация спектров от объектов исследования производилась в направлении по лучу Солнца, чтобы избежать эффекта зеркальной составляющей. Спектры яркости с поляроидом (поляроид надет на канал измерения) представлены на рис. 7 и 8.

Результаты исследований показали, что травостои и посевы с.-х. культур обладают высокими отражательными свойствами. Поляризованная составляющая при  $0^\circ$  и  $90^\circ$  имеет тенденцию монотонно уменьшаться от коротковолновой области ( $\lambda = 400$  нм) до ближней ИК-области ( $\lambda = 820$  нм),

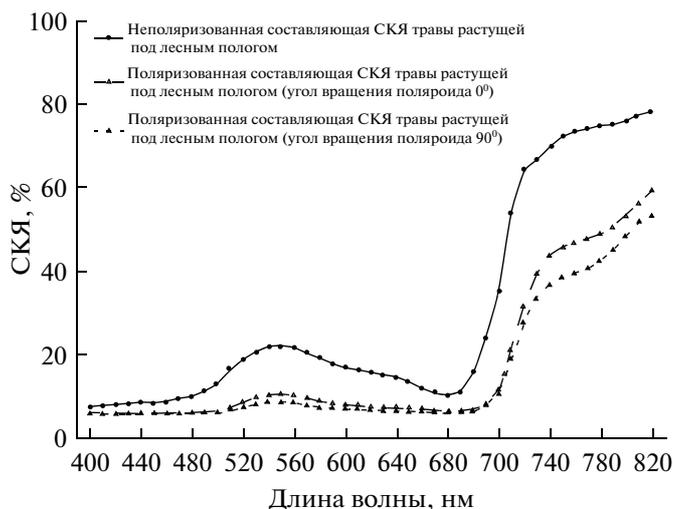


Рис. 8. Спектры яркости травы, растущей под пологом леса.

причем в большей степени в зеленой и красной областях спектра. Максимальные значения СКЯ могут колебаться от 20 до 35% от своих абсолютных значений.

На этом фоне посевы кукурузы следует выделить отдельно от остальных посевов с.-х. культур (рис. 9). Кукуруза обладает большой фитомассой, высоким содержанием хлорофилла ( $C_{хл} > 4.5$  мг/дм<sup>2</sup>) в листьях растений и высоким отражением. В спектральном диапазоне от 400 нм до 700 нм поляризационная составляющая при повороте поляроида в канале измерения на  $0^\circ$  и  $90^\circ$  изменения СКЯ практически отсутствуют (1–2%). В ближней ИК-области спектра  $>720$  нм поляризационная составляющая посевов кукурузы меня-

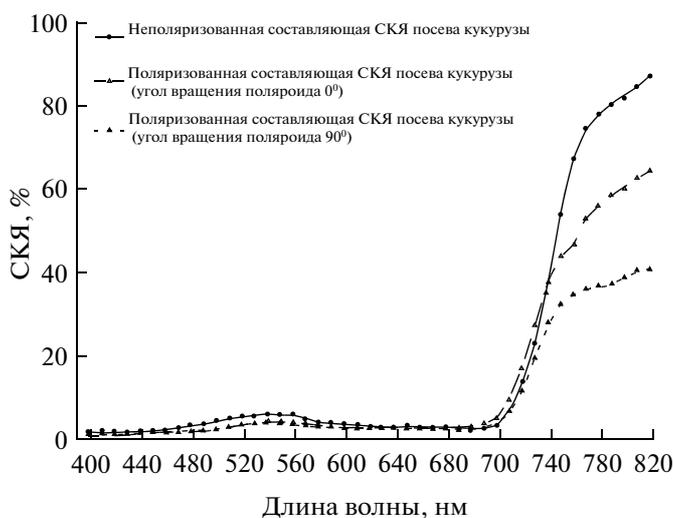


Рис. 9. Типичные спектры яркости кукурузы.

ется от 25 до 40%. Это обусловлено ее структурой и морфологией поверхности листа растения.

Результаты проведенных исследований показали, что необходимо продолжить измерения СКЯ поляризационной составляющей РП не только при углах, близких к надиру, но и под различными углами от линии горизонта. Несмотря на определенные успехи в области применения дистанционных методов при оценке состояния с.-х. посевов следует заметить, что сдерживающим фактором в их развитии является отсутствие комплексного экспериментального материала, полученного в полевых условиях в течение всего вегетационного периода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования спектрально-поляризованных характеристик растительных покровов показали, что неполяризованные измерения СКЯ растений несут в себе больше полезной информации, чем поляризованные. Поляризационная составляющая может служить дополнительной информацией по яркостным измерениям РП. Это позволит построить более надежные модели по динамике отражательной способности растительности в течение вегетационного периода.

Результаты работы представлены в следующих выводах:

1) показано, что основными факторами, влияющими на отражательную способность РП, являются морфофизиологические параметры, архитектура растений, высота Солнца  $h_0$  и угол визирования;

2) установлено, что минимум яркости посевов приходится на углы  $25^\circ$ – $30^\circ$  относительно надир. При увеличении угла визирования начинает проявляться эффект обратного блеска, особенно в красной и ИК-областях спектра, что приводит к резкому увеличению значений спектральных коэффициентов яркости в этих областях;

3) показано, что хвойные и лиственные древостои обладают схожими спектрами отражения поляризованного света. При этом у всех хвойных древостоев поляризованная составляющая будет меньше, чем у лиственных;

4) показано, что у широколиственных посевов с.-х. культур (кукуруза) поляризованная составляющая СКЯ оказывает наибольшее влияние на отражательную способность в красной и ИК-областях спектра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Борботько Т.В., Беляев Ю.В.* Спектрально-поляризационные свойства композиционного материала с наполнителем растительного происхождения // Журнал прикладной спектроскопии. 2008. Т. 75. № 3. С. 419–421.

*Выгодская Н.Н., Горшкова И.И.* Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 245 с.

*Кизель В.А.* Отражение света. М.: Наука, 1973. 351 с.

*Козодеров В. В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е. В. и др.* Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.

*Розенберг Г.В.* Вектор – параметр Стокса (матричные методы учета поляризации в приближении лучевой оптики) // Усп. физ. наук. 1955. Т. 56. № 1. С. 77–109.

*Сидько А.Ф.* Аппаратура высокого разрешения и результаты исследования растительности и водных поверхностей // Очерки экологической биофизики / Под ред. Т.Г. Воловой. Новосибирск: Наука, 2003. С. 356–370.

*Сидько А.Ф., Пугачева И.Ю., Шевырнов А.П.* Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края // ДАН. 2008. Т. 419. № 3. С. 417–420.

*Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматематика. 2009. № 3. С. 28–31.

*Gitelson A.A., Vin˘a A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L08403. doi:10.1029/2005GL022688.

*Pugacheva I.Yu., Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P.* A study of backscattered spectra dynamics of agricultural crops during growth period on the territory of the Krasnoyarskii Krai (Russia) // Adv. Space Res. 2010. V. 45. P. 1224–1230.

*Sid'ko A.* Remote assay for chlorophyll photosynthetic potential of crops on the example of wheat // Biol. Bull. 2004. V. 31. № 5. P. 450–456.

*Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P.* Seasonal dependence of the spectral brightness of agricultural crops on plant chlorophyll content and physiological parameters // Earth. Obs. Rem. Sens. 2000. № 16. P. 487–500.

*Suomalainen J., Hakala T., Puttonen E., Peltoniemi J.* Polarised bidirectional reflectance factor measurements from vegetated land surfaces // J. Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110. P. 1044–1056.

*Vanderbilt V.C., Grant T.L., Daughtry C.S.T.* Polarization of light scattered by vegetation // ТИИЭР. 1985а. Вып. 6. Т. 73. С. 72–85.

*Vanderbilt V.C., Grant T.L., Biehl L.L., Robinson B.F.* Specular, diffuse, and polarized light scattered by two wheat canopies // Appl. Optics. 1985b. V. 24. № 15. P. 2408–2418.

*Xinli H., Xingfa G., Tao Y., Qingyan M.* Polarized reflectance characteristics of plant canopies including atmospheric aerosol optical properties // Multispectral image acquisition and processing. Proc. SPIE. October 30, 2009. MIPPR, 2009. V. 7494. P. 749405-1-749405-8. doi:10.1117/12.831987.

## Spectral-Polarization Characteristics of Plant Cover in the Krasnoyarsk Territory on Land-Based Remote Sensing

A. F. Sidko<sup>1,2</sup>, I. Yu. Botvich<sup>1,2</sup>, T. I. Pisman<sup>1</sup>, A. P. Shevyrnogov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

The results of the study of reflection and spectral-polarization characteristics of forest stands, agricultural crops were obtained in the field. It is established that the minimum brightness of the crop accounts for the angles 25°–30° with respect to nadir. It is shown that coniferous and deciduous forest stands have similar reflection spectra of polarized light. At the same time in all conifer stands polarization component will be smaller than that of hardwood. It is shown that the broad agricultural crops (corn), the polarization component has a greater influence on the reflectance in the red and infrared spectral regions.

**Keywords:** spectral-polarization characteristics, agricultural plants, coniferous and deciduous forest stands, spectral brightness, polarization