

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ  
(МИИГАиК)**

Учебное пособие

## **Спектрометрирование ландшафта**

Рекомендовано УМО по образованию в области геодезии и фотограмметрии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 120200 «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» специальностей 120201 «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами» и 120202 «Аэрофотогеодезия»

МОСКВА 2010

УДК: 528.8; 528.914

*Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф.* Спектрометрирование ландшафтов.// Учебное пособие для студентов М.: Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010 г., 120 с.

В учебном пособии рассмотрены оптические свойства ландшафтов, методы и приборы для измерения отраженной и собственной радиации и спектральных характеристик природных объектов. Приведены особенности определения СКЯ основных классов природных объектов: почв, растительности, снежного покрова, водных поверхностей и воздушной дымки. Рассмотрены основные задачи определения спектральных отражательных свойств природных объектов по результатам многозональной аэрокосмической съемки.

Пособие рекомендовано кафедрой аэрокосмических съемок для студентов старших курсов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами», «Аэрофотогеодезия» и «Фотограмметрия и дистанционное зондирование».

Рецензенты: д. г-м наук, проф. Зверев А.Т.

к.т.н., проф. Шавенько Н.К.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	7
2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЯ ОТРАЖЕННОЙ И СОБСТВЕННОЙ РАДИАЦИИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	15
2.1. Измерение спектральных характеристик отражения.....	15
2.2. Приборы для измерения СКЯ.....	19
2.3. Метрологическое обеспечение измерений .....	29
3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА .....	39
3.1. Особенности спектрального отражения почвенного покрова и обнажений .....	39
3.2. Особенности коэффициентов спектральной яркости растительного покрова.....	46
3.3. Спектральные коэффициенты яркости растительных сообществ.....	52
3.4. Спектральные коэффициенты яркости воды и снега.....	67
3.5. Краткий обзор результатов исследований влияния различных факторов на СКЯ растительного покрова.....	71
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ.....	78
4.2. Алгоритмы решения основных фотометрических задач.....	83
4.3. Подготовка исходных данных для фотометрических расчетов.....	86
4.4. Инструментальные и машинные денситометрические измерения.....	95
4.5. Методика автоматизированного решения обратных фотометрических задач.....	99
4.6. Точность фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки ....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	109
ЛИТЕРАТУРА.....	111
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	112

## Список основных обозначений и сокращений

БИК	-	ближний инфракрасный диапазон
РП	-	растительный покров
СКО	-	спектральный коэффициент отражения
СКЯ	-	спектральный коэффициент яркости
СПЭЯ	-	спектральная плотность энергетической яркости
СС	-	съёмочные системы
СФ	-	спектрофотометр
СХО	-	спектральная характеристика отражения
РП	-	растительный покров
$\Phi$	-	поток излучения
ФПМ	-	функция передачи модуляции
$V$	-	яркость элементов ландшафта
$r$	-	интегральный коэффициент яркости
$E$	-	освещенность местности
$H$	-	количество освещения (экспозиция)
$D$	-	оптическая плотность
$K$	-	контраст
$\tau$	-	коэффициент пропускания
$q$	-	альбедро
$\hat{P}$	-	статистическое (выборочное) значение вероятности не- которого события
$P$	-	вероятность некоторого события
$\sigma_i$	-	среднеквадратическое отклонение $i$ -ой случайной ве- личины
$S_i$	-	статистическое (выборочное) значение среднеквадра- тического отклонения $i$ -ой случайной величины

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектральных отражательных свойств ландшафта является одним из основных элементов в изучении природной среды аэрокосмическими методами. Нельзя проектировать съемочные системы, а тем более прогнозировать результаты ДЗЗ без знания спектральных характеристик природных образований в области отражения, пропускания и поглощения падающего на них солнечного излучения.

Научные исследования в спектральных характеристик природных объектов были начаты в 30-х годах прошлого века. Первая и наиболее полная классификация объектов ландшафта по спектральным отражательным характеристикам в «фотографическом», видимом диапазоне длин волн 0,40 – 0,85 мкм была разработана в лаборатории аэрометодов под руководством Е.Л.Кринова только в 1947 году.

Эта спектрофотометрическая классификация природных образований широко применяется до сих пор. В настоящее время в литературе не имеется более поздних обобщенных данных спектральных коэффициентов яркости по всем видам природных образований, как это сделано Е.Л.Криновым. Более поздние измерения содержат еще меньший объем наименований [10, 12, 13 и др.]. Опубликованные данные по этому вопросу имеют очень скромные тиражи и, как правило, не доступны широкому кругу читателей и, в первую очередь студентам. Данное методическое пособие ставит задачу широкого конспективного рассмотрения теории и методов определения спектральных характеристик природных объектов для целей их изучения дистанционными фотографическими методами.

Осуществление мультиспектральных аэрокосмических съемок поверхности Земли с целью последующего тематического дешифрирования результатов фотографирования требует глубоких знания спектральных характеристик природных образований. Получением спектральных характеристик природных объектов и их интерпретацией занимается спектрометрия, разрабатывающая теорию и методы измерения спектров. Так как, данное пособие предназначено для будущих специалистов в области исследования природ-

ных ресурсов, то в пособии изложены различные способы (наземные, воздушные и космические) спектрометрирования природных объектов и факторы, влияющие на точность определения этих параметров.

В настоящее время нет учебного пособия доступного студенту по вопросам оптических характеристик земных объектов и способам их определения. Учитывая то, что вопросы яркостных характеристик ландшафта не рассматриваются в других курсах авторы сочли нужным изложить основы отражательных свойств природных объектов, а также решение обратной задачи по определению этих характеристик по аэрокосмическим фотоизображениям.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов обучающихся по специальностям исследование природных ресурсов и аэрофотогеодезия.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Отражательные свойства природных и искусственных объектов, как правило, описываются с помощью спектральных коэффициентов отражения (СКО) [15]. Функции спектрального коэффициента отражения различных природных образований описываются кривыми, обобщенный вид которых, приведён на рисунке 1.1. Согласно классификации Е.Л.Кринова [6] все природные образования с их характерными спектральными характеристиками отражения разделены на три класса. На приведенном рисунке римскими цифрами обозначен класс объектов, арабскими – тип объектов.

Класс I – обнажения, почвы – включает в себя четыре типа: тип 1 - почвы чернозёмные и супесчаные, грунтовые дороги и т.п.; тип 2 - почвы оподзоленные суглинистые, шоссезные дороги, некоторые типы строений; тип 3 - пески, обнажения пустынь, горные породы; тип 4 - известняки, глина, различные светлые объекты.

Для спектральных кривых  $r_\lambda$  этого класса характерным является постепенный подъем в сторону длинных волн, типы поверхностей различаются наклоном кривых  $r_\lambda$ .

Класс II - растительные образования - объединяет четыре типа поверхностей: тип 1 - хвойные породы лесных насаждений в зимний период; тип 2 - хвойные породы лесных насаждений в летний период, суходольные луга, травяные породы с недостаточно сочной растительностью; тип 3 - лесные насаждения лиственных пород в летний период, травяные покровы с густой солнечной растительностью; тип 4 - лесные насаждения в период осенней раскраски и созревшие (пожелтевшие) полевые культуры.

Для поверхностей этого класса характерен максимум в области 0,55 мкм, минимум в пределах главной полосы поглощения хлорофилла (0,66-0,68 мкм), за которым следует резкий подъем в сторону длинных волн с максимумом примерно для длины волны  $\lambda = 0,8-1,0$  мкм, типы поверхностей этого класса в основном отличаются величиной  $r_\lambda$  для этой области спектра.

Класс III - водные поверхности, водоемы и снеговой покров - объединяет три типа: тип 1 - снег, покрытый ледяной коркой; тип 2 - свежеснегов-

ший снег; тип 3 - водная поверхность под некоторым, достаточно большим углом к нормали, т. е. отражающая голубое небо.

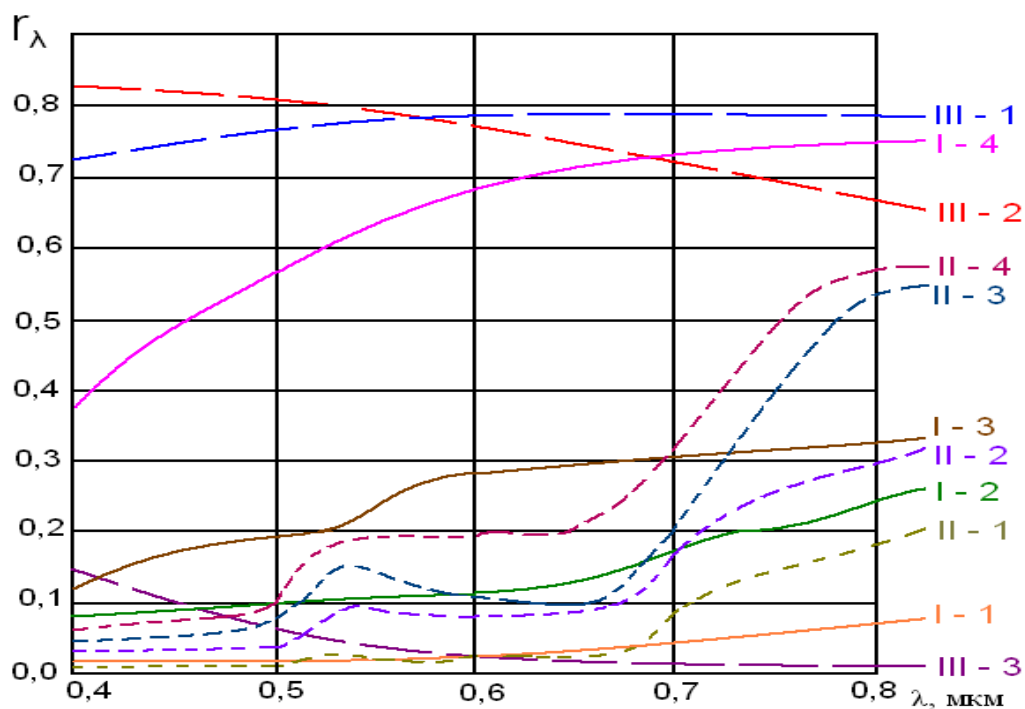


Рис.1.1. Основные спектральные классы природных объектов по Е.Л.Кринову [6]

Объекты третьего класса отличаются относительно небольшими изменениями  $r_\lambda$  в зависимости от длины волны. Причем для снежных покровов отмечается некоторое уменьшение величины  $r_\lambda$  в сторону коротких длин волн и более сильное уменьшение в сторону длинных длин волн по отношению к максимальному значению в области длин волн  $\lambda = 0,5-0,7$  мкм, где изменения  $r_\lambda$  практически отсутствуют. Коэффициенты яркости водных поверхностей весьма малы и незначительно (примерно до 4%) изменяются по спектру.

Приведенные спектральные характеристики природных объектов применяются как к отдельным элементам, образующим естественный покров данной местности, так и к целым ландшафтам. Например, при наличии снегового покрова весь ландшафт приобретает свойства, присущие объектам третьего класса. Пустыни, выжженные степи, голые скалы и области умеренного пояса ранней весной или поздней осенью, когда преобладает желто-бурая окраска могут быть отнесены к первому классу, а области, покрытые зеленой растительностью, - ко второму классу. Приведённая спектрофото-



метрическая классификация природных образований отражает лишь общие закономерности, которые в каждом конкретном случае уточняются в зависимости от условий освещения, состояния поверхности и т. д.

В середине прошлого века происходило бурное развитие техники дистанционных средств зондирования земной поверхности и атмосферы, работающих в диапазонах длин волн более 1,0 мкм. Это потребовало тщательного изучения спектральных отражательных свойств природных объектов в ближнем (0,85÷1,50 мкм), среднем (1,50÷3,50 мкм) и дальнем (3,50÷15,00 мкм) инфракрасных диапазонах длин волн, в том числе, с учетом излучательных свойств самих объектов. Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать спектральным коэффициентом яркости (СКЯ).

СКЯ  $r_\lambda(\theta, \Delta\phi, h_{\odot}, E_\lambda)$  - это фотометрическая функция, характеризующая структуру отраженного поверхностью (объектом) излучения, как по длинам волн  $\lambda$ , так и по условиям наблюдения и освещения. Условия наблюдения определяются (см. рис.1.2) надирным углом сканирования (наблюдения)  $\theta'$  и азимутальным углом между вертикалями сканирования и источника освещения (Солнца)  $\Delta\phi$ , который отсчитывается от направления на источник. Условия освещения обычно определяются углом высоты Солнца  $h_{\odot} = 90^\circ - Z_{\odot}$ , где  $\theta = Z_{\odot}$  - надирный угол освещения или зенитный угол Солнца, и спектральной освещенностью объекта  $E_\lambda = S_\lambda + D_\lambda$ , где  $S_\lambda$  и  $D_\lambda$  - спектральные освещенности соответственно прямой и рассеянной солнечной радиацией, выраженные в Вт/м<sup>2</sup> мкм.

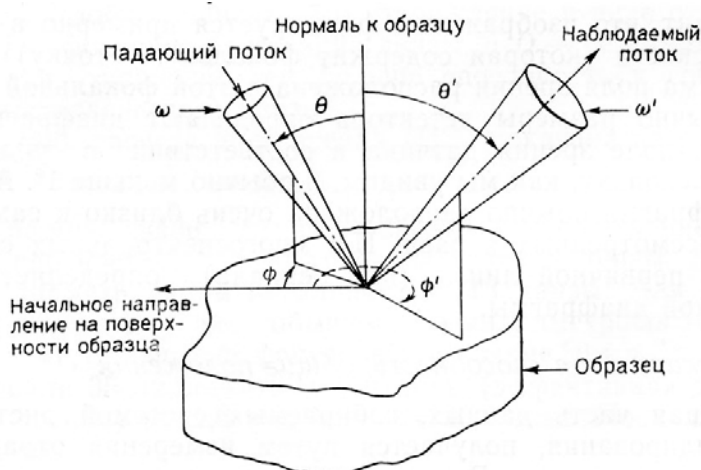


Рис.1.2. Геометрия измерения СКЯ освещенного Солнцем

По определению, СКЯ есть отношение спектральной плотности энергетической яркости исследуемой поверхности  $\mathbf{B}_\lambda(\theta, \varphi, \mathbf{E}_\lambda)$  к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей эталонной поверхности  $\mathbf{B}_\lambda(\theta', \varphi_{\odot})$  т.е.

$$\mathbf{r}_\lambda(\theta, \Delta\varphi, E_\lambda) = \mathbf{B}_\lambda(\theta, \varphi_{\odot}, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda) / \mathbf{B}_{0\lambda}(E_\lambda). \quad (1.1)$$

Определение СКЯ предполагает строгое обеспечение одинаковых условий освещения исследуемой и эталонной поверхностей. В выражении (1.1)  $\mathbf{B}_\lambda$  выражена в  $(\text{Вт м}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ мкм}^{-1})$ . В дальнейшем вместо выражения «спектральная плотность энергетической яркости» мы будем применять термины «энергетическая яркость» или просто «яркость».

Яркость идеального эталона постоянна при любых значениях углов  $\theta$ ,  $\varphi_{\odot}$  и зависит только от освещенности  $\mathbf{E}(\lambda)$ :

$$\mathbf{B}_\lambda^{\text{ид.эт.}} = \mathbf{E}(\lambda) / \pi. \quad (1.2)$$

Зная СКЯ реального объекта, можно найти его спектральную яркость через освещенность  $\mathbf{E}_\lambda$ :

$$\mathbf{B}_\lambda(\theta, \varphi_{\odot}, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda) = \mathbf{r}_\lambda(\theta, \Delta\varphi_{\odot}, h_{\odot}, E_\lambda) \mathbf{E}_\lambda / \pi \quad (1.3)$$

Следует отметить, что как природные объекты, так и эталонные поверхности, применяемые при измерениях СКЯ (молочные стекла, работающие на отражение или пропускание, баритовая бумага) по своим отражательным свойствам отличаются от диффузных рассеивателей, а учет неортоотропности эталонов является весьма сложной проблемой в теории и практике фотометрии. В дальнейшем будет показано, что только при определенных условиях отражательные свойства некоторых поверхностей можно принимать не зависящими от углов  $\theta$ ,  $\varphi_{\odot}$ .

Таким образом, особое значение имеет структура поверхности исследуемого природного образования, определяющая пространственное распределение отраженной поверхностью радиации. Условно можно выделить четыре типа поверхностей [10] (рис. 1.3).

**Ортотропные поверхности**, отражающие падающий на них поток диффузно, или равномерно, во всех направлениях. В видимой области ортотропными поверхностями являются пески, рыхлый снег. В СВЧ - области (например, при получении изображений с помощью РЛС бокового обзора) диффузно отражают большие каменные осыпи.

**Зеркальные поверхности**, отражающие падающий на них поток преимущественно в плоскости падающего луча и под углом, равным углу падения. В видимой области к таким поверхностям можно отнести чистый лед, сухие каменные поверхности, обнаженный скальный грунт. В радиодиапазоне зеркальное отражение характерно для глинистых почв, водных поверхностей. Необходимо иметь в виду, что по способу отражения падающей радиации эти поверхности отличаются от идеально отражающих.

**Антизеркальные поверхности**, отражающие максимально в направлении к источнику излучения. Такое отражение типично для сельскохозяйственных культур, лугов и другой растительности.

**Комбинированные поверхности**, обладающие двумя максимумами отражения — зеркальным и антизеркальным. Таким способом отражают рисовые поля, покрытые росой луга и т.д.

Способность поверхностей отражать упавшую на них радиацию характеризует индикатриса отражения (рис. 1.3.).

Каждая из четырех типов отражающих поверхностей характеризуется своей индикатрисой отражения. Ортотропная поверхность имеет индикатрису, описываемую полусферой. Индикатрисы других типов отражающих поверхностей можно аппроксимировать комбинацией полусферы и части эллипсоида [5].

С учетом решения практических задач дистанционных исследований наибольший интерес представляют сведения о СКЯ поверхностей при наблюдении вертикально вниз, в надир. Надирные значения СКЯ объекта не зависят от азимутального угла  $\varphi_{\odot}$  и определяются только условиями освещения: высотой Солнца  $h_{\odot}$  и освещенностью  $E_{\lambda} = S_{\lambda} + D_{\lambda}$ .

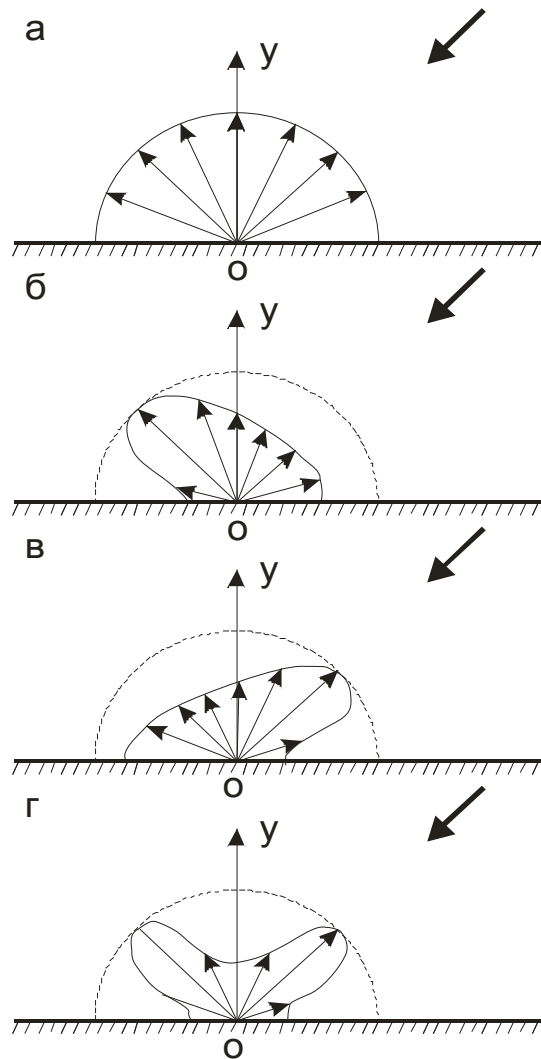


Рис. 1.3. Вид индикатрис различных типов поверхностей.  
а - ортотропная; б - зеркальная; в - антизеркальная; г - комбинированная.

Угловая структура яркости поверхностей описывается спектральными индикатрисами яркости  $\gamma_\lambda(\theta, \Delta\varphi, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda, z)$ , которые удобно представлять как отношения сигналов, пропорциональных яркости в направлении  $\theta, \varphi$ , к сигналам, пропорциональным яркости в надире:

$$\gamma_\lambda(\theta, \Delta\varphi, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda, z) = \mathbf{B}_\lambda(\theta, \Delta\varphi, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda, z) / \mathbf{B}_\lambda(\theta=0, h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda, z), \quad (1.4)$$

где  $z = (90^\circ - \theta')$  - высота наблюдения;

$\varphi_\lambda \sim B_\lambda$  - ординаты сигналов измерительной аппаратуры, выраженные, например, в мм, на ленте регистратора.

Через спектральные индикатрисы яркости рассчитываются спектральные коэффициенты анизотропии поверхностей  $k_\lambda$  для фиксированных,  $h_{\odot}, \mathbf{E}_\lambda, z$ :

$$k^A_\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi_\ominus=0}^{2\pi} \gamma_\lambda(\theta, \varphi_\ominus) \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi_\ominus. \quad (1.5)$$

Спектральный коэффициент анизотропии позволяет связать спектральное альbedo поверхности  $A_\lambda$  с ее СКЯ в надире:

$$k^A_\lambda = A_\lambda / r_{\lambda(\theta=0)}. \quad (1.6)$$

Под альbedo поверхности понимают отношение восходящего потока излучений  $F_{\lambda\uparrow}$  к нисходящему  $F_{\lambda\downarrow}$ , то есть  $A_\lambda = F_{\lambda\uparrow} / F_{\lambda\downarrow}$  выражается в Вт м<sup>-2</sup> мкм<sup>-1</sup>. В случае ортотропных поверхностей  $k^A_\lambda = 1$ ,  $F_{\lambda\uparrow} = \pi B_\lambda$  и  $A_\lambda = r_\lambda$  [10].

Сведения о спектральных индикатрисах и коэффициентах анизотропии определенных типов природных объектов позволяют использовать для оценок величин СКЯ поверхностей многочисленные данные о спектральном альbedo, измеренные аппаратурой с полусферическими полями зрения, и наоборот, по данным о СКЯ оценивать альbedo территорий [4, 5, 7, 15].

СКЯ объектов ландшафта, облаков и воздушной дымки зависят от физико-химических свойств элементов этих объектов, температуры, влажности, а растительных покровов - и от фенофазы, сезона года, пространственной структуры, проективного покрытия, композиционного состава (если пространственное разрешение аппаратуры больше размеров разнородных частей объекта) и других факторов. Поэтому одной из главных задач исследования оптических свойств природных объектов и растительного покрова, в частности, является определение эмпирических зависимостей СКЯ этих объектов от разных факторов, влияющих на их изменчивость.

Полные функциональные описания вариаций СКЯ природных объектов от различных влияющих факторов принято называть каталогами СКЯ. Справочники или иные описания, не содержащие полной информации о зависимости СКЯ от факторов, влияющих на их изменчивость, и не обеспеченные статистически значимыми рядами исходных данных, целесообразно называть атласами СКЯ. Исследования оптических свойств ландшафта и результаты практического использования многозональной съемки показали, что при со-

ставлении атласов и каталогов СКЯ необходимо учитывать особенности географо-климатического районирования Земного шара. Данная проблема решается при разработке карт распределения СКЯ [13, 15].

Очевидно, что каталоги и атласы СКЯ поверхностей необходимы при создании аппаратуры дистанционных исследований Земли и атмосферы, при обработке данных многозональной съемки, при моделировании наблюдаемости объектов и при решении других научных и прикладных задач. В настоящее время исследователям, которым необходимы данные по спектральным характеристикам природных объектов, доступны ИНТЕРНЕТ-ресурсы этих данных, накапливающихся на соответствующих сайтах [XX] в виде библиотек данных.

## 2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЯ ОТРАЖЕННОЙ И СОБСТВЕННОЙ РАДИАЦИИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

### 2.1. Измерение спектральных характеристик отражения.

Для измерения спектральных характеристик отражения (СХО) различных природных образований используются спектрометры - яркомеры различных конструкций, определяющие значения  $\mathbf{B}_\lambda(\theta, \Delta\varphi, \mathbf{E}_\lambda)$  и  $\mathbf{B}_{0\lambda}(\mathbf{E}_\lambda)$ . По этим значениям в зависимости от конструкции прибора вычисляется или непосредственно отсчитывается  $\mathbf{r}_\lambda(\theta, \Delta\varphi, \mathbf{E}_\lambda)$

Эталонные поверхности. Для измерения значений радиации  $B_o(\lambda)$  используется эталонная поверхность, представляющая собой экран с ортотропной отражающей поверхностью и заранее известной спектральной отражательной характеристикой в исследуемом спектральном диапазоне  $\lambda_{\text{макс}} - \lambda_{\text{мин}}$ . Выбор эталонного экрана имеет существенное значение, поскольку от его качества (метрологических характеристик) в большой степени зависит точность измерения СХО.

С учетом свойств (метрологических характеристик) эталонной поверхности выражение для СХО принимает вид:

$$\mathbf{r}(\lambda, \theta, \Delta\varphi, \mathbf{E}_\lambda) = [\mathbf{B}_\lambda(\theta, \Delta\varphi, \mathbf{h}_\lambda) / \mathbf{B}_{0\lambda}(\lambda, \theta, \mathbf{E}_\lambda)] / K_\chi(\lambda, \theta, \Delta\varphi, \mathbf{h}_\lambda), \quad (2.1)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий изменение чувствительности прибора в ходе измерения, изменение шкалы измерения и т.д.;

$K_\chi$  - коэффициент, учитывающий спектральные свойства индикатрисы реальной эталонной поверхности.

В качестве эталонных поверхностей обычно используются экраны, покрытые окисью магния или сульфатом бария, гипс, баритовая бумага, молочное или матовое стекло и т.д. Наиболее близким по своим оптическим свойствам к идеальной ортотропной поверхности является покрытие из окиси магния ( $\text{MgO}$ ), нанесенное на пластину из светлого материала посредством сжигания чистого  $\text{Mg}$ . Однако сложная технология, плохие механические свойства и т.п. обусловили применение такого типа экранов только в лабораторных условиях [10]. Сравнительно широкое применение находит баритовая

бумага, которая обладает хорошей ортотропностью, почти равномерной спектральной отражательной характеристикой и достаточно высоким спектральным коэффициентом отражения, но требует осторожного обращения в полевых условиях, так как ее параметры сильно меняются под воздействием Солнца. В последнее время широкое применение находят молочные стекла МС-13 (работающие на пропускание) и МС-14 (работающие на отражение).

На рис. 2.1 представлены спектральные характеристики чаще всего используемых эталонных поверхностей.

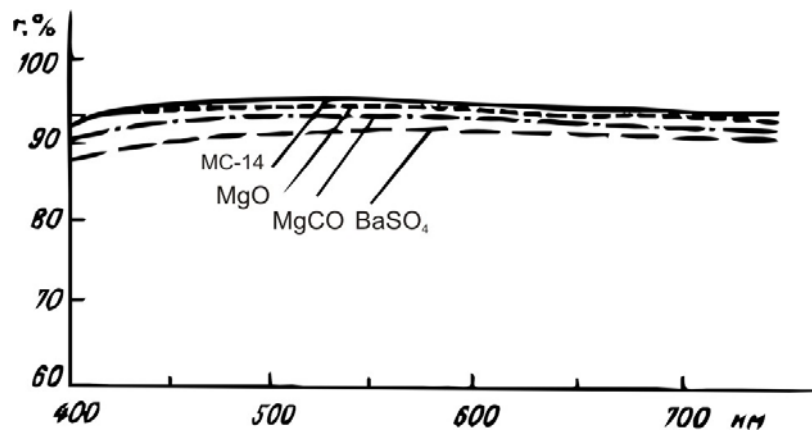


Рис. 2.1. Спектральные отражательные характеристики чаще всего используемых эталонных поверхностей.

Формирование интерпретационного класса. Важным условием при измерении спектральных отражательных характеристик является оптимальный линейный размер  $l_{\text{опт}}$  элемента пространственного разрешения на поверхности природного объекта. Нижняя граница, т.е. минимальная длина  $l_{\text{мин}}$  интервала определяется техническими характеристиками устройств измерения спектральных отражательных характеристик. Верхняя граница, т.е. максимальная длина  $l_{\text{мах}}$ , определяется задачами интерпретации данных и возможностями обработки полученной спектральной информации.

Известно, что устройства измерения спектральных отражательных характеристик интегрируют отраженную радиацию в пределах одного пикселя  $S_{\text{pix}} = l_{\text{опт}} \cdot l_{\text{опт}}$ . В общем случае изменение размера пикселя  $S_{\text{pix}}$  приводит к изменению значения интеграла.

$$k \cdot \int_{S_{\text{pix}}} L \, dS = E_{\text{pix}} \quad (2.2)$$



Если исследуемый участок земной поверхности покрыт однородными в спектральном отношении образованиями (т.е. образованиями одного и того же спектрального класса), то при изменении  $S_{pix} \cdot E_{pix} = const$ , точнее, в реальном случае  $E_{pix}$  будет переменной с небольшой дисперсией (рис. 2.2). Это значит, что в зависимости от размера  $l$  спектральный коэффициент отражения будет изменяться относительно некоторого среднего значения с небольшими отклонениями, образуя плато.

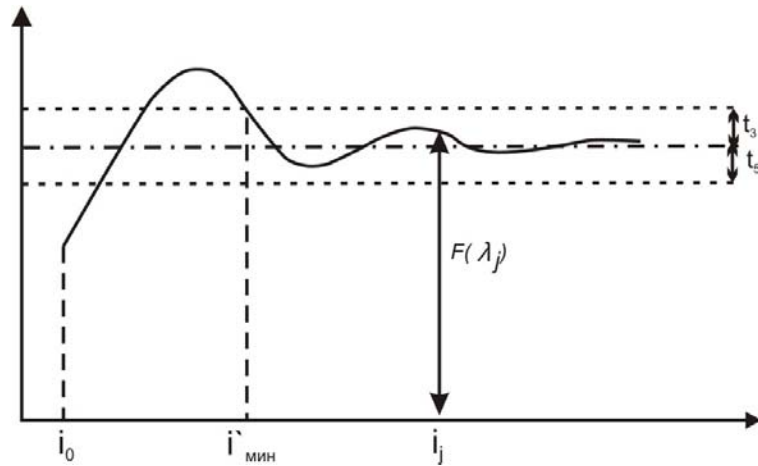


Рис. 2.2. Изменение спектрального коэффициента отражения в зависимости от линейного размера пикселя.

Зависимость  $E_{pix}(l)$  может иметь больше чем одно плато, и это будет означать, что с интерпретационной точки зрения на исследуемом участке земной поверхности находятся объекты, принадлежащие нескольким спектральным классам.

Очевидно, что  $l_{мин}$  должно соответствовать началу плато, выбранному в соответствии с некоторым критерием, например, исходя из доверительного интервала, соответствующего отдельному пикселю. Оптимальный размер  $l_{опт}$  определяется неравенством

$$l_{опт} \geq l_{мин}, \quad (2.3)$$

где знак « $\geq$ » соответствует наличию дополнительных условий, например интегрированию спектрального коэффициента отражения в пределах нескольких пикселей с целью уменьшения количества обрабатываемых данных, причем, естественно,

$$I_{\text{опт}} \leq I_{\text{кр}}, \quad (2.4)$$

где  $I_{\text{кр}}$  - верхняя граница  $I$ , соответствующая концу плато, если такое было зарегистрировано в ходе измерения. При наличии более чем одного плато интерпретатор выбирает, в котором из них определить размер пикселя. Природные образования, в том числе, растительный покров являющиеся объектом многоспектрального анализа, представляют собой статистические объекты, т.е. их спектральные характеристики, принадлежащие одному и тому же классу объектов, различаются между собой в пределах, ограниченных дисперсией, специфической для данного класса и отличной от нуля. То же самое относится и к плато, которое является по существу выражением существования устойчивой среднеарифметической характеристики (математического ожидания) в пределах данного класса. Поэтому стационарная высота плато является также статистической величиной и необходимо определять не только ее значение, но и доверительный интервал. Попадание в этот доверительный интервал является необходимым условием для того, чтобы сделать вывод о достижении  $I_{\text{мин}}$ . Чтобы избежать опасности случайного попадания, необходимо  $I_{\text{мин}}$  определять как линейный размер пикселя, для которого хотя бы несколько раз (во всех каналах) значение  $\tau(\lambda)$  больше значения, соответствующего  $I_{\text{мин}}$  (рис. 2.2).

Увеличения размера  $I$  для попадания в плато можно достичь двумя способами [10]:

- вторичной обработкой изображения исследуемого участка земной поверхности с объединением соседних пикселей;
- увеличением высоты, с которой измеряются спектральные отражательные характеристики, либо увеличением угла поля зрения измерительного устройства.

Первый способ легко использовать для предварительного определения  $I_{\text{мин}}$  на основе уже полученных изображений или данных полигонных измерений; второй способ удобен для определения  $I_{\text{мин}}$  в ходе эксперимента, но его недостатком является потеря информации об отдельных пикселях (и со-

ответственно о дисперсии исследуемого класса), так как с увеличением высоты или поля зрения происходит интегрирование потока отраженной радиации по большей поверхности. Из-за этого доверительный интервал плато определяется труднее и с меньшей уверенностью.

*Виды параметров плато.* Согласно центральной предельной теореме математической статистики, когда исследуемый участок земной поверхности занят одним классом, амплитуда  $r_\lambda$  плато асимптотически стремится к математическому ожиданию  $\mu_\lambda$  (рис. 2.2).

Для конечного числа пикселей  $n_{j\lambda}$  амплитуда определяется следующим образом:

$$r_{j\lambda} = \sum_{i=1}^{n_{j\lambda}} \frac{r_{ij\lambda}}{n_{j\lambda}}, \quad (2.5)$$

где  $\lambda$  - индекс соответствующего канала;

$r_{ij\lambda}$  - показание в этом канале для  $j$ -го значения  $l$ .

Если класс имеет нормальное распределение [10], то доверительный интервал  $\mu_\lambda$  описывается выражением

$$\mu_{\lambda j} = r_{j\lambda} \pm t_{j\lambda} \cdot \frac{S_{j\lambda}}{\sqrt{n_{j\lambda}}}, \quad (2.6.)$$

где  $\lambda = 1, 2, \dots, N$  — число каналов;  $S_{j\lambda}$  - оценка дисперсии класса, при-

чем

$$S_{j\lambda} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{j\lambda}} \frac{(r_{ij\lambda} - r_{j\lambda})^2}{n_{j\lambda}}} \quad (2.7)$$

$t_{j\lambda}$  - коэффициент Стьюдента (из таблицы Стьюдента для заданных  $n_{j\lambda}$  и уровня значимости  $\alpha$ ).

## 2.2. Приборы для измерения СКЯ.

Инструментальному (и метрологическому) обеспечению спектрометрических измерений всегда уделялось особое внимание, поскольку от этого

зависит вся методика получения спектральных коэффициентов яркости изучаемых объектов. Приборы для измерения СКЯ разрабатывались как для лабораторных и полевых измерений, так и для измерений СКЯ с борта летательных аппаратов, в том числе и космических. Основные разработки в этом направлении были реализованы в 1940 – 1990-х годах. Достаточно полный обзор достижений в этой области дан в [10]. В качестве примеров ниже мы рассмотрим несколько конструкторских решений, широко применявшихся в эти годы в нашей стране и ближнем зарубежье на рубеже 90-х годов прошлого века. Подробности можно найти в [8, 10, 15]

Исследования оптических характеристик объектов ландшафта, облаков и атмосферы в диапазоне 400 - 2500 нм как правило проводились с помощью призмных спектрометров типа СПИ [XX]

В монохроматорах 2 приборов типа СПИ, построенных по схеме Литрова [88], (рис.2.3), для повышения быстродействия и расширения спектрального диапазона установлено две выходных щели 4 и 5.

В качестве приемников излучений 6 и 7 применяются фотоэлектронные умножители (поддиапазон 400 - 1000 нм) и сернисто-свинцовые фотосопротивления (поддиапазон 530 - 2500 нм). Перед входной щелью I установлены модулятор световых потоков 3, объектив 8 и устройство для периодической записи лампы сравнения 19 с помощью экрана 20. От приемников излучений 6 и 7 электрические сигналы поступают на усилители 9 и 10, на выходах которых имеются синхронные детекторы. Опорные сигналы вырабатываются устройствами II - 16. Регистрация сигналов выполняется на бумажной фотоленте с помощью шлейфного осциллографа 17. На этой же ленте фиксируются метки длин волн, вырабатываемые устройством 18, которое связано с механизмом развертки спектра. Каждый измерительный канал имеет по три оконечных каскада с различными коэффициентами усиления, благодаря чему обеспечивается регистрация сигналов, отличающихся на два порядка величины. В комплект аппаратуры входит бортовая эталонная пластина 23. На самолетах используется поворотная головка с зеркалом 22.

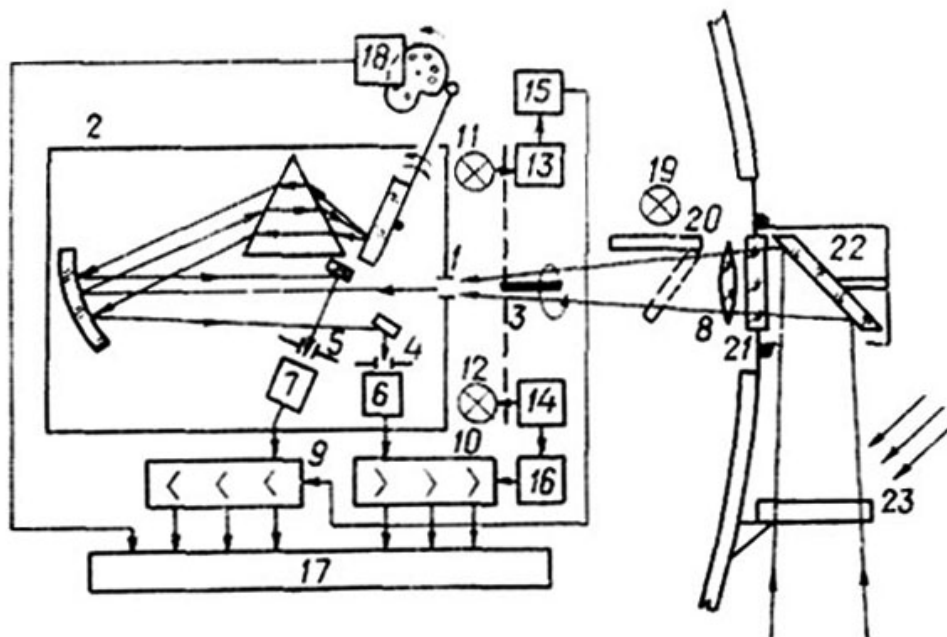


Рис.2.1. Принципиальная схема самолетных призмных спектрометров СПИ-74:

1 - входная щель монохроматора; 2 - монохроматор; 3 - модулятор световых потоков; 4,5 - выходные щели; 6,7 - приемники излучений видимого и ближнего ИК каналов; 8 - входной объектив; 9,10 - усилители; 11,12 - лампы; 13,14 - приемники излучений; 15,16 - усилители опорных сигналов; 17 - регистратор сигналов; 18 - датчик меток длин волн; 19 - лампа; 20- экран канала сравнения; 21 - стекло иллюминатора; 22 - зеркало оптической поворотной головки; 23 - эталонная пластина

Углы поля зрения самолетных спектрометров СПИ-74 [76] составляют  $0,5 \times 5^\circ$ . Вертолетный вариант спектрометра СПИ-2В, с помощью которого получено подавляющее число данных о СКЯ, представленных в настоящей работе, имеет углы поля зрения  $2,5 \times 5^\circ$ . При наблюдении с различных высот  $Z$  этот спектрометр регистрирует излучения, поступающие от элементов ландшафта, имеющих следующие размеры по длине  $X$  и ширине  $Y$

$Z, \text{ м}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$X, \text{ м}$	...0,85	1,69	2,54	3,93	4,24	5,08	5,93	6,78	7,63
$Y, \text{ м}$	...0,44	0,89	1,33	1,78	2,20	2,67	3,11	3,55	3,99.

Для наведения прибора на объект используется открытый визир.

Период записи одного спектра равен 1,5 - 2,0 с. Спектральная ширина щели  $\Delta\lambda$  аппаратуры на длинах волн 400, 500, 700, 1000, 1500 и 2500 нм составляет соответственно 5, 12, 20, 40, 80 и 100 нм. Погрешность определения длины волны равна половине спектральной ширины щели:  $\Delta\lambda/2$ . Калибровка по длинам волн выполняется с помощью цветных стекол ПС-7 и ЗС-7 и по спектру пропускания атмосферы. Суммарная относительная погрешность оп-

ределения интенсивности (ординат) сигналов, пропорциональных спектральной яркости измеряемого объекта, с помощью приборов СПИ-74 и СПИ-2В составляет 0,5 - 2,5%.

### **Многоканальные спектрометрические системы СПЕКТР-15**

В 80-е годы в связи с научно-исследовательской программой космических пилотируемых полетов по линии международных экипажей болгарскими учеными и специалистами была создана многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15» [10].



Рис. 2.3. Многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15».

Эта система (рис. 2.3) состоит собственно из оптико-электронного блока «Спектр-15К», блока управления и регистрации данных и питания «Спектр-15КР». Оптико-электронный блок «Спектр-15К» можно либо укреплять на иллюминаторе пилотируемого орбитального научно-исследовательского комплекса «Мир» посредством специального устройства, либо использовать для измерений «с рук». При установке на иллюминаторе крепежное устройство позволяет менять положение оптической оси «Спектр-15К» в плоскости полета в пределах  $\pm 10^\circ$  относительно направления в надир. Входная оптика включает в себя объектив с фокусным расстоянием 300 мм и относительным отверстием 1:4 и щель, формирующую поле зрения. Диспергирующее устройство представляет собой дифракционную решетку с объективом и коллиматором. Оптико-электронным преобразователем является ПЗС структура, работающих в режиме накопления зарядов. Электрические сигналы с оптотранзисторов подаются для дальнейшей обработки последовательно во времени с использованием электронного сканирования. Скорость

сканирования спектра устанавливается в зависимости от скорости движения носителя относительно земной поверхности.

Система «Спектр-15» имел 15 измерительных каналов в диапазоне 450—850 нм. На рис. 2.4. показано расположение спектральных интервалов чувствительности каналов, а в таблице 2.1 приведены основные съемочные параметры системы, включая значения спектральной плотности энергетической яркости при  $\lambda_{\text{макс}}$ , соответствующие максимальным выходным кодам.

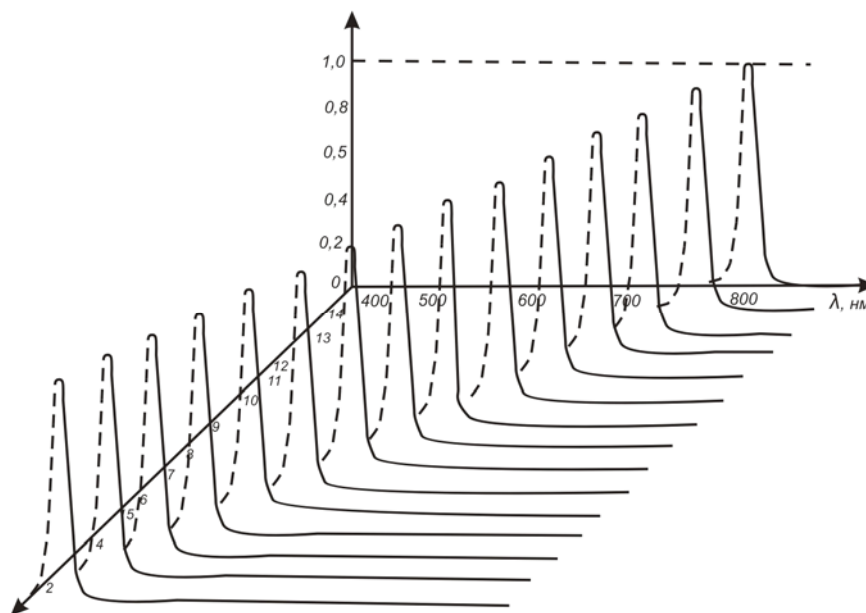


Рис. 2.4. Спектральные характеристики чувствительности системы «Спектр-15» (нормированные кривые).

Таблица 2.1.  
Съемочные параметры системы «Спектр-15»

Номера канала	$\Delta\lambda_{0,5}$ , нм	$\lambda_{\text{макс}}$ , нм	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ (для максимального выходного кода 255)
1	15,5	437	748,58
2	18,0	464	865,29
3	19,0	485	716,59
4	19,0	512	490,14
5	20,5	542	272,61
6	20,5	573	497,56
7	22,0	598	249,82
8	21,0	626	280,50
9	20,0	655	421,85
10	25,0	685	381,79
11	19,5	711	168,30
12	21,0	739	138,06
13	18,0	765	281,38
14	19,0	799	276,60
15	22,0	830	527,53

Со средней высоты орбиты научно-исследовательского комплекса «МИР» линейные размеры проекции пикселя на земную поверхность составляют приблизительно 300 x 300 м. Однако за счет высокой скорости регистрации (около 70 спектр/с), в результате вторичной обработки можно достичь разрешающей способности в направлении полета около 70 м.

**Многоканальная спектрометрическая система СМП-32.** На борту спутника «Метеор - Природа» был выведен на орбиту комплекс предназначенный для решения научно-прикладных задач в области дистанционных исследований Земли из космоса. В его состав работала многоканальная спектрометрическая система СМП-32, для исследования отраженной различными природными образованиями радиации в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра [10].

Структурная схема системы СМП-32 представлена на рис. 2.5, а ее основные технические характеристики в таблице 2.2. Оптическая система СМП-32 состоит из входного объектива с фокусным расстоянием 300 мм и относительным отверстием 1:4, плоских зеркал, оптической щели, коллиматора, дифракционной голографической решетки, фокусирующего объектива и оптико-электронного преобразователя. Кроме того, предусмотрены два опорных излучателя, световой поток которых вводится в основной измерительный тракт посредством специального сферического зеркала с центральным отверстием.

Голографическая решетка, работающая на пропускание, имеет разрешающую способность 650 линий/мм и дифракционную эффективность выше 85%; в полученном спектре практически отсутствует другой порядок, кроме первого. В качестве оптико-электронного преобразователя используется фотодиодная линейная структура из 256 элементов с встроенным регистром управления, которая работает в режиме накопления зарядов. Для достижения необходимой чувствительности и динамического диапазона отдельные элементы этой структуры объединены в 32 канала по 8 элементов в каждом.



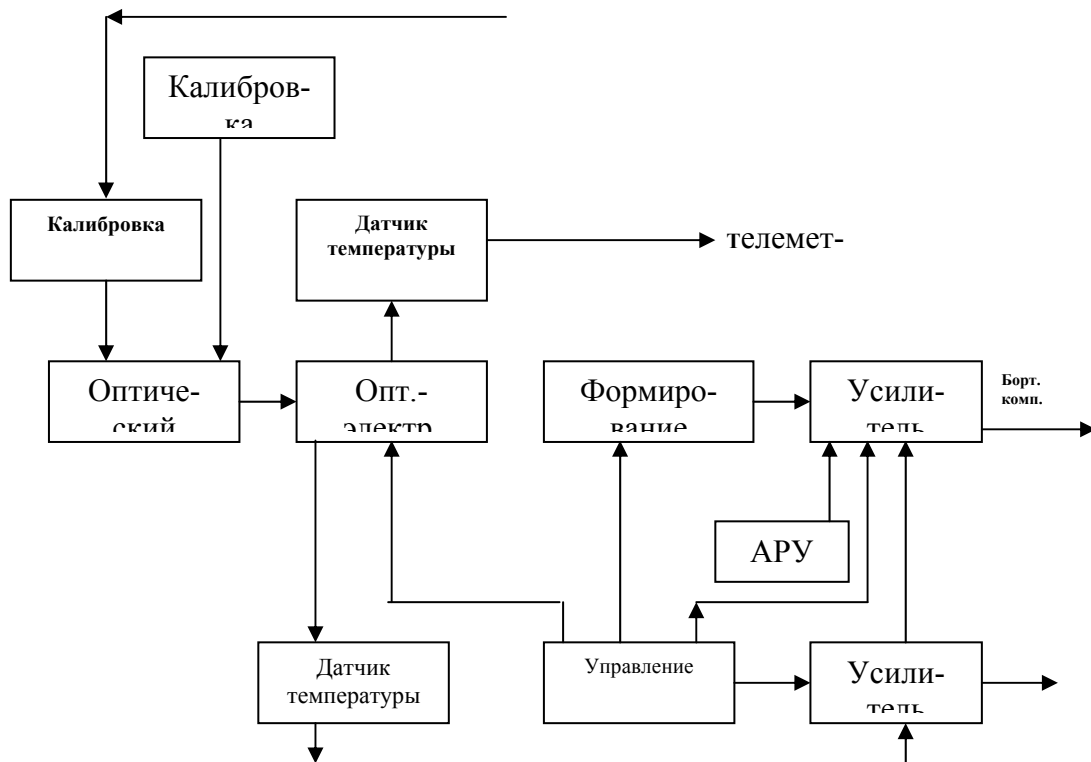


Рис. 2.5. Структурная схема многоканальной спектрометрической системы СМП-32

Таблица 2.2.  
Основные технические характеристики многоканальной спектрометрической системы «СМП-32»

Характеристики	Значение параметра
Спектральный диапазон, нм	457-888
Средняя ширина интервалов чувствительности, нм	8
Число каналов	32
Размеры мгновенного поля зрения (размеры пикселя), м	280 × 280
Спектральная разрешающая способность, нм	14
Максимальная регистрируемая яркость:	$\lambda = 480 \text{ нм} - 1800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ $\lambda = 636 \text{ нм} - 290 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ $\lambda = 882 \text{ нм} - 1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$
Скорость сканирования, спектр/с	25
Информационный поток, Кбит/с	5,6
Размеры, мм	270 × 230 × 100
Масса, кг	6

На рис. 2.6 показаны характеристики относительной спектральной чувствительности оптико-электронного преобразователя; спектральной дифракционной эффективности решетки (обладающей максимальной дифракционной эффективностью на длине волны 660 нм); спектрального коэффициента преобразования всей системы. В связи с большой неравномерностью спектрального коэффициента преобразования в системе обеспечивается перемен-

ный коэффициент усиления во время сканирования по спектру, при этом, в-первых и в последних четырех каналах этот коэффициент имеет одно значение, в 5—8 и 25—28 каналах — другое и во всех остальных каналах 9—24 — третье.

В системе СМП-32 используется подсистема автоматической компенсации ошибки в момент измерения вследствие температурного дрейфа темнового тока в диапазоне 0 - 40 °С. С этой целью проводится прямое безинерционное измерение температуры кристалла оптико-электронного преобразователя и формируется электрический сигнал, который подается к выходному усилителю для компенсации изменения нулевого уровня, вызванного температурным дрейфом. Таким образом, температурно-зависимой обратной связью охватывается весь тракт преобразования, и систематическая ошибка сигнала устанавливается ниже наиболее низкого уровня квантования.

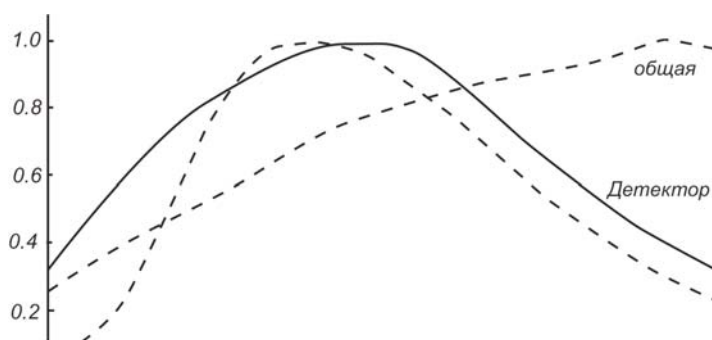


Рис. 2.6. Спектральные характеристики оптико-электронного тракта системы СМП-32.

Опорные излучатели - рабочий и эталонный, стабилизированные по току с большой точностью, - используются для проверки сохранности наземной абсолютной калибровки системы.

Значительная часть управления системой СМП-32 осуществляется микропроцессорной системой бортового вычислительного комплекса. Это существенно упрощает схему управления, повышает надежность работы, уменьшает потребляемую мощность, уменьшает размеры и массу.

**Спектрометрический комплекс МКС.** Многоканальный спектрометрический комплекс МКС, включающий два спектрометра (видимого и инфракрасного диапазона), разработан для измерения цвета океана и оптиче-

ской толщины атмосферы, являющейся одним из важнейших параметров при определении переноса радиации в системе атмосфера - океан.

Для измерения оптической толщины атмосферы выбран интервал 750 ÷ 830 нм в ближней инфракрасной области спектра, причем измерения проводятся на двух длинах волн в окнах прозрачности 758 и 794 нм, на трех длинах волн в полосе поглощения 02 ÷ 750,6, 763,0 и 766,4 нм и на одной длине волны в полосе поглощения водяного пара 822,8 нм.

В соответствии с описанной в работах [1, 5, 12, 14] методикой интерпретации получаемых данных по результатам измерения радиации в окнах прозрачности и области поглощения O<sub>2</sub> возможно определение полной оптической (или аэрозольной) толщины атмосферы и аэрозольного профиля (посредством решения обратной задачи). По данным измерения радиации в полосе поглощения водяного пара можно получить данные о влажности атмосферы и ее корреляции с размером частиц, находящихся над океаном. На основе результатов интерпретации данных об атмосфере, получаемых в ближней ИК-области, возможна коррекция данных о цвете воды, измеряемых в видимом диапазоне.

Основные технические параметры и характеристики комплекса МКС приведены в таблицах 2.3. и 2.4.

Комплекс МКС можно применять не только для спутниковых измерений, но также для самолетных и полигонных исследований.

Таблица 2.3.  
Основные технические характеристики комплекса МКС

<b>Характеристики</b>	<b>Значение параметра</b>
Отношение сигнал/шум на уровне 1%	100
Скорость измерения, спектр/с	18
Калибровка во время полета, с	Каждые 135
Время калибровки (включая темновой ток), с	4
Регистрация	На магнитной ленте
Время регистрации, мин	32

Таблица 2.4.

Съемочные параметры комплекса МКС

<b>Параметр</b>	<b>Видимый диапазон</b>	<b>Инфракрасный диапазон</b>
Положение максимумов	415, 449, 483	758,0, 760,0
Спектральных интервалов	570, 621, 675	753,0, 766,4

Чувствительности, нм		794,8, 822,8
Ширина спектральных интервалов чувствительности (на уровне 0,5), нм	11,3 – 11,8	1,4 – 1,5
Линейность характеристики свет/сигнал, %	1	1
Максимальная определяемая плотность яркости, мкВт · см <sup>-2</sup> · ср <sup>-1</sup> · нм <sup>-1</sup>	20	120
Мгновенный угол поля зрения, Рад · 10 <sup>-3</sup>	14 × 20	1,6 × 20

**Программируемый многоканальный спектрометр.** В последнее десятилетие в области дистанционных исследований Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра исключительно широкое применение нашли спектрометры с различным, заранее определенным числом и шириной спектральных интервалов чувствительности. Однако с самого начала было ясно, что для различных направлений дистанционных исследований земной поверхности и определения влияния атмосферы необходимы различные число, расположение и ширина интервалов электромагнитного спектра, обеспечивающие оптимальное распознавание исследуемых природных образований.

На данном этапе развития исследований вполне возможно определение необходимых сочетаний спектральных интервалов. С этой целью, т.е. прежде всего для решения научно-методических задач дистанционного исследования Земли, разработана программируемая многоканальная спектрометрическая система видимого и ближнего ИК-диапазона спектра. Это гибкая система, которая дает возможность выбирать число, ширину и положение каждого интервала чувствительности в рабочем спектральном диапазоне [10].

Имеется три возможных режима работы такой системы, а именно:

а) реализуется максимальное число интервалов ( $N$ ) и постоянная ширина каждого интервала ( $\Delta\lambda$ ), что соответствует максимальной спектральной разрешающей способности в используемом диапазоне;

б) реализуется ограниченное число интервалов  $M'$  ( $M' < N$ ) с заданной шириной  $\Delta\lambda$ ;

в) реализуется ограниченное число интервалов  $M''$  ( $M'' < N$ ) с различной шириной  $\Delta\lambda' \geq \Delta\lambda$ .

В случаях  $b$  и  $v$  число интервалов, их расположение в спектральном диапазоне и ширина определяются конкретной поставленной задачей и может быть использован для изучения спектральных характеристик растительного покрова..

### **2.3. Метрологическое обеспечение измерений**

Поскольку современные дистанционные методы исследования Земли в значительной степени опираются на использование количественных методов обработки данных, достоверность результатов исследований оказывается в непосредственной зависимости от измерительных свойств съемочных систем (СС) [9], определяющих возможность объективного сопоставления результатов измерений, получаемых в различных ситуациях разными СС. Очевидно, что необходимым условием такого сопоставления является соответствующее метрологическое обеспечение.

В понятие метрологического обеспечения измерений включают выбор физической единицы представления результатов измерений, передачу выбранной единицы от воспроизводящего ее эталона к измерительной шкале СС, обеспечение необходимой минимизации суммарной погрешности проводимых измерений по отношению к единице выбранной физической величины.

Реализацию подобного метрологического обеспечения СС можно рассматривать на примере многозональных съемочных систем оптического диапазона. Используемые в дистанционных исследованиях Земли многозональные съемочные системы оптического диапазона по принципу действия являются радиометрами - яркомерами, так как их мгновенные поля зрения при измерениях полностью перекрываются исследуемой поверхностью. Если принять во внимание ничтожный размер телесного угла, под которым входные зрочки СС радиометров - яркомеров видны с поверхности Земли, то очевидно, что в качестве радиометрической величины, количественно определяющей исследуемое с помощью таких СС излучение, нужно взять плотность лучистого потока на поверхности, отнесенную к величине спектрального интервала и телесного угла, т.е. спектральную плотность энергетической ярко-

сти (СПЭЯ). И хотя на практике величины разрешения по поверхности, телесному углу и по спектру конечны, существо вопроса от этого не меняется: СС измеряет среднее значение СПЭЯ, при этом, чем выше разрешение, тем меньше погрешность, связанная с конечностью перечисленных величин.

Связь между измеряемой величиной и выходным сигналом любого  $j$ -го измерительного канала СС определяется соотношением

$$S_j = \frac{g_j}{B} = \frac{\int_0^{\infty} B(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda}{B}, \quad (2.8)$$

где  $S_j$  — величина, характеризующая чувствительность  $j$ -го измерительного канала;  $S_j(\lambda)$  — абсолютная спектральная чувствительность  $j$ -го канала;  $g_j$  — выходная реакция  $j$ -го канала;  $B(\lambda)$  — спектральная яркость исследуемой поверхности;  $B$  — измеряемая величина яркости.

Величина  $B$  в принципе может характеризоваться различными способами. Обычно при градуировке радиометров - яркомеров в качестве величины  $B$  используются полная интегральная яркость некоторого эталонного источника излучения, интегральная яркость этого источника в пределах интервала ( $\Delta\lambda$ ) спектральной чувствительности градуируемого канала СС или эффективная для данного канала яркость [5]. Поэтому соотношение (2.8) может быть заменено одним из следующих выражений:

$$S_H = \frac{\int_0^{\infty} b_{\text{эт}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} b_{\text{эт}}(\lambda) d\lambda} \quad (2.9)$$

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} b_{\text{эт}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} b_{\text{эт}}(\lambda) d\lambda} \quad (2.10)$$

$$S_m = \frac{\int_0^{\infty} B_{\text{ЭТ}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} B_{\text{ЭТ}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda} \quad (2.11)$$

где  $S_m, S_{\Delta\lambda}, S$  — соответственно интегральная, абсолютная и эффективная чувствительности  $j$ -го канала радиометра;  $B_{\text{ЭТ}}(\lambda), b_{\text{ЭТ}}(\lambda)$  — соответственно абсолютная и относительная спектральные характеристики излучателя, по которому градуируется радиометр;  $S(\lambda), s(\lambda)$  — абсолютная и относительная спектральная чувствительности радиометра.

При дистанционном исследовании земной поверхности и выявлении особенностей исследуемых объектов необходимо, как правило, иметь возможность судить о спектральном составе восходящей над ними радиации. Однако так как выходной сигнал  $j$ -го канала радиометра пропорционален интегралу произведения двух функций, то

$$g_j \sim \int_0^{\infty} B_{\text{ЭТ}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda, \quad (2.12)$$

и по его величине невозможно однозначно судить о спектральном составе регистрируемого излучения. Отсюда следует, что использование интегральной чувствительности при определении яркости исследуемого объекта возможно только в случае, если исследуемый объект и используемый при градуировке излучатель обладают одинаковым распределением энергии по спектру.

В случае исследования земной поверхности спектральный состав регистрируемого излучения, как правило, неизвестен, поэтому интегральную чувствительность  $S_m$  нельзя использовать при градуировке аппаратуры, поскольку она в значительной степени определяется спектром используемого излучателя.

Так как СС для исследования земной поверхности имеют сравнительно узкие спектральные каналы, более оправданной следует считать градуировку

аппаратуры по ее абсолютной чувствительности, что позволяет в какой-то степени нормировать результаты измерений. Однако в этом случае остаются погрешность нормирования, связанная с невозможностью точного определения эффективной ширины спектральных каналов, а также погрешность, вызванная несовпадением спектральных характеристик излучателя, используемого при градуировке, и измеряемого источника в пределах спектральной зоны чувствительности градуируемого канала.

Градуировка аппаратуры по эффективной чувствительности была бы целесообразной при условии сохранения формы характеристик относительной спектральной чувствительности, одинаковой для всех спектральных каналов градуируемой СС. Так как это условие обычно не выполняется, в случае использования эффективной чувствительности необходимо вводить для каждого спектрального канала некоторый нормирующий коэффициент. В связи с отмеченными особенностями различных определений чувствительности в работе предложено при градуировке СС определять ее чувствительность к спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в соответствии с выражением

$$S_{\text{СПЭЯ}} = \frac{g}{B_{\text{ЭТ}}(\lambda_x)} = \frac{\int_0^{\infty} B_{\text{ЭТ}}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{B_{\text{ЭТ}}(\lambda_x)}, \quad (2.13)$$

где  $S_{\text{СПЭЯ}}$  — определяемая чувствительность;  $B_{\text{ЭТ}}(\lambda_x)$  - СПЭЯ на длине волны  $\lambda_x$  источника, используемого при градуировке;  $\lambda_x$  - некоторая длина волны в пределах области спектральной чувствительности градуируемого прибора. При таком подходе нормирование результатов измерения происходит автоматически в процессе градуировки. Градуировка приборов по их чувствительности к СПЭЯ позволяет по результатам, полученным с их помощью, непосредственно определять СПЭЯ исследуемого объекта в соответствии с выражением

$$B(\lambda_x) = \frac{g}{S_{\text{СПЭЯ}}}, \quad (2.14)$$



где  $B(\lambda_x)$  - СПЭЯ излучения исследуемого объекта на длине волны  $\lambda_x$ .

Однако и в этом случае остается погрешность нормирования, возникающая из-за различий в спектральных составах эталонного и измеряемого излучения.

Величина этой погрешности существенно зависит от выбора длины волны  $\lambda_x$ , на которой проводится градуировка. Очевидно, что в качестве  $\lambda_x$  следует выбрать такую длину волны, на которой отношение СПЭЯ эталонного и измеряемого источников равно отношению эффективных яркостей этих же источников. В случае если это равенство выполняется, ошибка нормирования будет сведена к нулю. Соответствующая этому условию длина волны обычно называется эффективной и задается соотношением

$$\frac{B_{\text{эт}}(\lambda_e)}{B(\lambda_e)} = \frac{\int_0^{\infty} B_{\text{эт}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}, \quad (2.15)$$

В общем случае, когда отсутствует какая-либо априорная информация о спектральном составе регистрируемого излучения, определить  $\lambda_e$  из соотношения (3.15) не представляется возможным. Более того,  $\lambda_e$  будет различной для каждой конкретной спектральной характеристики  $B_\lambda$ .

Предположим, что спектральные характеристики  $B_{\text{эт}}(\lambda)$  и  $B(\lambda)$  аппроксимируются прямыми в пределах зоны спектральной чувствительности градуируемого измерительного канала. Такое предположение правомерно в большинстве случаев, так как излучение объектов земной поверхности обычно имеет довольно плавные спектральные характеристики, а спектральные каналы измерительной аппаратуры сравнительно узки. В этом случае можно считать, что

$$B_{\text{эт}}(\lambda) = (B_{\text{эт}})^0 + (B_{\text{эт}})^1 \cdot \lambda, \quad B(\lambda) = B^0 + B^1 \cdot \lambda \quad (2.16)$$

Где  $(B_{\text{эт}})^0$ ,  $(B_{\text{эт}})^1$ ,  $B^0$ ,  $B^1$  — некоторые постоянные коэффициенты.

Соотношение (3.15) в этом случае переписется в виде

$$\frac{(B_{\text{эт}})^0 + (B_{\text{эт}})^1 \cdot \lambda_e}{B^0 + B^1 \cdot \lambda_e} = \frac{\int_0^{\infty} [(B_{\text{эт}})^0 + (B_{\text{эт}})^1 \cdot \lambda] \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} [(B)^0 + (B)^1 \cdot \lambda] \cdot s(\lambda) d\lambda} \quad (2.17)$$

Легко показать, что из этого соотношения следует

$$\lambda_e = \frac{\int_0^{\infty} \lambda s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s(\lambda) d\lambda}, \quad (2.18)$$

что совпадает с выражением для эффективного значения длины волны, введенным в [1] для случая постоянной яркости. Заметим, что в выражение (2.18) не входят коэффициенты  $(B_{\text{эт}})^0$ ,  $(B_{\text{эт}})^1$ ,  $B^0$ ,  $B^1$ , т.е.  $\lambda_e$  не зависит от наклона прямых (2.16) и, следовательно, не зависит от спектрального состава эталонного и измеряемого излучения. Таким образом, при определении чувствительности аппаратуры в СПЭЯ на длине волны  $\lambda_e$  ошибка нормирования будет равна нулю для измеряемого излучения с любым спектральным составом. Подчеркнем еще раз, что это справедливо только в том случае, если спектральные характеристики эталонного и измеряемого излучателей можно аппроксимировать прямыми в пределах области чувствительности градуируемого спектрального канала.

Таким образом, градуировку энергетических шкал бортовой радиометрической аппаратуры следует производить в единицах СПЭЯ с отнесением результатов измерений к эффективной для каждого спектрального канала длине волны  $\lambda_e$ , определяемой из соотношения (2.18).

Выбор единицы СПЭЯ в качестве физической единицы представления результатов измерений предопределяет схему градуировки, включающую в себя определение относительных спектральных и абсолютных чувствительностей каналов как условие передачи выбранной физической единицы энергетической шкале системы. Исходным требованием к построению такой схемы градуировки является реализация излучателя, обладающего известной

СПЭЯ в пределах спектрального и динамического диапазонов работы съёмочной системы и удовлетворяющего условию:

$$A_{\text{изл}} \geq D_{\text{ВХ}} + l\Delta\beta_{\text{макс}} \quad (2.19)$$

где  $A_{\text{изл}}$  - размер излучателя;  $D_{\text{ВХ}}$  и  $\Delta\beta_{\text{макс}}$  - соответственно диаметр входного зрачка и максимальный размер поля зрения съёмочной системы;  $l$  - расстояние между излучателем и градуируемой СС, что позволяет реализовать метод градуировки СС по протяженному источнику.

Излучатель, непосредственно применяемый при градуировке и воспроизводящий при этом некоторую величину СПЭЯ внутри выбранного динамического диапазона, в соответствии с изложенными выше соображениями следует метрологически связать с эталоном, воспроизводящим выбранную физическую величину. Поскольку при этом конечная достоверность результатов измерений оказывается в прямой зависимости от используемых эталонов, точности передачи величины СПЭЯ от эталона к рабочему излучателю, а также построения конкретной схемы градуировки СС, вопрос выбора средств эталонирования и градуировки заслуживает особого внимания.

До недавнего времени при градуировке оптико-электронных систем в основном использовались средства и методы фотометрии, которые базировались на световых и температурных эталонах. Переход к энергетическим величинам осуществлялся путем сложных пересчетов. В частности, по известной цветовой температуре тела, накалу светоизмерительных ламп находилась его истинная температура, а затем по данным об излучательной способности вольфрама рассчитывалась спектральная яркость лампы. Необходимость такого пересчета, а также неопределенность используемых для расчета данных приводили к существенным ошибкам при градуировке. Некоторые исследователи использовали при градуировке различные модели абсолютно черного тела. Однако низкое качество этих моделей, недостаточный анализ их метрологических характеристик и отсутствие стандартных практических методик измерения также приводили к значительным погрешностям.

Положение существенно улучшилось с момента создания системы специальных эталонов (СЭ) энергетической фотометрии, различающихся как по принципу действия, так и по спектральному диапазону [3].

К одному из таких эталонов относится специальный эталон спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне 0,25-2,5 мкм, который был использован в качестве основы при построении схем градуировки многозонального спектрометра СМП-32 и многозональной сканирующей системы «Фрагмент», работающих в пределах указанного спектрального диапазона. Использование этого эталона основывалось на утвержденной поверочной схеме для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости. Единица СПЭЯ в этой схеме передается от СЭ рабочему эталону, который выполняется на базе серийной ленточной лампы СИ10-300У или специальной лампы типа «черного тела». От рабочего эталона СПЭЯ единица СПЭЯ передается образцовым средствам измерения на базе ламп СИ10-300У или СИ8-200У. На этапе градуировки съемочных систем должны использоваться образцовые средства измерений. На рис. 2.7. приведены упрощенные схемы измерения СПЭЯ.

Рассмотрим источники величины ошибок, влияющих на конечный результат измерения. В первую очередь в конечный результат должны войти погрешности, связанные с передачей единицы СПЭЯ от эталонов к образцовым средствам — в зависимости от длины волны они могут достигать нескольких процентов.

К источникам ошибок градуировки можно отнести нестабильность яркости источников излучения, нелинейность и нестабильность компаратора градуировочной установки, невоспроизводимость установки длин волн монохроматора, несогласованность монохроматоров излучателя и компаратора по длинам волн. Однако тщательный монтаж установки, предназначенной для градуировки, предварительный отбор используемых в компараторе фотоприемников и введение различных систем контроля стабильности режимов излучателей позволяют свести эти погрешности к величинам порядка 1%.

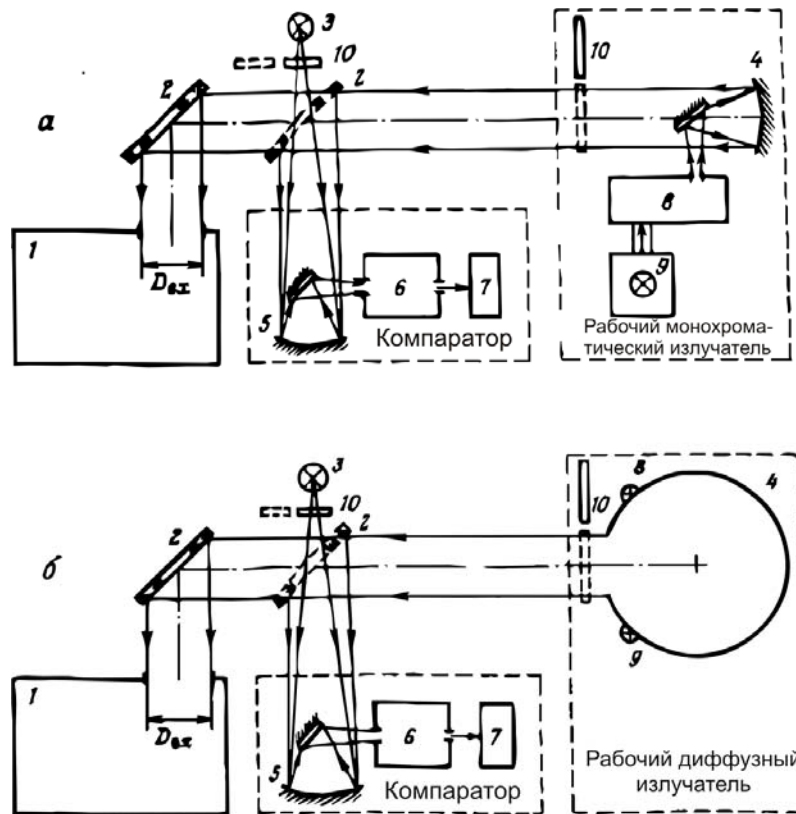


Рис. 2.7. Схема измерения относительной спектральной характеристики (а) и абсолютной чувствительности (б) съемочных систем.

а: 1 - съемочная система, 2 - отклоняющее плоское зеркало, 3 - образцовое средство измерения (лампа СИЮ - 300У), 4 - коллиматорное зеркало, 5 - оптическая система компаратора, 6, 8 - двойные монохроматоры, 7 - блок фотоприемников компаратора, 9 - галогенная лампа, 10 - заслонки;

б: 1 - съемочная система, 2 - отклоняющее плоское зеркало, 3 - образцовое средство измерения (лампа СИЮ - 300У), 4 - диффузный осветитель, 5 - оптическая система компаратора, 6 - двойной монохроматор, 7 - блок приемников, 8,9 - галогенные лампы осветителя, 10 - заслонки.

Таким образом, точность энергетической градуировки СС в нашем случае определяется в основном погрешностью передачи единицы СПЭЯ от эталона к образцовым и рабочим средствам измерений, стандартизованной на уровне нескольких процентов. Это означает, что поскольку для дистанционных исследований Земли необходима совместная обработка данных как минимум от нескольких СС, при построении последних нецелесообразно требовать обеспечения аппаратурной точности каждой отдельной СС в спектральном диапазоне 0,25—2,5 мкм, лучшей, чем 1—3% .

Подчеркнем, что обеспечение среднеквадратичной случайной погрешности измерений на уровне нескольких процентов требует особого построения всего тракта прохождения информации. Действительно, неоднократное

преобразование информации в тракте будет вести к ее потерям до тех пор, пока не будет осуществлен, собственно, процесс измерения, т.е. сравнение некоторого промежуточного сигнала с мерой (единицей измерения) и получения именованного числа (кодированного сигнала). Кодированный сигнал, являясь более помехоустойчивым, чем аналоговый сигнал, практически позволяет устранить влияние последующих звеньев информационно-измерительного комплекса на результаты измерений

Следовательно, выполняя процесс измерения как можно ближе к входному звену СС, можно уменьшить потери информации; из этого естественным образом вытекает необходимость включения кодирующего звена в СС (бортовую часть информационно-измерительного комплекса) и использование цифровой радиолинии [2].

Однако используемые в бортовых СС оптического диапазона кодирующие звенья (аналого-цифровые преобразователи) преобразуют в именованное число лишь электрический сигнал. В результате нестабильности в предыдущих звеньях оптико-электронного преобразования генерируются погрешности измерений, превосходящие, как правило, определенный нами допустимый уровень в несколько процентов. Отсюда следует необходимость введения специального контроля за стабильностью звеньев аналогового оптико-электронного преобразования в СС и той или иной процедуры коррекции результатов измерений по данным этого контроля.

### **3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА**

Основной целью данного раздела является рассмотрение основных факторов, влияющих на изменчивость спектральных характеристик природных образований. Изложение материала базируется на экспериментальных данных, полученных с помощью наземной и аэроспектрометрической аппаратуры, полученные различными авторами в разны годы. Однако, гнадо иметь ввиду, что при описании закономерностей вариаций спектральных отражательных характеристик почв и растительности широко используются материалы, полученные с помощью различных многоканальных фотометров и спектрометров.

Разбив природные объекты на группы в соответствии с их классификацией по характеру спектрального отражения, выявленного Е.Л. Криновым, покажем на конкретных примерах основные особенности изменения спектральных коэффициентов яркости в пределах от 0,4 мкм до 2,4 мкм. Таким образом, будем придерживаться такого порядка рассмотрения - почвенный покров и грунты, растительность древесная и травянистая и водные поверхности и снеговой (ледовый) покров. Помимо примеров в тексте, основной цифровой и графический иллюстративный материал в той же последовательности приведен в приложениях I, II, и III. Данные о СКЯ объектов ландшафта (табл. П.I – П.III) имеют шаг по длине волны, равный 25 нм в диапазоне 400 - 1000 нм и 50 нм в диапазоне 1000 - 2500 нм.

#### **3.1. Особенности спектрального отражения почвенного покрова и обнажений**

Известно, что к факторам длительного действия, определяющим вариации СКЯ почв, относят количество гумуса (перегноя) в почве и его состав, а также состав минеральной части почвы. К временным факторам относят степень измельчения и уплотнения почвы (связанные с ее обработкой или обусловленные воздействием воды, ветра, солнечного излучения и температуры), содержание влаги, высоту Солнца над горизонтом и соотношение рассеянной и прямой радиации в суммарном нисходящем потоке освещенности,

а также условия наблюдения (углы  $\theta$  и  $\varphi_0$ ) и мгновенные углы поля зрения аппаратуры.

**Влияние химического и минерального состава почв** на их спектральную отражательную способность обычно изучается в лабораторных условиях. Образцы почв, взятые для исследования из различных районов, полигонов и горизонтов, подвергаются высушиванию, стандартному размельчению и уплотнению. Этим исключается влияние всех других факторов на отражательные свойства почв. Их абсолютная отражательная способность  $R_\lambda$  измеряется с помощью спектрометров, в которых в качестве входных устройств применяются интегрирующие сферы.

Исследования  $R_\lambda$  образцов почв, относящихся к различным типам по их генетической классификации, показали, что в видимом диапазоне спектра кривые  $R_\lambda$  различных типов почв, нанесенные на графики, представляют семейство практически непересекающихся кривых, ординаты которых увеличиваются с ростом  $\lambda$ . Подъем более заметен в красной области спектра. Для гумусовых почв наблюдаются небольшие перегибы в области  $0,510 - 0,620$  мкм, обусловленные повышенным содержанием окислов железа.

Неоднородность отражательной способности почв, располагающихся на разной глубине, позволяет при дистанционных исследованиях распознать нарушения естественного состояния почвенно-растительного покрова земной поверхности, связанные с прокладкой подземных коммуникаций, дренажной сети и т.д.

Процессы эрозии (разрушения) почв под действием воды, ветра и хозяйственной деятельности человека приводят к большим вариациям отражательных свойств верхних слоев почвенного покрова как по спектру, так и по величине отражения.

В табл.3.1 приведены коэффициенты отражения некоторых почв в ближней ИК области спектра по [48, с.14]. Из данных таблицы 5.2 следует, что  $\Gamma_\lambda$  сухих карбонатных почв увеличивается с ростом  $\lambda$  до  $\lambda=1,1 - 1,3$  мкм. У чернозёма наблюдается возрастание  $\Gamma_\lambda$  с ростом  $\lambda$  до  $\lambda = 2,1$  мкм.



Согласно Работе [90] большинство минералов лучше всего отражают излучения с длинами волн 1- 2 мкм. У почв и минералов в ближней ИК области спектра наблюдаются неглубокие минимумы отражательной способности вблизи 1,4 и 1,9 мкм, связанные с поглощением жидкой водой.

Таблица 3.1

Коэффициенты отражения почв в ближнем ИК диапазоне спектра по [48]

Тип почвы и глубина взятия пробы		Длины волн, нм							
		700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100
Дерново-карбонатная сухая	0-12см	29	41	50	55	52	53	50	63
	12-20 см	65	71	79	84	82	33	82	82
Чернозем типичный, глубина 0-50 см	сухой	II	17	24	31	36	43	43	50
	влажный 28,8%	6	10	17	23	26	30	26	39

У ряда горных пород и минералов, входящих в состав почв, наблюдается селективное отражение, связанное с полосами поглощения самого вещества. Так, гранит и его обломочные породы имеют максимумы отражения вблизи 640, 2100, 3900, 6500, 9000 и 21000 нм; мрамор - вблизи 560 нм, торф - вблизи 620 и 820 нм, песчаная глина - вблизи 610 и 1600 нм и т.д. Эти свойства позволяют осуществлять классификацию и распознавание минералов по их спектральным образам.

В обзоре [98] показана перспективность использования в практике дистанционных исследований земной поверхности весьма узких участков спектра видимого и инфракрасного диапазонов для идентификации водосодержащих, глинистых минералов, карбонатов, железных руд и других полезных ископаемых. В работе [98] показано, что в зависимости от геологического составе почв наблюдаются характерные сдвиги узких полос поглощения у произрастающих на этих почвах растений, вне зависимости от типов самих растений. Для выявления этих тонких эффектов используются спектрометры с

разрешением порядка 1 - 2 нм и сканирующие радиометры, имеющие свыше 100 спектральных каналов.

**Влияние степени измельчения почв** и горных пород на отражательную способность проявляется в возрастании  $\Gamma_\lambda$  с уменьшением размеров элементов материала.

У почв наблюдается нелинейное возрастание отражательной способности  $R_\lambda$  с уменьшением размеров агрегатов. У ряда почв изменения степени измельчения частиц, особенно при высокодисперсных состояниях почв, приводят к изменению спектрального состава отраженного излучения. При уменьшении размера агрегатов образцов сухих почв от 8 до 2 мм отражение возрастает незначительно. Начиная с размеров частиц от 2 мм и менее интегральное отражение возрастает в 1,3 - 1,5 раз у черноземов и в 1.5-2 раза у подзолистых почв.

Диффузная отражательная способность монолитного гранита на  $\lambda = 2100$  нм составляет 38%. Обломки того же гранита; размером 1 - 2 мм отражают 41% падающей энергии. Дальнейшее превращение гранита в порошкообразное состояние с размерам частиц 0,1 - 0,25 мм и менее 0,038 мм приводит к возрастанию отражения до значений 66% и 68% соответственно. На  $\lambda = 3.9$  мкм гранитный монолит отражает 19% энергии, а описанные выше обломочные и порошкообразные образцы гранита имеют коэффициенты отражения 25%, 49% и 64% [90]. Приведенный пример иллюстрирует возможные диапазоны изменений отражательной способности коренных пород в зависимости от размеров частиц материала.

СКЯ пашни с бороздами, направление которых совпадает с направлением солнечных лучей, всегда выше, чем пашни с бороздами, расположение которых перпендикулярно солнечным лучам.

СКЯ почвы, комья которой сглажены дождем, на 10 - 15% больше, чем у свежевспаханной почвы, имеющей такую же влажность.

СКЯ почв, облученных только, рассеянной радиацией, практически не меняются при изменении размеров комьев. СКЯ почв, измеренные при рассеянном освещении, численно равны СКЯ почв, имеющих размеры комков

около 10 см. При облучении вспаханных почв суммарной радиацией их СКЯ в надире возрастают с ростом угла высоты Солнца  $h^\circ$ .

Спектральный состав отраженного от почв света в пределах диапазона длин волн от 400 до 850 нм постоянен и не зависит от степени обработки почвы.

**Влияние влажности почвы** на её отражательные свойства выражается в уменьшении её отражательных свойств с ростом степени увлажнения. Это вызвано изменениями оптической неоднородности почвы под влиянием уменьшения относительного показателя преломления света отдельных частей, слагающих почву.

При увлажнении гумусовых слоев почвы спектральный состав отраженных излучений видимого диапазона спектра не меняется. Исключение составляют желтозёмы и в меньшей степени - краснозёмы. В ближнем ИК диапазоне спектра 1 - 2 мкм происходят наибольшие изменения отражательной способности с изменением степени увлажнения [21, 48]. При увлажнении почв от воздушно-сухого состояния до полной влагоемкости их яркость уменьшается до двух раз.

Наибольшие изменения СКЯ различных почв происходят при разных интервалах влажности: для супесчаных от 0,3 до 3% , легкосуглинистых от 0,4 до 10%, тяжелосуглинистых от 2 до 12%, глинистых - от 4 до 25%, перегнойно-глеевых - от 7 до 30% [61]. Согласно данным работы [41] у песка линейная зависимость уменьшения СКЯ наблюдается при влажности до 5 - 6%. При дальнейшем увлажнении происходит плавное уменьшение интенсивности падения значений СКЯ и при относительной влажности более 10% дальнейшего снижения СКЯ песка не наблюдается. Яркости монолитных, не впитывающих влагу горных сухих и смоченных пород практически не различаются.

Подытоживая описание факторов влияния влажности почвы на СКЯ [по 53] приведем в таблице 3.1 характерные данные наземных измерений при различных их состояниях: I – сухая, покрытая коркой; II - сухая, взрыхлен-

ная; Ш - насыщенная влагой на 50%, взрыхленная; IV - полная полевая влагоемкость, взрыхленная

Таблица 3.2

$\lambda$ , нм	Обыкновенный чернозем				Темно-каштановая			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
400	7,0	4.1	3,3	2,8	8,0	4,6 5,9	3,5 4,4	2.9
500	8,0	4.6	3,8	3,2	10,0	6.7 8,3	5.0 6.2	3.3
600	8.6	5.1	4,1	3,4	11,5	10,2	7.7	4.5
670	9,2	5.3	4.4	3,6	14.3			5.3
800	11,1	6.4	5,3	4.4	17,6			7,6
$\lambda$ , нм	Дерново-подзолистая				Типичный серозем			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
400	10.0	5.8	4.5	2.9	14.0	8.1	6.5	4.5
550	17.0	9.9	7.7	4.9	20.5	16.5	13.3	9.1
600	19.1	11.1	8.7	5.6	31.7	18.4	14.7	10.1
670	22.1	12.8	9.9	6.4	35.5	20.6	20.8	11.3
800	26.3	15.3	11.9	7.7	40.0	23.2	18.7	12.8

**Влияние угла высоты Солнца  $h^\ominus$  и соотношения рассеянной D и прямой S** солнечной радиации на результаты измерений спектральной отражательной способности почв проявляется по-разному, если измерения проводятся с помощью аппаратуры, имеющей различные углы поля зрения. Эти различия обусловлены шероховатостью поверхности почв. В общем случае СКЯ в надире, измеряемый узкоугольным прибором, возрастает при увеличении угла высоты Солнца над поверхностью почвы, а альbedo - убывает, поскольку оно измеряется прибором с углом поля зрения  $180^\circ$  ил рассчитывается через индикатрису яркости поверхности, измеренную узкоугольным прибором. В случае наблюдения слежавшихся почв с относительно ровной поверхностью значения спектрального альbedo и СКЯ в надире сближаются и практически не зависят от  $h^\ominus$ :

В табл.5.3 приведены зависимости значений СКЯ от  $h^\ominus$  для дерново-подзолистой почвы при размерах комьев от 5 до 25 см на длинах волн  $\lambda= 453$  и  $\lambda= 769$  нм по работе [XX].

Таблица 3.3

Величины СКЯ, %, дерново-подзолистой вспаханной почвы  
при разных значениях  $h^\ominus$  по [63, с.122]

$h^\ominus$ , град	17	20	25	30	35	40	45	50	54
$\lambda = 453\text{нм}$	10.7	10.8	10.1	11.0	11.3	11.5	11.8	12.0	12.8
$\lambda = 769\text{нм}$	9.4	9.6	10.1	10.4	11.0	11.3	11.6	12.3	13.0

Эти зависимости хорошо аппроксимируются линейными функциями вида:  $r^\lambda = x h^\ominus + y$  (3.1)  
с коэффициентами  $x = 0.053$ ,  $y = 9.5$  для  $\lambda = 453$  нм и  $x = 0.104$ ,  $y = 7.1$  для  $\lambda = 769$  нм, при  $17^\circ \leq h^\ominus \leq 54^\circ$

Различие коэффициентов  $x$  для двух длин волн обусловлено различием отношений рассеянной и прямой освещенности  $D^\lambda / S^\lambda$  в дневном ходе суммарной освещенности  $E_\lambda$ .

Подводя итог анализу влияния различных факторов на СКЯ почв отметим, что наиболее существенными из постоянных факторов являются процентное содержание гумуса в почве и химический состав минеральной основы почвы. Из переменных факторов наиболее существенны степень обработки, влажность почвы, высота Солнца и состояние неба. Под воздействием переменных факторов СКЯ почв в надире могут изменяться в 3,5 - 4 раза от их минимальных значений, а с учетом изменения углов сканирования  $\theta$ , азимута и высоты Солнца  $h^\ominus$  и  $\varphi^\ominus$  максимальные изменения СКЯ почв могут достигать 10 - 12 раз. Разработаны методики учета разных факторов, влияющих на величины СКЯ почв, которые используются при проведении дистанционных исследований поверхности Земли.

**Угловое распределение отражения излучений почвами и горными породами** в области спектра 400 - 800 нм в соответствии с работами [2, 61, 63] характеризуется ахроматическими индикатрисами, форма которых практически не зависит от длины волны падающего излучения. Выводы о независимости формы индикатрис от  $\lambda$  получены при исследованиях ландшафтных комплексов и объектов, характеризующихся наличием пространственных неоднородностей отражательных свойств. Эти неоднородности и связанные с

ними вариации яркости не позволили выявить весьма тонкие индикатрисные эффекты спектрального отражения почв и обнажений.

Лабораторные исследования образцов песка и чернозема [93] указывают на деформацию формы индикатрис при изменении длины волны от 365 до 1025 нм. Согласно работе [90] относительное изменение степени востанутости спектральных индикатрис, выраженное отношением произведений КСЯ при  $\theta=0$  и  $\theta=60^\circ$  на  $\lambda=405$  и  $\lambda=1025$  нм

$$\frac{r^\lambda(\lambda=405, \theta=60) \quad r^\lambda(\lambda=1025, \theta=0)}{r^\lambda(\lambda=405, \theta=0) \quad r^\lambda(\lambda=1025, \theta=60)}$$

у песка и чернозема составляют соответственно 1,5 и 1,15. Чернозем и песок при зеркальных углах рассеяния поляризуют отраженные излучения до 22% и 12% соответственно. Однако при углах  $\theta \leq 45^\circ$ , лежащих в плоскости солнечного вертикала, и при сканировании углом  $\theta$  вне солнечного вертикала спектральная деформация индикатрис менее 10% и при решении практических задач дистанционных исследований ее можно не учитывать.

Степень вытянутости индикатрисы почв определяется степенью шероховатости поверхности и углом высоты Солнца  $h^\ominus$ , а у поверхностей, имеющих определенную азимутальную направленность шероховатостей, и азимутальным углом Солнца  $\varphi^\ominus$ .

Подводя итог анализу влияния различных факторов на СКЯ почв отметим, что наиболее существенными из постоянных факторов являются процентное содержание гумуса в почве и химический состав минеральной основы почвы. Из переменных факторов наиболее существенны степень обработки, влажность почвы, высота Солнца и состояние неба. Под воздействием переменных факторов КСЯ почвы в надире могут изменяться в 3,5 - 4 раза от их минимальных значений, а с учетом изменения углов сканирования  $\theta$ , азимута и высоты Солнца  $h^\ominus$  и  $\varphi^\ominus$  максимальные изменения КСЯ почв могут достигать 10 - 12 раз. Разработаны методики учета разных факторов, влияющих на величины КСЯ почв, которые используются при проведении дистанционных исследований поверхности Земли.

### **3.2. Особенности коэффициентов спектральной яркости расти-**

## **тельного покрова**

Изучение спектральных коэффициентов яркости растительного покрова как дикорастущего, так и культивируемого (сельскохозяйственных культур) особенно важны, по причине того, что растительность в природных зонах территорий Российской Федерации занимает более 70% от общей площади. и имеет большое значения для продовольственной и промышленной безопасности страны С другой стороны, спектральных характеристик растительных сообществ сельскохозяйственного назначения имеет очень важное значение для определения и диагностики фенофазы на всем протяжении жизненного цикла растения , ниже мы более подробно рассмотрим влияние различных факторов на СКЯ растений.

### **Влияние пигментов и воды на оптические свойства зеленого листа.**

Известно, что зеленый растительный покров имеет специфический спектральный ход отражения излучений видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра, связанный с присутствием в листьях растений различных пигментов и воды. В видимом диапазоне длин волн определяющее влияние на спектральный ход отражения и пропускания излучений оказываются хлорофилл и каротины.

Хлорофилл имеет главный максимум поглощения в красной зоне спектра на длинах волн от 667 до 689 нм, а также ряд полос поглощения в синей зоне, с максимумами вблизи 440 и 460 нм. Каротин наиболее интенсивно поглощает излучения с длинами волн 455 и 485 нм. Поэтому зеленые растения поглощают до 93-95% излучений видимого диапазона спектра, и лишь небольшой минимум поглощения пигментами листьев вблизи 550 нм придает листьям зеленую окраску.

В районе красной границы видимого диапазона спектра поглощение хлорофиллом и каротином с ростом  $\lambda$  резко падает, в связи с этим в ближнем ИК-диапазоне спектра на длинах волн 750-1200 нм отражательная способность  $R_\lambda$  зеленых листьев достигает максимума и составляет 40-60%. При этом одновременно возрастает и прозрачность  $T_\lambda$  листьев до значений 30-50%.

С дальнейшим ростом длины волны в начале прозрачность, а затем и отражательная способность листьев начинают немонотонно убывать за счет поглощения жидкой водой, находящейся в клетках листа. Минимумы отражения листьев в ближнем ИК-диапазоне спектра находятся на длинах волн 980, 1150, 1470 и 1980 нм, они сдвинуты в длинноволновую область по сравнению с положением центров полос поглощения водяного пара.

**Сезонные изменения отражательной способности листьев.** В начале вегетационной фазы растений отражательная способность  $R_\lambda$  у самых молодых листьев возрастает с ростом  $\lambda$  от 3-4% в синей зоне спектра и до 15-20% в красной, при этом максимум отражения на  $\lambda = 550$  нм не проявляется. В ближнем ИК-диапазоне спектра отражательная способность таких листьев максимальна, она достигает 60-75%.

По мере развития листьев и накопления в них хлорофилла в видимом диапазоне спектра начинают проявляться характерные для зеленых растений максимум и минимум отражения, а в ближнем ИК-диапазоне отражательная способность снижается.

При появлении желтизны в листьях минимум отражения на  $\lambda = 680$  нм сглаживается и сдвигается в сторону длинных волн. Максимум отражения при этом сдвигается из зеленой зоны в желтую и оранжевую зоны спектра. В конце фазы вегетации происходит разрушение хлорофилла и спектральный ход отражения характеризуется равномерным возрастанием  $\Gamma_\lambda$  с ростом  $\lambda$  от 3-7% в синей зоне спектра и до 25-35% в ближнем инфракрасной. У сухих желтых листьев осенью отражение в ближнем ИК-диапазоне спектра возрастает до 40-50%, однако оно не превосходит СКЯ сухих зеленых листьев.

Нижняя сторона листьев в видимом диапазоне спектра отражает свет вдвое интенсивнее, чем верхняя, более темная сторона, однако в ближнем ИК-диапазоне спектра отражательная способность верхней и нижней стороны листа примерно одинакова.

**Сезонные вариации СКЯ ветвей деревьев** исследовались в полевых условиях [15] путем измерения с помощью наземных приборов СКЯ срезанных побегов. При этом выдерживалась единая методика подбора и из-



мерения исследуемых образцов растений. В таблице 3.1. приведены данные сезонных изменений СКЯ побегов деревьев.

Исследования показали, что СКЯ молодых побегов хвойных и лиственных пород деревьев на длинах волн 400...800 нм приблизительно вдвое превышают СКЯ старых побегов. Убывание СКЯ листьев на ветвях осины, березы и дуба прекращается ко второй половине июля, а молодые побеги хвойных деревьев перестают отличаться от старых к началу осени.

Таблица 3.4.  
Величины СКЯ, %, побегов различных пород деревьев в различных фазах вегетации

$\lambda$ , нм	Ель			Сосна				Дуб			
	2.6	10.7	6.8	17.5	4.6	10.7	23.8	26.6	4.8	2.9	17.9
460	3	3	1	8	5	5	2	4	3	2	2
560	13	11	6	16	12	11	5	10	9	14	10
600	13	10	5	18	13	8	4	7	7	8	9
660	7	6	2	18	9	5	3	4	4	5	9
760	47	28	18	34	43	30	11	44	34	30	18

$\lambda$ , нм	Осина					Береза						
	17.5	25.6	10.7	1.8	10.9	17.5	31.5	8.6	14.7	1.9	10.9	1.10
460	5	4	5	1	8	4	3	3	2	1	2	14
560	11	11	11	5	36	13	10	7	6	6	8	43
600	10	8	9	4	38	10	8	6	5	4	6	50
660	10	8	9	4	38	10	8	6	5	4	6	50
760	7	6	5	3	42	5	5	4	3	3	4	49

**Изменения степени обводнения листьев** приводят к изменениям их спектральной отражательной способности. Обращает внимание противоречивость выводов, полученных различными авторами по вопросу о влиянии водного режима листьев на изменение их оптических свойств. Однако при более внимательном изучении имеющихся литературных данных можно установить вполне четкие закономерности этого влияния, по-разному проявляющихся в видимом и ближнем ИК участках спектра.

Дневной ход отражательной способности  $R_\lambda$  живых листьев за счет интенсивного испарения ее под влиянием поглощения лучистой энергии Солнца. Было установлено, что наблюдается некоторое возрастание отражательной способности листьев кукурузы и подсолнечника в околополуденные часы в пределах всего видимого диапазона спектра.

В экспериментальных работах, показано, что СКЯ листьев ивы через 15 мин, 2 часа и 3 часа после их отделения от растения составляют на  $\lambda = 470$  нм – 4,6 и 9 %, на  $\lambda = 550$  нм – 12, 11 и 10%, на  $\lambda = 660$  нм – 6,7 и 7%, на  $\lambda = 800$  нм – 60, 50 и 40%. В то же время СКЯ сорванных листьев растений, произрастающих в пустыне, сохраняются неизменными в течение двух суток.

Согласно лабораторным измерениям СКЯ в области спектра 700-2500 нм отражательная способность на  $\lambda = 750$  нм у листьев березы возрастает в 1.03 раза после их восемнадцатидневной сушки. Однако, на длинах волн более 850 нм отражательная способность у сухих листьев березы существенно выше, чем у свежих: отношения  $\Gamma_\lambda$  сухих листьев и  $\Gamma_\lambda$  свежих листьев на длинах волн 1000, 1650 и 2200 нм составили соответственно 1.12, 1.37 и 2.1.

Таким образом, можно утверждать, что потеря влаги срезанными листьями растений при их естественной сушке приводит к незначительному убыванию или росту их отражательной способности на участке 400 – 800 нм и существенному возрастанию отражательной способности в ближнем ИК-диапазоне спектра. При проведении дистанционных исследований эта закономерность изменений отражательной способности листьев используется для распознавания живых и срезанных или пораженных растений.

**Влияние широты произрастания на спектры отражения растений.** У растений, произрастающих в южных широтах, максимум и минимум отражения в видимом диапазоне спектра проявляются более интенсивно, чем у растений, растущих в более северных широтах. У южных растений отражение в ближнем ИК-диапазоне спектра выше, чем у северных растений.

**Отражательная способность листьев разных ярусов растений.**

СКЯ листьев, взятых из разных ярусов растения, практически не отличаются в период их развития. В то же время, у злаковых культур, например, пшеницы, в период колошения листья и части стебля разных ярусов имеют существенно различную окраску (от темно-зеленого в верхней части до желтой у корня) и соответственно разные величины СКЯ. Причем доля желтых листьев находится в прямой зависимости от густоты (проективного покры-

тия) посева [12]. Наименьшие величины СКЯ имеют колосья, если они находятся в вертикальном положении, а наблюдение выполняется в надир.

Различие величин СКЯ листьев и стеблей разных ярусов позволяет обнаруживать полегшие посевы, буреломы, завалы и т.д.

Спектры отражения крон деревьев формируются совокупными эффектами отражения, поглощения и пропускания лучистой энергии отдельными листьями или ветвями. В некоторых ранних исследованиях использовалась спектрофотометрическая аппаратура, которая не позволила свободно маневрировать полем зрения прибора по пространству, осуществляя наблюдения вертикально вниз. Измерения производились с вышек, рядом с которыми устанавливались кроны спиленных деревьев. Полученные таким образом сведения о СКЯ основных пород деревьев в разные периоды вегетации сыграли большую роль при изучении особенностей формирования величин СКЯ лесных сообществ, при выборе спектральных диапазонов аппаратуры наблюдения и при решении других научных и практических задач. Последующие летные эксперименты показали, что сведения о СКЯ крон деревьев завышены по сравнению с реальными данными.

Разные виды древесной растительности имеют сходные кривые СКЯ и спектрального альbedo и отличаются только максимальными значениями в области спектра 550 и 800 – 1000 нм. В условиях наибольшей сомкнутости крон СКЯ лиственных пород выше, чем хвойных пород.

Для оценки возможности использования дополнительных участков ближнего ИК-диапазона спектра в интересах решения задачи распознавания пород деревьев по их спектральным образам выполняют ранжировку пород деревьев по величинам СКЯ их крон в восьми различных спектральных интервалах. По результатам измерений СКЯ крон деревьев в летние месяцы составим таблицу 3.3. Из таблицы следует, что наименьшей яркостью практически во всех спектральных диапазонах обладает ель, за ней следует сосна (по величинам СКЯ на длинах волн 700-1450 нм) и ольха (по СКЯ на длинах волн 500-700 и 1450-2500 нм).

Таблица 3.5.

Результаты ранжировки различных пород деревьев по величинам СКЯ крон в разных спектральных интервалах: Б-березы, Д-дуба, Е-ели, Ол-ольхи, Ос-осины, С-сосны

Спектральные интервалы, нм		400-500	500-600	600-700	700-800	800-1150	1150-1450	1450-1900	1900-2500
Номера рангов величины $\tau\Delta\lambda$	1	Д	Е	Е	Е	Е	Е	Е	Е
	2	Е	Ол	Ол	С	С	С	Ол	Ол
	3	С	Д	Ос	Б	Д	Д	С	С
	4	Ол	С	С,Б	Д	Б	Ол,Б	Ос	Ос
	5	Б	Ос		Ос	Ос		Д	Д
	6	Ос	Б	Д	Ол	Ол	Ос	Б	Б

На следующем месте в порядке увеличения яркости на разных участках спектра оказались сосна (400-500 нм, 1450-2500 нм), дуб (500-600, 800-1450 нм), осина (600-700 нм) и береза (700-800 нм). Наибольшей яркостью обладают: осина – на участках спектра  $\Delta\lambda = 400-500$  нм и 1150-1450 нм; береза – на  $\Delta\lambda = 500-600$  нм и 1450-1250 нм; дуб – на  $\Delta\lambda = 600-700$  нм и ольха – на  $\Delta\lambda = 70-1150$  нм. Береза и сосна, а также береза и ольха практически не различаются на участках спектра 600-700 и 1150-1450 нм. Эти оценки следует считать сугубо ориентировочными, однако они свидетельствуют о принципиальной возможности распознавания определенных пород деревьев по результатам многоспектральной съемки.

### 3.3. Спектральные коэффициенты яркости растительных сообществ

Исследования влияния различных факторов на вариации СКЯ растительных сообществ получили интенсивное развитие в связи с появлением проблемы инвентаризации лесов. Как известно, лесной фонд Российской Федерации один из самых значительных на нашей планете и самый большой по хвойным породам растительности.

Рассмотренные выше особенности отражательной способности отдельных листьев, частей растений и крон деревьев, которые обусловлены физиологическими факторами, проявляются в той или иной степени в особенностях СКЯ растительных сообществ как элементов ландшафта. Исходя из характера задач, решаемых при дистанционных исследованиях поверхности Земли, и характеристик применяемой аппаратуры наблюдения, а также про-

пространственной структуры объектов ландшафта словно можно выделить следующие градации площади элементов ландшафта, которым должно соответствовать пространственное разрешение спектрометрической аппаратуры при измерениях СКЯ природных объектов: 1) до  $0.01 \text{ м}^2$ ; 2) до  $1 \text{ м}^2$ ; 3) до  $10 \text{ м}^2$ ; 4) до  $100 \text{ м}^2$ ; 5) до  $1000 \text{ м}^2$ ; 6) свыше  $1000 \text{ м}^2$ . Данные таблиц 1 - 5 (Приложение 1) получены при пространственном разрешении от  $0.2-0.4 \text{ м}^2$  до  $100 \text{ м}^2$ , т.е. соответствует второй, третьей и четвертой градации разрешающей способности, характерным для аппаратуры детального и обзорного наблюдения ландшафта (предполагается, что частотные характеристики яркости ландшафта не зависят от направления сканирования). В настоящем разделе рассматриваются такие сообщества, в которых размеры площади проекции отдельных растений  $S_{\phi}$  менее пространственного разрешения  $S$  аппаратуры наблюдения:  $S_{\phi} \ll S$ .

На величины СКЯ растительных сообществ помимо главного фактора – фазы вегетации и физиологических факторов оказывают влияние следующие структурные (собственные) и внешние факторы.

- 1) Величина проективного покрытия растительностью подстилающей поверхности  $S_{\text{пр}}$ , выражаемая в относительных единицах или в процентах.
- 2) Относительная величина площади элемента ландшафта, занятой растениями каждого из видов, находящихся в пределах данного элемента  $S$ .
- 3) Архитектура растений (высота, форма кроны, ориентация листьев и ветвей, распределение по ярусам в растении листьев разной окраски и др.)
- 4) Условия наблюдения – угол сканирования  $\theta$  и азимут Солнца  $\phi_{\theta}$ .
- 5) Высота Солнца над горизонтом  $h_{\theta}$ .
- 6) Соотношение рассеянной  $D_{\lambda}$  и прямой  $S_{\lambda}$  радиации.
- 7) Метеорологические факторы – ветер, влага, температура.
- 8) Углы поля зрения измерительной аппаратуры.
- 9) Очевидно, что первые три фактора являются внутренними (структурными), а остальные пять – внешними.

Внешние факторы 5 и 6 взаимосвязаны. Угловое распределение интенсивности радиации, отражаемой растительным покровом, зависит от всех перечисленных собственных и внешних факторов.

С точки зрения решения задач по моделированию условий работы аппаратуры ДЗЗ, расчета ее тактико-технических характеристик, а также определения контрастов между различными элементами ландшафта каждое из состояний данного растительного сообщества может рассматриваться как объект распознавания. Его описание функцией  $R_\lambda=f(\lambda)$  в первую очередь зависит от фенологической фазы и структуры растительного покрова. Под влиянием внешних факторов отношение максимальных и минимально возможных величин СКЯ посевов в надире достигает 1.5 – 2 раз.

**Сезонные изменения СКЯ растительных сообществ.** У растительных сообществ сезонные вариации СКЯ проявляются менее резко, чем вариации СКЯ отдельных листьев. Это вызвано совместным влиянием СКЯ почв, теней растений, разнородными оптическими и структурными свойствами растений, входящих в сообщество. У разных растений качество одинаковые изменения СКЯ могут быть сдвинуты по фазе их появления [15].

В табл. 3.6 приведены величины СКЯ хвойных лесов на характерных длинах волн по данным спектрометров СПИ-2В и СПИ -2, полученными в зимнее и летнее время. Полные данные о СКЯ этих лесов представлены в таблицах Приложения 1. Состав и состояние исследованных лесных сообществ различны. Так, в Ленинградской области исследован хвойный еловый и сосновый лес, в Архангельской обл. – еловый; в Белоруссии в составе смешанного леса хвойные (в основном – сосновые) породы занимали 70% площади; на Украине (Овручский район) исследован сосновый лес. Из анализа таблицы 3.3, а также таблиц 1, 2 и 3 Приложения 1 следует, что при залегании снега и инея на ветвях деревьев характерный для растительных покровов спектральный ход отражения практически не проявляется. Снег в лесу как подстилающая поверхность оказывает влияние на возрастание СКЯ в видимом диапазоне спектра. Наличие лиственных пород деревьев в сообществе в

летнее время приводит к возрастанию СКЯ как в видимом ( $\lambda = 550, 670, 750$  нм), так и ближнем ИК ( $\lambda = 1650, 2200$  нм) диапазонах.

Таблица 3.6  
СКЯ хвойных лесов в зимнее и летнее время

Районы и данные измерений	Длины волн, нм								
	450	550	650	750	850	1050	1250	165	2200
Ленинградская область (январь)	28	16	23	24	28	27	19	5	5
Архангельская область (март)	8	6	5	11	12	13	10	3	-
Белоруссия (июнь)	1.3	4.5	3	18	20	22	21	14	7
Украина, Овручский район (июнь)	2.6	3.5	2.5	13	19	23	19	9	3.6

Сезонный ход СКЯ смешанных лесов можно проанализировать по данным таблице 3.7, составленной с использованием материалов таблиц Приложения 1. Различия СКЯ смешанных лесов, измеренных в Овручском и Белоцерковском районах, связаны с их различным составом и различными фазами вегетации листьев деревьев.

Таблица 3.7.  
Сезонная изменчивость СКЯ смешанных лесов

Районы и даты измерений	Длины волн, нм								
	450	550	650	750	850	1050	1250	1650	2200
Украина, Овручский район (июнь)	2.7	4.5	2.4	24.0	30.0	32.0	28.0	16.5	6.5
Белоцерковский район (июль)	3.0	6.5	4.5	18.0	29.0	38.0	31.0	16.1	8.5
Архангельская область (сентябрь)	4.0	6.0	8.0	17.0	20.0	28.0	24.0	16.4	9.3
Архангельская область (октябрь)	16	15	14	19	23	35	25	10	4

Измерения окраски лиственных деревьев осенью аналогичны сезонным изменениям СКЯ листьев и побегов, - наблюдается возрастание яркости вблизи 650 нм и уменьшение ее на  $\lambda = 750, 850, 1050$  и 1250 нм. На  $\lambda = 1400$  нм в соответствии с данными СПИ-2 СКЯ смешанного леса от лета к осени меняются незначительно. Смешанный лес поздней осенью при наличии тонкого слоя снега во всем исследованном спектральном диапазоне приобретает «окраску», приближающуюся к таковой смешанного леса зимой.

Сезонные изменения СКЯ у лиственного леса и заболоченной растительности наблюдаются в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра (таблица 3.8). Относительно стабильное СКЯ вблизи максимума отражательной способности растительных покровов – на  $\lambda = 750 \dots 1250$  нм.

Таблица 3.8.  
Сезонные изменения СКЯ лиственного леса и болот

Район и даты измерений	Длины волн, нм								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Лиственные леса									
Архангельская область (март)	27	27	27	30	35	29	27	13	-
Украина, Овручский район (июнь)	2.3	3.7	2.0	21.0	27.0	39.0	32.0	16.0	7.0
Ленинградская область (октябрь)	22.0	20.0	19.0	21.0	20.0	20.0	17.0	7.0	7.3
Болота									
Архангельская область (март)	56	59	58	54	53	48	36	6	-
Ленинградская область (август)	5.8	6.9	5.2	30.0	39.0	38.0	26.0	12.6	5.2
Архангельская область (октябрь)	18	16	18	21	38	39	39	15	6

Сезонные изменения СКЯ разнотравного луга приведены в таблице 3.9, составленной по материалам таблицы 3 (Приложение 1), которые получены вблизи деревни Пески Ленинградской области.

Таблица 3.9  
Сезонные изменения СКЯ разнотравного луга

Даты измерений	Длины волн, нм								
	450	550	650	750	850	1050	1250	1650	2200
Апрель	7.5	12	17	22	28	32	30	36	23
Июнь	2.0	5.8	3	36	42	43	35	21	8.8
Август	1.9	8.0	2.6	46	49	55	46	21	10.2
Сентябрь	3.8	9.4	8.9	36	43	44	38	29	15

В соответствии с этими данными у сухой прошлогодней травы, имеющей светло-бурую окраску до начала молодых побегов, в видимом диапазоне спектра наблюдается рост СКЯ с ростом  $\lambda$  от 7 до 22%. На  $\lambda = 850 - 1250$  нм СКЯ сухой прошлогодней травы меньше, чем травы в июне, а в ближнем ИК-



диапазоне на  $\lambda >$  садки капусты, имеющей величину проективного покрытия  $S_{\text{пр}} = 30\%$ , произошло возрастание СКЯ поля в два-три раза на длинах волн 750 – 1100 нм и уменьшение СКЯ в два раза на  $\lambda > 1600$  нм. Дальнейшее развитие растений до  $S_{\text{пр}} = 80\%$  не привело к таким существенным изменениям величин СКЯ поля.

Вариации СКЯ зимнего ландшафта в зависимости от величины проективного покрытия древесной растительностью снегового покрова можно исследовать на примере данных таблиц Приложения 1 о СКЯ снега на равнине ( $S_{\text{пр}} = 0\%$ ) и хвойного леса ( $S_{\text{пр}} = 40\%$ ), лиственного леса ( $S_{\text{пр}} = 60\%$ ) и хвойного леса ( $S_{\text{пр}} = 90\%$ ), полученных в марте и октябре в Архангельской области. По СКЯ оголенного лиственного леса, пашни, стерни овса и зеленых всходов озимой ржи, покрытых тонким слоем снега. Из таблиц следует, что древесная растительность уменьшает СКЯ снежного ландшафта во всем рассматриваемом диапазоне спектра. В то же время, наличие снега и инея на ветвях деревьев, приводит к увеличению СКЯ хвойного леса в 1.5 – 2 раза.

СКЯ хвойного леса с высокой степенью сомкнутости крон ( $S_{\text{пр}} = 90\%$ ) и СКЯ кроны отдельной ели по измерениям января в Архангельской области практически не отличаются на длинах волн 500 – 1200 нм, однако на  $\lambda > 1200$  нм СКЯ отдельной кроны ели выше СКЯ леса в 1.5 – 2 раза, а на  $\lambda \leq 500$  нм – ниже. Такие изменения СКЯ связаны с влиянием теней деревьев и малых величин СКЯ снега на  $\lambda > 1200$  нм и, наоборот, вкладом больших величин СКЯ снега в интегральный сигнал леса в области спектра 400-500 нм. Эти эффекты проявились при съемке при рассеянном свете, под облаками.

Низкие величины СКЯ снега в ближнем ИК-диапазоне спектра и наличие более резких теней в лесу при низком Солнце на  $\lambda = 1600$  нм не приводят к существенному возрастанию СКЯ покрытого снегом и инеем хвойного леса при освещении его прямым и рассеянным светом по сравнению с величинами СКЯ того же леса, освещаемого только рассеянным светом. Об этом свидетельствуют данные таблицы 2 (Приложение 1) о СКЯ хвойного леса в «тени» и «на солнце», полученные в январе в Ленинградской области. Более под-

робно влияние условий освещений на СКЯ растительного покрова будет рассмотрено ниже.

В таблице 3 (Приложение 1) приведены величины СКЯ лесной растительности нижнего яруса – мха, лишайников и папоротников – по измерениям в июне в Белоруссии. Измерения проведены в редком сосновом лесу, сомкнутость крон не превышала 30%. Результаты измерений выглядят заниженными по сравнению с данными по величине СКЯ мокрого пойменного луга, полученными в том же полете. Однако данные о СКЯ лесной растительности нижнего яруса являются вполне достоверными. В данном случае уменьшение СКЯ связано с влиянием затенения кронами деревьев, а результаты получены при рассеянном освещении.

Таким образом, влияние величины проективного покрытия растения на СКЯ растительных сообществ проявляется в изменении относительного вклада различных типов растений и почв в суммарную (по площади) величину СКЯ выделяемого аппаратурой элемента ландшафта. При расчетах СКЯ растительных сообществ необходимо также учитывать степень затенения растительности нижнего яруса, почв или иных объектов растениями верхнего яруса, имеющих шарообразную или иную геометрическую форму.

**Угловая структура радиации, отражаемой растительным покровом** При изменении углов сканирования  $\theta$  узкоугольной аппаратуры наблюдения и азимутальных углов  $\varphi_{\text{®}}$  изменяются как величина проективного покрытия  $S_{\text{шт}}$  в поле зрения аппаратуры, так и условия освещения наблюдаемых растений. В данном случае, как и при наблюдении вспаханной почвы, максимальная яркость регистрируется при визировании в направлении, совпадающем с направлением падающих лучей: при  $\varphi_{\text{®}} = 180^\circ$ ,  $\gamma \sim 180^\circ$ . При этом в поле зрения прибора попадают листья или побеги, освещаемые прямым солнечным светом. И, наоборот, при наблюдении против Солнца, при  $\varphi_{\text{®}} = 0$ , в поле зрения прибора попадают преимущественно затененные части растений, освещаемые только рассеянным светом неба и солнечным излучением, рассеянным соседними растениями, а также прошедшим сквозь крону или листьями растения. При сканировании в азимутальной плоскости  $\varphi_{\text{®}} =$

90°, 270° от надира к горизонту яркость меняется незначительно преимущественно за счет относительного уменьшения площади наблюдаемых растений или листьев нижних ярусов и почвы.

В соответствии с оптическими свойствами листьев растений (интенсивное поглощение излучений видимого диапазона спектра за счет пигментов, практическое отсутствие его на  $\lambda = 800 - 1300$  нм и постепенно возрастающее с ростом  $\lambda$  поглощение БИК-диапазона спектра на  $\lambda > 1500$  нм за счет воды) индикатрисой отражения зеленых растений являются полихроматическими, т.е. их форма меняется с изменением длины волны падающего излучения. В работе [2] приводятся индикатрисы отражения различных видов полевых и луговых растений, измеренные в плоскостях А ( $\varphi_{\text{®}} = 90^\circ, 270^\circ$ ) и В ( $\varphi_{\text{®}} = 0^\circ, 180^\circ$ ). Показано, что с ростом зенитного расстояния Солнца степень вытянутости индикатрисы в плоскости В возрастает. Излагаются результаты измерения полной угловой структуры яркости посевов при  $h_{\text{®}} = 0-90^\circ$ ,  $\varphi_{\text{®}} = 0, 180, 90$  и  $135^\circ$  и  $\theta = 45 - 85^\circ$ , а также цитируются некоторые другие литературные данные по индикатрисам отражения растений в области спектра 400 – 750 нм.

Приведены результаты измерений индикатрис лесного ландшафта на длинах волн 509, 960, 990, 1130, 1240 и 1380 нм. Показано, что в области ИК максимума отражения растений ( $\lambda = 960-1380$  нм) относительные индикатрисы яркости лесов  $\gamma_{\lambda}$ , практически одинаковы при наблюдении на любых длинах волн. Средний по всем углам разброс величин  $\gamma_{\lambda}$  составляет 13%. В таблице 3.8. приведены средние значения относительных индикатрис яркости  $\gamma_{\Delta\lambda}$  на  $\Delta\lambda = 960 - 1380$  нм сибирской тайги имеющей проективное покрытие  $S_{\text{пр}} = 90^\circ$ , по измерениям в июне при двух значениях  $h_{\text{®}}$  в плоскости солнечного вертикала.

Из таблицы 3.10. следует, что в сторону Солнца рассеивается энергии в два раза больше, чем в зенит. При уменьшении углов рассеяния (при увеличении угла сканирования  $\theta$  направлении  $\varphi_{\text{®}}=0$ ) яркость вначале убывает, а затем возрастает до 1.6 и 1.8 раза

Таблица 3.10.

Относительные индикатрисы яркости лесов в спектральном диапазоне 960 – 1380 нм при наблюдении с высоты  $z=200\text{м}$

$h_{\text{®}}$ , град.	$\varphi_{\text{®}}$ , град.	Углы сканирования $\theta$ , град.									
		0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
18.1	0	1	1.00	1.00	1.03	1.08	1.14	1.19	1.35	1.47	1.56
	180	1	1.06	1.25	1.46	1.73	2.09	2.2	2.16	2.15	2.05
35.1	0	1	0.92	0.87	0.90	0.98	1.13	1.26	1.41	1.63	1.82
	180	1	1.05	1.19	1.39	1.68	1.98	2.2	2.28	2.9	2.1

. При уменьшении углов рассеяния (при увеличении угла сканирования  $\theta$  в направлении  $\varphi_{\text{®}} = 0$ ) яркость вначале убывает, а затем возрастает до 1.6 и 1.8 раза. При уменьшении  $h_{\text{®}}$  от  $35^\circ$  до  $18^\circ$  степень вытянутости индикатрисы в направлениях по Солнцу и на Солнце возрастает примерно обратно пропорционально  $\sin h_{\text{®}}$ . По выводам, полученных в ходе некоторых экспериментальных работ утверждается, что при наблюдении в плоскости  $B$  ( $\varphi_{\text{®}}=90,270^\circ$ ) яркость леса на  $\lambda=960-1380$  нм меняется незначительно при изменении угла  $\theta$ . Этот вывод не подтверждается при анализе материалов таблицы 3.10, полученных с помощью аппаратуры СПИ-2М.

В таблице 3.11. приведены средние значения коэффициентов анизотропии  $k_{\lambda}^T = A_{\lambda}/r_{\lambda}$  на шести длинах волн видимого и ближнего ИК участков спектра по данным самолетного спектрального индикатомера, полученные в полетах над сибирской тайгой в июне.

Таблица 3.11

Средние значения коэффициентов анизотропии  $k_{\lambda}^A$  лесных массивов при наблюдении с высоты  $z = 200$  м при  $h_{\text{®}} = 13^\circ - 51^\circ$

$\lambda$ , нм	509	960	990	1130	1240	1380	960-1380
$k_{\lambda}^A$	1.51	1.38	1.41	1.41	1.39	1.36	1.39

Значение  $k_{\lambda}^A$ , а следовательно, и степень вытянутости индикатрисы леса на участке спектра 509-1380 нм убывает с ростом  $\lambda$ .

Этот вывод согласуется в целом с результатами измерения угловой структуры яркости хвойного леса с помощью спектрометра СПИ-2М летом в Ленинградской области, которые представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12

Высотное и угловое распределение относительных СКЯ хвойного леса, нормированных по яркости в надире при  $h_{\text{R}}=47^\circ$ ,  $\theta=45^\circ, 75^\circ$

$\lambda$ , нм	$z=0.2$ км				$z=8.0$ км					
	$\varphi_{\text{R}}=0^\circ$		$\varphi_{\text{R}}=180^\circ$		$\varphi_{\text{R}}=0^\circ$		$\varphi_{\text{R}}=90^\circ$		$\varphi_{\text{R}}=180^\circ$	
	$45^\circ$	$75^\circ$	$45^\circ$	$75^\circ$	$45^\circ$	$75^\circ$	$45^\circ$	$75^\circ$	$45^\circ$	$75^\circ$
450	0.80	1.20	1.55	2.15	1.20	1.30	1.92	1.60	2.70	2.80
650	0.70	0.90	1.40	2.10	1.15	1.20	2.00	1.70	2.30	2.20
900	1.05	1.15	1.25	1.60	1.02	1.04	2.10	1.50	1.60	1.50
1200	1.15	1.30	1.35	1.35	1.00	1.00	1.70	1.30	1.00	0.96
1600	1.10	1.40	1.80	1.80	1.25	1.25	2.60	2.30	1.43	1.70
2200	1.05	1.35	2.00	2.15	1.31	0.90	2.00	1.80	1.30	1.70

Данные таблицы 3.10., полученные по малому ряду измерений, отражают пространственные неоднородности относительной яркости леса, поэтому они не имеют плавных переходов от одного значения к другому, как это имеет место в таблице 3.8. В то же время материалы таблицы 3.10 свидетельствуют о существенной неоднородности яркости при сканировании в плоскости, перпендикулярной плоскости солнечного вертикала. На длинах волн  $\lambda = 1600$  нм и  $\lambda = 2200$  нм степень вытянутости индикатрисы выше, чем на  $\lambda = 900$  нм и  $\lambda = 1200$  нм. Атмосфера оказывает существенное влияние на деформацию угловой структуры яркости лесного ландшафта.

Относительные индикатрисы средних значений спектральной яркости различных растительных сообществ в плоскости солнечного вертикала и величины их СКЯ про  $\theta = 0^\circ$  по вертолетным измерениям с помощью узкоугольного телеспектрофотометра представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13.

Средние значения СКЯ в надире  $r_{\lambda}(\theta = 0^\circ)$  растительных сообществ и относительные индикатрисы спектральной яркости  $\gamma_{\lambda}$  при наблюдении в плоскости солнечного вертикала с высоты  $z = 50$  м

Объект и дата измерения	$h_{\text{R}}$ , град	$\lambda$ , нм	$\varphi_{\text{R}}$ , град	$r_{\lambda},\%$ ( $\theta=0$ )	$\gamma_{\lambda}$ при разных $\theta$ , град				
					15	30	45	60	75
Сосновый лес (август)	42	675	0	2.4	0.83	0.75	0.71	0.79	1.04
					1.25	1.67	2.5	2.3	2.08
		795	180	16	0.93	0.88	0.78	1.0	1.69
					1.12	1.31	1.75	2.0	2.19
Березовый лес (июль)	40	675	0	2.6	0.92	0.88	0.96	1.23	1.38
					1.23	1.54	1.92	2.23	2.15
		795	180	21	0.95	1.0	1.05	1.14	1.23
					1.23	1.52	1.81	2.0	1.9
Болото (июль)	45	675	0	2.1	0.76	0.67	0.67	0.71	0.81
					1.14	1.43	1.95	2.28	2.0

		795	180	18	0.83 1.06	0.78 1.17	0.78 1.61	0.83 1.61	1.11 1.99
Посев озимой ржи, цветение (июнь).	55	675	0	4.6	0.93 1.35	0.96 1.76	1.06 1.96	1.22 20	1.52 1.99
		795	180	37	1.11 1.22	1.19 1.32	1.27 1.54	1.29 1.56	1.29 1.59
Посев ячменя, молочная спелость (июль)		675	0	3.2	1.09 1.41	1.25 1.72	1.41 2.44	1.78 2.75	2.3 2.97
		795	180	33	1.15 1.18	1.30 1.36	1.45 1.76	1.49 1.88	1.57 1.94
Травы культурные (июль)	47	675	0	4	1.0 1.08	1.05 1.28	1.10 1.75	1.28 1.62	1.58 1.62
		795	180	54	0.92 1.11	1.07 1.13	0.92 1.28	1.09 1.30	1.13 1.26

Согласно таблице 3.14. у всех типов растительных сообществ степень вытянутости индикатрисы в спектральной области, соответствующей максимуму поглощения хлорофилла, больше, чем в области сильного рассеяния и пропускания. Эффект обратного блеска растений при наблюдении по направлению распространения солнечных лучей сильнее выражен у тех растений, у которых больше глубина проникновения радиации за счет более узких листьев – в частности, у сосны и посевов травы. Минимальные значения яркости у лесных ландшафтов и посевов ржи на  $\lambda = 675$  нм наблюдается при углах сканирования  $\theta = 15 - 45^\circ$  в направлении зеркальных углов рассеяния. Посевы с развитыми колосьями не имеют четко выраженного максимума при наблюдении строго по солнцу ( $\theta = i_{\text{R}}, \varphi_{\text{R}} = 180^\circ$ ). В работе [4] утверждается, что сведения об индикатрисах растений в красной области спектра могут быть использованы для классификации видов растительных сообществ при дистанционных исследованиях. Показано, что в плоскости  $\varphi_{\text{R}} = 90^\circ$  и в пасмурную погоду СКЯ всех измеренных видов растений растут монотонно от надира к горизонту. В частности, индикатрису посева озимой ржи в плоскости  $\varphi_{\text{R}} = 90^\circ$  можно аппроксимировать параболой  $r_\lambda(\theta) = r_\lambda(\theta=0) + c_\lambda \theta^2$ , где  $c_{\lambda=555 \text{ нм}} = 5.7 \cdot 10^{-6}$ ,  $c_{\lambda=675 \text{ нм}} = 3.7 \cdot 10^{-6}$ ,  $c_{\lambda=795 \text{ нм}} = 32 \cdot 10^{-6}$ . В работе приводятся индикатрисы СКЯ посева озимой ржи на  $\lambda = 675$  нм и  $\lambda = 795$  нм, измеренные в разные фазы ее развития – от появления всходов до цветения. Изменения формы индикатрис наблюдается в красной области спектра при переходе от фазы кущения к фазе колошения.

Индикатрисы спектральной яркости зеленой степи в районе г.Уральска проведенные в июне и июле представлены в виде изофот относительной яркости степи на  $\lambda = 450, 550, 800, 1200$  и  $1600$  нм по измерениям с помощью СПИ-2М с высоты  $h_{\text{®}} = 300\text{м}$  при высотах Солнца  $h_{\text{®}} = 45 - 55^\circ$ . Поля яркости степи на всех  $\lambda$  кроме  $\lambda = 1200$  нм имеют одинаковую локализацию минимумов величин  $\gamma_{\lambda} = 0.7 - 0.8$  вблизи углов  $\theta = 30 - 45^\circ$ ,  $\varphi_{\text{®}} = 0 - 45^\circ$ . Максимум обратного блеска при наблюдении по Солнцу при  $\theta = i_{\text{®}}$  не зарегистрирован; яркость плавно возрастает от надира к горизонту, достигая максимальных значений при  $\varphi_{\text{®}} \sim 180^\circ$ ,  $\theta = 75^\circ$ .

Таблица 3.14

Спектральные индикатрисы  $\gamma_{\lambda}(\theta, \varphi_{\text{®}})$  и коэффициенты анизотропии  $k_{\lambda}^A$  степи по измерениям в Уральской области (апрель) с помощью СПИ-2М

$\lambda$ , нм	$\gamma_{\lambda}(\theta, \varphi_{\text{®}}) = r_{\lambda}(\theta, \varphi_{\text{®}}) / r_{\lambda}(\theta = 0^\circ)$ , $h_{\text{®}} = 44^\circ$								$k_{\lambda}^A$ , $h_{\text{®}} = 46^\circ$	
	$Z = 500\text{м}$								$Z =$	$Z =$
	Углы $\theta$ при $\varphi_{\text{®}} = 0^\circ$				Углы $\theta$ при $\varphi_{\text{®}} = 180^\circ$				4000	8000
	30°	45°	60°	75°	30°	45°	60°	75°	м	м
450	0.7	0.6	0.6	1.0	1.4	1.7	1.7	1.7	1.07	1.14
570	0.9	1.0	0.7	1.1	1.9	1.4	2.3	1.9	1.03	1.13
620	0.8	0.7	0.5	0.8	1.6	2.5	1.9	1.6	1.07	1.03
780	0.8	0.6	0.5	0.5	1.6	2.2	2.7	2.2	1.08	1.07
930	0.6	0.6	0.4	0.6	1.4	2.4	1.7	1.8	1.03	1.07
1020	0.6	0.6	0.4	0.7	1.5	2.8	2.0	2.1	1.02	1.10
1110	0.6	0.6	0.4	0.7	1.4	2.4	1.8	2.0	1.03	1.06
1230	0.7	0.7	0.5	0.7	1.5	2.0	1.6	1.8	1.04	1.04
1380	0.9	0.9	0.6	0.8	1.4	2.0	1.5	1.3	1.01	1.00
1550	1.1	1.2	0.8	1.0	1.7	1.9	1.5	1.4	1.03	1.05
1870	1.4	1.4	0.9	0.7	1.3	1.4	0.8	0.8	0.99	0.99
2200	1.3	1.4	0.9	0.9	1.5	1.4	1.2	0.9	0.97	1.02

При сканировании в направлении против Солнца ( $\varphi_{\text{®}} = 0^\circ$ ) яркость, равная яркости в надире, наблюдается при  $\theta = 60^\circ$ , в дальнейшем она возрастает с ростом угла  $\theta$ . Степень вытянутости индикатрисы яркости степи летом на разных длинах волн при наблюдении в плоскостях А и В под углом к надире  $\theta = 75^\circ$  характеризуется следующими данными по величинам  $\gamma_{\lambda} = r_{\lambda}(\theta, \varphi_{\text{®}}) / r_{\lambda}(\theta)$

$\lambda$ , нм	450	550	800	1200	1600
$\varphi_{\text{®}}=0^\circ$	1.8	1.4	1.2	1.2	1.1
$\varphi_{\text{®}}=180^\circ$	2.8	2.0	1.4	2.6	1.6
$\varphi_{\text{®}}=90^\circ$	1.1	1.3	1.3	1.5	1.3

Анализ материалов по угловой структуре спектральной яркости растительных сообществ показал, что за счет индикатрисных эффектов спектральная яркость зеленого растительного ландшафта в поле зрения аппаратуры, имеющей углы поля зрения  $150^\circ$ , может меняться до трех-четырех раз в видимом диапазоне и до двух-трех раз в ближнем ИК-диапазоне спектра. В зимнее время и в переходные периоды года максимальные перепады яркости могут достигать пяти раз. Однако, если максимальные углы сканирования аппаратуры наблюдения не превышает  $30^\circ$  от надира, то за счет индикатрисных эффектов максимальные перепады яркости зеленых растительных сообществ не превышают 1.8 – 2.2 раза; в случае наблюдения зимнего лесного ландшафта со снегом при изменении углов  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  в области спектра 400-1300 нм яркость может меняться до пяти раз.

С учетом того, что индикатрисы яркости растительных сообществ являются полихроматическими, результаты наблюдений с помощью многоспектральной аппаратуры в разных участках спектра, в пределах которых оптические свойства листьев существенно отличаются, будут разными при одних и тех же значениях углов сканирования от надира.

#### **Зависимость СКЯ растительных сообществ от условий освещения**

Условия освещения определяются углом высоты Солнца  $h_{\text{®}}$  и соотношением рассеянной  $D_{\lambda}$  и прямой  $S_{\lambda}$  радиации в суммарном потоке падающей  $Q_{\lambda}$  радиации.

Экспериментальные исследования суточной изменчивости величин СКЯ посевов  $r_{\lambda}(h_{\text{®}}, S_{\lambda}, D_{\lambda})$  показали, что встречаются случаи возрастания, нейтрального хода и убывания  $r_{\lambda}$  с ростом  $h_{\text{®}}$  [12, 14, 15].

Согласно результатам измерений СКЯ посевов в области спектра  $\Delta\lambda = 590 - 720$  нм с помощью трубчатого фотометра, имеющего угол поля зрения  $17^\circ$ , при увеличении  $h_{\text{®}}$  от  $20$  до  $70^\circ$ . Различные культуры обладают следующими особенностями изменений отражательных свойств:

- пшеница в фазе выхода в трубку – рост СКЯ в 1.2 раза, в фазе молочной спелости – падение СКЯ в 1.1 раза;



- хлопчатник в фазах бутонизации, начала цветения и массового цветения – рост СКЯ в 2 – 1.5 раза, в фазе созревания – постоянство СКЯ;
- кукуруза в фазах появления седьмого листа, выметывания метелки и молочной спелости – рост СКЯ в 1.5 раза;
- сахарная свекла в фазах начала утолщения подсемядольного колена, начала смыкания листьев в рядах и полного смыкания листьев в рядах – рост СКЯ в 2.1 – 1.4 раза.

Исследования зависимости величин СКЯ от  $h_{\text{®}}$  в областях спектра  $\Delta\lambda = 590 - 720$  нм и  $\Delta\lambda = 750 - 1100$  нм [15] показали, что при возрастании  $h_{\text{®}}$  от  $17^\circ$  до  $55^\circ$  у сомкнутых посевов эспарцета происходит убывание СКЯ в 1.2 раза как в видимом, так и в ближнем ИК участках спектра, а у полынного пастбища наблюдается рост СКЯ в 1.5 раза в видимом диапазоне спектра и в 1.2 раза – в ближнем ИК.

Вертолетные исследования зависимости СКЯ посевов от  $h_{\text{®}}$  на длинах волн 436, 654 и 840 нм с помощью фотометра, имеющего угол поля зрения  $20^\circ$  [5], показали, что при возрастании  $h_{\text{®}}$  от  $18^\circ$  до  $50^\circ$  у посевов красного клевера в фазе цветения и картофеля в фазе интенсивного клубнеобразования СКЯ практически не зависят от  $h_{\text{®}}$ . В то же время, у посевов кукурузы в фазе выметывания метелки и овса в фазу колошения наблюдается рост СКЯ в 1.1 – 1.2 раза. Эти посевы имели величины проективного покрытия свыше 90 %.

Исследования зависимости  $r_\lambda = f(h_{\text{®}})$  с помощью полевого спектрофотометра в области спектра 400 – 800 нм показали, что СКЯ разнотравно-злакового луга и посева картофеля, имеющих  $S_{\text{пт}} \sim 50\%$ , а также посева клевера в стадии цветения с  $S_{\text{пт}} \sim 90\%$  убывают в 1.25 – 1.3 раза при возрастании  $h_{\text{®}}$  от  $10^\circ$  до  $25^\circ$ . При дальнейшем росте  $h_{\text{®}}$  до  $45^\circ$  СКЯ вначале слабо убывают, а при  $h_{\text{®}} > 45^\circ$  возрастают или остаются неизменными. Необходимо заметить, что полученные экспериментальные выводы о зависимости  $r_\lambda = f(h_{\text{®}})$  для посевов клевера и для пашни противоречат результатам исследований, описанным в работах [5, 12, 15]. К сожалению, во всех названных работах не приводятся сведения о типах почв при исследованиях растительных покровов, имеющих  $S < 100\%$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что у несомкнутых растительных сообществ преимущественно вертикальной ориентацией листьев и стеблей наблюдается рост СКЯ с ростом  $h_{\text{®}}$ . У сомкнутых растительных покровов с преимущественно горизонтальной или сферической ориентацией листьев при возрастании  $h_{\text{®}}$  величины СКЯ либо остаются постоянными, либо слабо убывают.

Согласно обзорам работ по исследованию зависимости величины альбедо поверхностей от  $h_{\text{®}}$  у всех типов растительных сообществ альбедо убывает с ростом  $h_{\text{®}}$ . В зависимости от типа почвы, длины волны  $\lambda$ , сомкнутости посевов и вида растений существуют такие значения углов поля зрения аппаратуры, при которых альбедо не меняется при изменении  $h_{\text{®}}$ .

Описанные выше эксперименты проводились при безоблачной и малооблачной (до 2-3 баллов) погоде. Измерения СКЯ посевов клевера и картофеля при облачной погоде [12], показали, что четкой зависимости величины СКЯ от  $h_{\text{®}}$  не наблюдается ввиду большой изменчивости потоков нисходящей радиации (в экспериментах использовался метод последовательного измерения яркостей эталона и объекта). В работе [5] описаны специальные эксперименты по определению влияния соотношения рассеянной и прямой солнечной освещенности на величины СКЯ посева клевера с использованием нейтральных сеток и вращающегося стола при постоянной  $h_{\text{®}}$ . Исследования показали, что при уменьшении величины прямой солнечной радиации  $S_{\lambda}$  от  $S_{\lambda} \sim Q_{\lambda}$  до  $S_{\lambda} = 0$  в суммарном нисходящем потоке  $Q_{\lambda} = S_{\lambda} + D_{\lambda}$  происходит возрастание СКЯ в 2.9 – 1.45 раза. За счет уменьшения угла высоты светила  $h_{\text{®}}$  над поверхностью посева СКЯ убывает. При суточных изменениях  $h_{\text{®}}$  и соотношения  $D_{\lambda}/S_{\lambda}$  (при росте  $h_{\text{®}}$  соотношение  $D_{\lambda}/S_{\lambda}$  убывает) происходят примерно равные, но противоположные по знаку изменения составляющих суммарной величины СКЯ  $r_{\lambda}(Q_{\lambda}) = r_{\lambda}(S_{\lambda}) + r_{\lambda}(D_{\lambda})$ , обусловленные отражением прямой  $r_{\lambda}(S_{\lambda})$  и рассеянной  $r_{\lambda}(D_{\lambda})$  солнечной радиации. В связи с этим величины СКЯ посевов такого типа, как сомкнутый посев клевера, в течение дня остаются постоянными.

Проведение натуральных экспериментов по определению комплексного влияния различных факторов на величины СКЯ посевов и других растительных сообществ связано с очень большими методическими, техническими и организационными трудностями. Благодаря достижениям в области вычислительной техники и определенным успехам в исследованиях оптики и архитектуры растений в последнее время значительное развитие получили теоретические исследования закономерностей вариаций отражения системой растительность – почва, которые позволяют изучать влияние каждого из описанных выше факторов на величины СКЯ растительных сообществ как в отдельности, так и при их комплексном воздействии.

### **3.4. Спектральные коэффициенты яркости воды и снега**

Спектральные характеристики воды, так же как и спектральные характеристики растительности и почвы, изменяются с длиной волны, в соответствии с имеющим место взаимодействием энергии и вещества. Что касается поверхности воды, то здесь эти взаимодействия вызваны природой самой воды; кроме того, на них влияют различия в состоянии воды. Как известно, определить водную поверхность и установить границы масс воды с помощью дистанционного зондирования очень легко на изображениях в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, хотя некоторые аспекты состояния воды лучше всего определяются с использованием данных, полученных в видимом диапазоне. Картографирование размеров и состояния снежного покрова для лучшего предсказания стока пакового снега наилучшим образом может быть выполнено в среднем инфракрасном диапазоне.

Рассмотрим, прежде всего, ближний и средний инфракрасный диапазоны, где, как Вы помните из рис. V3.1, даже очень тонкий слой воды (в жидком состоянии) имеет несколько отчетливых сильных полос поглощения. В естественных условиях поверхностью воды поглощается почти вся падающая энергия в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах длин волн, даже если слой воды небольшой. Вследствие такого сильного поглощения энергии водой в этих диапазонах мо-

жет быть отражено лишь очень небольшое количество энергии. Это очень выгодно для дистанционного исследования, поэтому отражательная способность воды в отражательном инфракрасном диапазоне спектра четко выражена и гораздо ниже, чем отражательная способность растительности или почвы (рис. 3.21). Четкие различия отражательной способности в инфракрасном диапазоне делают возможными простую идентификацию и картографирование водных поверхностей. Например, на черно-белых инфракрасных аэрофотоснимках или многоспектральных сканерных изображениях в отражательном инфракрасном диапазоне спектра (рис. V.22) вода черного цвета и хорошо отличается от окружающих ее растительности и почвы. Специалисты, работающие с данными Ландсат, утверждают, что определить местонахождение даже очень маленьких прудов или озер (площадью 2—4 га) можно очень быстро и легко [19, 20].

Необходимо отметить, что почти во всех случаях, когда есть различия в состоянии воды, между спектральными характеристиками, измеренными системами дистанционного зондирования, и данными, определяемыми характеристиками воды, существуют сложные взаимосвязи. Если нет соответствующих справочных данных, трудно правильно интерпретировать полученные с помощью дистанционного зондирования измерения отражательной способности в таких областях. Однако не следует недооценивать тот факт, что методы дистанционного исследования могут принести большую пользу при простом обнаружении областей с различными спектральными характеристиками и количественном определении - и картографировании таких областей, даже если точную причину различий нельзя определить только из измерений спектральных характеристик. Вежернак и Полсин [40] отметили:

«Хотя цвет может быть вызван поллютантами, разлагающейся растительностью или другими естественными источниками, его изменения могут происходить в результате изменений экологии фитопланктона и часто указывают на изменения водной среды. Поэтому следует

обнаруживать и отмечать области **266** окрашенной воды, хотя наблюдаемые явления интерпретируются не сразу».

Теперь давайте рассмотрим спектральные характеристики воды в замерзшем состоянии, т. е. снега! Возможность получения данных об отражательной способности с высоты полета спутника представляла особый интерес для гидрологов, работающих над предсказанием стока пакового снега во многих горных областях мира. То, что спутники могут быстро получать данные по большим географическим областям и через очень короткие промежутки времени, предоставляет возможности, которых ранее не существовало. В прошлом предсказание стока выполнялось с помощью наземных измерений глубины и содержания воды в паковом снеге для многих пунктов или полетов на небольшом самолете для определения размеров области снежного покрова. Однако тогда не было экономичного и быстрого метода для получения точных оценок области снежного покрова. Эта задача идеально решается спутниковыми системами сбора данных и методами машинной обработки.

В самом начале работы со спутниковыми данными стало ясно, что надежное картографирование снега невозможно, потому что спектральные характеристики снега и облаков похожи. Это сходство было особенно очевидным для исследователей, работающих с данными Ландсат 1, которые установили, что спектральные характеристики облаков и снега настолько одинаковы в диапазоне чувствительности детекторов Ландсат 1 (0,5—1,1 мкм), что спектрально отличить области снежного покрова от облаков нельзя [41]. Было также обнаружено, что во многих случаях отражательная способность как снега, так и облаков настолько высока, что детекторы спутника насыщаются; таким образом, даже если различия спектральных характеристик действительно существуют, их нельзя измерить. В табл. 3.16 для иллюстраций этой проблемы даны специальные характеристики облаков и снега, определенные с помощью данных Ландсат, полученных в три различных момента времени в горах Сан-Хуан на юго-западе Колорадо

Ясно, что трудно спектрально разделить снег и облака в диапазоне спектра 0,5—1,1 мкм. Однако многоспектральные сканерные данные, полученные спутником Скайлаб, впервые показала, что снег и облака можно легко различать в среднем инфракрасном диапазоне, особенно в областях 1,55—1,75 и 2,10—2,35 мкм [42]. В этих диапазонах длин волн отражательная способность облаков очень высокая и они белого цвета на изображениях, снега — очень низкая и он на изображениях черного цвета. На рис. V.28 дан пример этого явления; на изображениях в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах спектральное различие снега и облаков невозможно, а в среднем инфракрасном — возможно.

Таблица 3.16

Объект	Диапазон длин волн, мкм			
	0,5-0,6	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8—1,1
Снег	126±2,6	127±1,5	126±2,3	125+4,2
Облака	127±1,8	127±0,9	125+3,7	126±3,1

Кривые спектральной отражательной способности, полученные О'Брайен и Мьюнис [43], показывают, почему снег имеет такой тип характеристики на изображениях Скайлаб. На рис. V.29 приведены кривые отражательной способности недавно выпавшего и двухдневного снега в диапазоне спектра 0,6—2,5 мкм. Такое уменьшение отражательной способности почти от 100% в диапазоне длин волн менее 0,8 мкм почти до 0% при 1,5 мкм не наблюдается ни для каких естественных покрытий поверхности Земли. Влияние полос водного поглощения, которое рассматривалось ранее, тоже отчетливо видно на этих кривых. Следует также обратить внимание на то, что в видимом диапазоне спектра, показанном здесь, между отражательной способностью свежевыпавшего и двухдневного снега различия нет. Однако в диапазоне длин волн более 0,8 мкм свежеснег имеет более высокую отражательную способность, а это свидетельствует о том, что по мере старения пакового снега отражательная способность уменьшается в инфракрасном и не уменьшается в видимом диапазоне длин волн. Это

наводит на мысль о том, что отражательный инфракрасный диапазон длин волн можно использовать для оценки возраста и состояния снежного покрова.

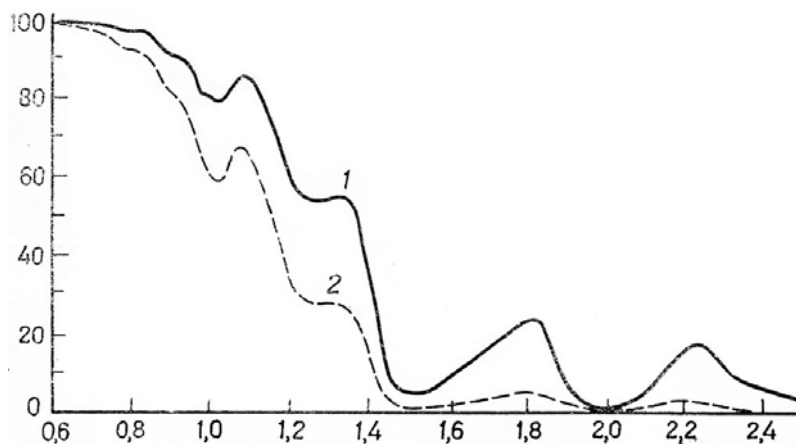


Рис. 3.1

Что касается облаков, они беспорядочно рассеивают солнечный свет, таким образом, во всем отражающем диапазоне спектра (0,3—3,0 мкм) спектральные характеристики высокие и одинаковые [20]. Поэтому в среднем инфракрасном диапазоне длин волн облака имеют очень высокую отражательную способность по сравнению со снегом, отражательная способность которого очень низкая, как видно на изображениях Скайлаб. В тепловом инфракрасном диапазоне длин волн верхние облака и снег часто имеют одинаковый диапазон температур, поэтому спектральное различие в этом диапазоне длин волн ненадежно.

### **3.5. Краткий обзор результатов исследований влияния различных факторов на СКЯ растительного покрова**

Теория радиационного режима растительных покровов наиболее полно была разработана в работах Росса Ю.К., Глаголева Ю.А., Рачкулика В.И. и др. Точные и приближенные методы математического моделирования отражения системы растительность – почва базируются на теории переноса радиации в мутной среде. Например, Выгодская Н.Н. и Горшкова И.И. растительный покров моделируют слоем, бесконечным в горизонтальном направлении, со случайным распределением фитоэлементов в пространстве, подчиняющемся закону Пуассона. Принимается, что растения состоят из  $m$  тонких

слоев толщин  $L_S$ . В пределах этих слоев взаимное затенение фитоэлементов отсутствует.

В качестве входных параметров задаются угол сканирования (направление рассеянной радиации)  $\theta$ , высота Солнца  $h_{\text{®}} = 90^\circ - i_{\text{®}}$ , величины рассеянной  $D_\lambda$  и прямой  $S_\lambda$  радиации (или их отношение), а также относительная поверхность фитоэлементов  $L$ , средний угол наклона фитоэлементов  $\theta_\phi$ , дифференциальная функция распределения фитоэлементов задаются их коэффициент спектрального отражения  $R_\phi$ , пропускания  $T_\phi$  и рассеяния  $\sigma_\phi = R_\phi + T_\phi$ , а также величина СКЯ почвы  $r_S$ .

Методика предусматривает последовательный расчет пропускания и отражения прямой и рассеянной, нисходящей и восходящей радиации каждым слоем в разных направлениях, а также определения суммарной величины потоков, обусловлены однократным отражением листьев и от почвы, многократным рассеянием в слоях растительного покрова радиации, отражаемой элементами растений и почвой. Аналогичный подход к расчету СКЯ растительного покрова применяется в [13].

Не приводя всех аналитических выражений, используемых в модели, укажем, что параметр  $L$ , характеризующий относительную поверхность фитоэлементов (называемый также плотностью растительного покрова или индексом листовой поверхности) описывает кратность перекрытия поверхности земли площадью фитоэлементов. Он связан с параметром проективное покрытие  $S_{\text{пр}}$  следующим образом:

$$S_{\text{пр}} = 1 - \exp[-LG(h_{\text{®}})/\sin h_{\text{®}}] \quad \text{или} \\ S_{\text{пр}} = 1 - \exp[L\cos(i_{\text{®}} - \theta_\phi)\cos i] \quad (3.2)$$

Здесь  $G(h_{\text{®}})$  – средняя проекция всего слоя фитоэлементов на направление  $h_{\text{®}}$ .

Влияние СКЯ почвы на СКЯ растительного сообщества учитывается через величину спектрального контраста  $СК^*$  между СКЯ фитоэлементов  $r_\phi$  и почвы  $r_S$ :

$$СК^* = (r_\phi - r_S)/r_S. \quad (3.3)$$



В работах Выгодской Н.Н. и Горшковой И.И. приводятся серии кривых, построенных по результатам численного моделирования процессов переноса излучений в растительном покрове, отражающих зависимость СКЯ посева зерновой культуры (пшеницы) от параметров  $L$ ,  $\theta_\varphi$ ,  $r_{\lambda\varphi}$ ,  $r_S$ ,  $h_\oplus$ ,  $D_\lambda/S_\lambda$ , а также дается интерпретация результатов и содержатся практические рекомендации по использованию разных участков спектра. Приводимые ниже выкладки относятся к области спектра 400 – 1000нм.

Зависимость СКЯ растительного покрова (РП) от плотности его  $L$  при фиксированных значениях прочих параметров определяется изменением длины оптического пути солнечных лучей в РП при возрастании  $L$  (величина  $r_\lambda$  всегда убывает), изменением доли просвечивающих через полог РП участков почвы и многократным рассеянием потоков радиации внутри РП. При  $r_\varphi > r_S$  убывающая, при  $СК^* = 0$  – функция  $r_\lambda(L)$  интенсивно убывающая; при  $1.8 > СК^* > 0$  функция  $r_\lambda(L)$  медленно убывающая, при  $СК^* > 1.8$  – возрастающая. При  $СК^* = 1.8$  называют пороговым  $СК^*_{II}$ .

В ближнем ИК диапазоне значение порогового контраста составляет пороговым  $СК^*_{II} = 0,6$ .

При прочих фиксированных условиях увеличение доли рассеянной радиации  $D_{II}$  в падающем потоке мало меняет вид функции ( $L$ ).

Наиболее успешно индикацию  $L$  можно проводить в случае интенсивно убывающей и интенсивно возрастающей функции  $R_\lambda(L)$ . Поэтому, например, при ведении дистанционных исследований в случае произрастания РП на черноземе величину  $L$  светло-зеленой и желто-зеленой растительности целесообразно определять с использованием длины волны 550 нм, а еще лучше – 670 нм. Использование ближнего ИК-диапазона для определения  $L$  РП на светлых почвах неэффективно.

При фиксированных значениях  $L$  и других параметров максимальное значение СКЯ отмечают при горизонтальной ориентации фитоэлементов и минимальное – при вертикальной. Наиболее распространенной для РП является сферическая ориентация. Отклонения от сферической ориентации наблюдаются для посевов пшеницы в случаях: в период засухи, когда листья

обвисают; на фенофазе кущения, когда увеличивается вертикальность лист-вы; на фенофазах восковой и полной спелости при деминировании стеблей и колосьев; при полегании посевов, когда общая ориентация РП является горизонтальной.

Отсюда следует, например, что для индикации полегания и сомкнутых посевов на светлых почвах, а также зеленых посевов (в фазах кущения) на темных почвах оптимальным является ближний ИК-диапазон спектра. Отношение  $R_{\lambda \text{ вид}}/R_{\lambda \text{ БИК}}$  определяется  $L$ , но практически не зависит от ориентации фитоэлементов. При  $L \geq 3$  это отношение инвариантно к цвету почвы.

При разных высотах Солнца  $h_{\text{R}}$  зависимость  $r_{\lambda}(L)$  определяется значением спектрального контраста  $СК^*$ . При  $СК^* < СК^*_{\text{П}}$  функция  $r_{\lambda}(L)$  убывающая, при  $СК^* > СК^*_{\text{П}}$  – возрастающая. Эта тенденция наблюдается для различных  $h_{\text{R}}$ , но значения  $СК^*_{\text{П}}$  снижаются при уменьшении  $h_{\text{R}}$  следующим образом:

Таблица XX

$h_{\text{R}}$	15°	45°	65°
Видимый диапазон, $СК^*_{\text{П}}$	1,0	1,5	1,8
БИК диапазон, $СК^*_{\text{П}}$	0,4	0,5	0,4

При фиксированных значениях  $L$  зависимость  $R_{\lambda}(h_{\text{R}})$  определяется величиной  $СК^*$  и ориентацией фитоэлементов.

При сферической ориентации фитоэлементов в ближнем ИК-диапазоне при  $R_{\text{ф}} = 0,07 - 0,25$  характерно снижение СКЯ по мере увеличения  $h_{\text{R}}$  для редких и плотных РП; снижение СКЯ более быстро при  $СК^* < 1 - 1,5$ , чем при  $СК^* > 1,5$ . В видимом диапазоне возможны различные тенденции дневного хода СКЯ, особенно в редких РП. Для плотных сомкнутых РП абсолютные значения амплитуд СКЯ в интервале  $h_{\text{R}}$  от 15° до 65° практически остаются постоянными в случае  $СК^* > 0,25$ . В несомкнутых РП, чем меньше  $L$ , тем выше значение  $СК^*_{\text{П}}$ , при которых отсутствует дневной ход СКЯ.

В отличие от функции  $R_{\lambda}(L)$  при  $h_{\text{R}} = \text{const}$  функция  $R_{\lambda}(h_{\text{R}})$  при фиксированных  $L$  при  $СК^* < СК^*_{\text{П}}$  является возрастающей, а при  $СК^* > СК^*_{\text{П}}$  - убывающей. Наибольшие амплитуды изменений  $\Delta r(h_{\text{R}}) = 35\%$  формируются для среднесомкнутого полого РП  $СК^* > 1,8$ ,  $L=1$ .

Для РП с горизонтально расположенными фитоэлементами дневной ход СКЯ при наблюдении в надир отсутствует как в видимом, так и в БИК-диапазоне спектра.

При доминировании вертикально ориентированных фитоэлементов РП при  $R_{\phi} = T_{\phi}$  функция  $r_{\lambda}(h_{\oplus})$  является возрастающей. Значения относительных изменений СКЯ,  $\Delta r_{\text{отн}} = (r_{\text{max}} - r_{\text{min}}) / r_{\text{max}}$ , нормированных по СКЯ  $r_{\lambda} = \text{max}$  в интервале  $h_{\oplus} = 15-65^{\circ}$  для разных типов ориентации фитоэлементов в большей степени определяются величиной СК\*, чем L:

L		1,0		3,0	
СК*		3,44	-0,25	3,44	0,25
$\Delta r_{\text{отн}}, \%$	Сферическая ориентация	-37	20	-30	-24
	Вертикальная ориентация	27	79	24	79

Рассмотренные выше примеры функций  $r_{\lambda}(L, h_{\oplus})$  относятся к ситуациям, когда  $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$  - т.е. к условиям безоблачной чистой атмосферы при  $h_{\oplus} > 15-25^{\circ}$ . В реальных ситуациях условие  $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$  выполняется далеко не всегда. Об этом свидетельствуют данные таблиц 1-5 (Приложение 1) о состоянии неба при измерениях СКЯ: многие эксперименты проводились в наперед заданное время, и доля измерений, проведенных при безоблачной погоде, не превысила 1/3.

Общей закономерностью, выявленной при анализе расчетных данных, является сглаживание зависимостей СКЯ от  $h_{\oplus}$  при увеличении доли  $D_{\lambda}$ . При некоторой эффективной высоте Солнца  $h_{\oplus \text{эф}}$ , (или/и)  $\theta_{\text{эф}1}$ , лежащей в пределах  $35-45^{\circ}$ , формируются численно равные значения СКЯ при  $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$  (значения  $r_{\lambda}^{S_{\lambda}}$ ) СКЯ при  $S_{\lambda} \ll D_{\lambda}$  (значения  $r_{\lambda}^{D_{\lambda}}$ ). Это значит, что зависимость СКЯ от прочих параметров модели при пасмурной погоде будет такая же, как и при  $h_{\oplus \text{эф}}$  в случае ясного неба. Исходя из указанного свойства в ряде расчетных схем значения СКЯ и альbedo для суммарной радиации находятся с учетом  $S_{\lambda} / D_{\lambda}$  и  $D_{\lambda} / Q_{\lambda}$  как взвешенная сумма  $r_{\lambda}^{S_{\lambda}}$  при некоторой  $h_{\oplus}$  и  $r_1$  при  $h_{\oplus \text{эф}}$  численно равного  $r_{\lambda}^{D_{\lambda}}$  [15].

В случае  $h_{\oplus} \approx h_{\oplus \text{эф}}$  соотношение между  $r_{\lambda}^{S_{\lambda}}$  и  $r_{\lambda}^{D_{\lambda}}$  определяется в первую очередь видом функции  $r_{\lambda}^{S_{\lambda}(h_{\oplus})}$ : если  $r_{\lambda}(h_{\oplus})$  функция возрастающая, то  $r_{\lambda}^{D_{\lambda}} >$

$r_{\lambda}^{S\lambda}$  при  $h_{\oplus} > 40^{\circ}$  и  $r_{\lambda}^{D\lambda} < r_{\lambda}^{S\lambda}$  при  $h_{\oplus} < 40^{\circ}$ ; если  $r_{\lambda}(h_{\oplus})$  функция убывающая, то  $r_{\lambda}^{D\lambda} > R_{\lambda}^{S\lambda}$  при  $h_{\oplus} > 40^{\circ}$  и  $r_{\lambda}^{D\lambda} < R_{\lambda}^{S\lambda}$  при  $h_{\oplus} < 40^{\circ}$ . Абсолютные значения разности  $r_{\lambda}^{S\lambda} - r_{\lambda}^{D\lambda}$  при  $L, h_{\oplus} = \text{const}$  существенно зависят от СК\*, причем влияние  $S_{\lambda}/D_{\lambda}$  на СКЯ наиболее существенно проявляется при низких  $r_{\lambda}$  и для тех РП, в которых сильнее выражен дневной ход СКЯ.

Так как при  $h_{\oplus} \sim h_{\oplus\text{эф}}$  СКЯ инвариантны к изменению  $S_{\lambda}/D_{\lambda}$ , целесообразно приведение значений  $r_{\lambda}$ , полученных по измерениям при различных  $h_{\oplus}$  и  $S_{\lambda}/D_{\lambda}$ , к  $r_{\lambda}$  при  $h_{\oplus\text{эф}}$ .

Исследования показали, что изменения СКЯ при  $L, R_{\phi}$  и  $R_S = \text{const}$  в зависимости от  $h_{\oplus}$  и  $S_{\lambda}/D_{\lambda}$  в ряде случаев сопоставимы с относительными изменениями СКЯ в зависимости от  $L$  и  $R_{\lambda}$  при  $h_{\oplus}, S_{\lambda}/D_{\lambda} = \text{const}$ . Поэтому пренебрежение зависимостью  $R_{\lambda}(h_{\oplus}, S_{\lambda}/D_{\lambda})$  может привести к грубым ошибкам при оценке плотности полога  $L$ . В случае зеленой растительности наиболее значимые ошибки будут на темных почвах в зеленой части спектра, и на светлых – в ближнем ИК-диапазоне.

Чем меньше выражена зависимость СКЯ от  $L, r_{\lambda}$  и  $r_{\phi}$ , тем в большей степени требуется учет влияния на величины СКЯ условий освещения. Приведенные выше оценки справедливы для РП, у которых можно принять  $r_{\phi} = T_{\phi}$ , т.е. для посевов зерновых бобовых и других растений. Теоретические модели позволяют исследовать не только надирные значения СКЯ, но и угловую структуру потоков отраженной радиации.

Анализ зависимости СКЯ растительного покрова от различных параметров позволяет практически полностью объяснить особенности изменений величин СКЯ по экспериментальным данным, описанным выше.

В работах Выгодской Н.Н. и Горшковой И.И. показано, что различные отношения величин СКЯ в видимом и ближнем ИК участках спектра позволяют более эффективно определять величину плотности покрова  $L$  и биомассу посевов, связанную с их урожайностью. Рассмотрены параметры  $P_1=r_{370}/r_{670}$ ;  $P_2=r_{610}/r_{350}$ ;  $P_3=r_{550}r_{870}/r_{670}$ ;  $P_4=r_{610}r_{870}/r_{550}$ ;  $P_5=(1-r_{670}/r_{550})/(1+r_{670}/r_{550})$ ;  $P_6=(r_{870}-r_{550})/(r_{870}+r_{550})$ ;  $P_7=P_5r_{870}$ ;  $P_8=(r_{193}-r_{675})/(r_{795}-r_{675})$ .

Наиболее инвариантным к изменению углов наклона фитоэлементов  $\theta_{\Phi}$  и яркости просвечивающих участков почвы являются параметры  $P_6$  и  $P_7$ .

Так как параметры  $P_6$  и  $P_7$  функционально связаны с величинами  $L$  и  $S_{\text{пп}}$ , то они позволяют выделять градации  $S_{\text{пп}}$  с интервалом 10%. Показано, что зависимость от  $h_{\text{®}}$  параметров  $P_2, P_5, P_7$  для пшеницы и  $P_6$  для клевера – линейная, в то время как СКЯ на  $\lambda = 670$  и  $780$  нм меняются в зависимости от  $h_{\text{®}}$  по нелинейному закону.

Аналогичный подход применяется при исследованиях зависимости СКЯ леса от физиологических, структурных и внешних факторов [12].

Как экспериментальные, так и теоретические исследования указывают на весьма сложную зависимость величин СКЯ от параметров  $L$ ,  $r_S$ ,  $r_{\Phi}$ ,  $\theta_{\Phi}$ ,  $h_{\text{®}}$ ,  $D_{\lambda}, S_{\lambda}, \theta$ , а также увлажненности посевов  $w$ . В связи с этим при решении обратных задач дистанционных исследований РП – определения параметров  $L$ ,  $r_{\Phi}$ ,  $\theta_{\Phi}$ , по данным о  $V_{\lambda}$  или  $r_{\lambda}$  – необходим правильный выбор рабочих диапазонов, а также привлечение не только теоретической и экспериментальной априорной информации, но и метеоданных по  $w$ ,  $D_{\lambda}$ ,  $S_{\lambda}$ . С учетом погрешностей измерения сигналов в аппаратуре и методов обработки сигналов при сложных зависимостях СКЯ от перечисленных факторов при дистанционных исследованиях растительного покрова необходима также точная информация о величинах  $L$ ,  $w$ ,  $r_S$ ,  $r_{\Phi}$  на *эталонных* (ключевых) участках обследуемых территорий.

## **4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

### **4.1. Задачи и сущность фотометрических измерений**

Для оценки спектральных коэффициентов яркости по материалам многозональных аэрокосмических съемок необходимо определить освещенность элементов изображения в фокальной плоскости съемочной системы в момент получения снимков с учетом всех характеристик съемочной аппаратуры и условий съемки. Подобные задачи решаются методами фотографической или электронной фотометрии, позволяющими оценить потоки лучистой энергии от объектов съемки на входе оптической съемочной системы.

Теоретическая фотометрия, как раздел физической оптики, занимается вопросами измерения лучистой энергии, отраженной или излученной земными объектами. Наиболее распространенными приемниками излучения, используемыми при этих измерениях, являются человеческий глаз (визуальная фотометрия), фотопленка (фотографическая фотометрия) и фотоэлектрические приемники (фотоэлектрическая фотометрия).

#### **Основные понятия и величины фотометрии**

Существуют два вида единиц измерения фотометрических величин: визуальные и энергетические.

Визуальные единицы основаны на оценках зрительного восприятия, возникающем у человека под воздействием попадающего в глаз электромагнитного излучения с длинами волн примерно от 0,39 до 0,77 мкм. В основе энергетических единиц лежит величина физической энергии, переносимой электромагнитным излучением.

Учитывая, что космическое фотографирование выполняется и в области спектра с длинами волн более 0,77 мкм, фотометрические измерения по материалам космической фотосъемки, как правило, выполняются в энергетических единицах.

Основными величинами, характеризующими электромагнитное излучение, являются: поток излучения ( $\Phi_э$ ), освещенность ( $E_э$ ), количество освещения ( $H_э$ ) и яркость ( $B_э$ ).

Поток характеризует мощность излучения  $\Phi_э$  (Вт) (энергия  $W$ , переносимая излучением в единицу времени  $t$ ). Освещенность  $E_э$  характеризует поверхностную плотность потока излучения — величину потока, приходящуюся на единицу поверхности  $S$ , (Вт/м<sup>2</sup>).

Количество освещения  $H_э$ — произведение освещенности на длительность освещения (поверхностная плотность энергии излучения) (Вт·с)/м<sup>2</sup> или Дж/м<sup>2</sup>.

Яркость является характеристикой пространственного распределения потока излучения и определяется величиной потока, поступающего в пределах телесного угла ( $\omega$ ) в один стерадиан с единицы видимой в данном направлении поверхности  $B_э = \Phi_э / \omega \cos \varphi$  (Вт/(ср·м<sup>2</sup>)), где  $\varphi$ — угол между направлением на поверхность и нормалью к ней.

В случае неравномерного излучения, величины, входящие в перечисленные выражения, записывают в дифференциальной форме.

Рассмотренные величины используют для характеристики, как монохроматических излучений, так и излучений сложного спектрального состава. Переход от спектральных значений к зональным осуществляется так, с помощью формул вида  $\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} d\lambda$ , в которых под знаком интеграла находятся значения спектральной плотности соответствующих величин [отношение среднего значения величины в малом (обычно — единицы нанометров) спектральном интервале к ширине этого интервала], выражаемые в Вт/нм, Вт/м<sup>2</sup>·нм, Вт·с/м<sup>2</sup>·нм, Вт/м<sup>2</sup>·ср·нм.

Кроме основных фотометрических величин, для характеристики оптических свойств объектов, средств съемки и изображения используются уже упоминавшиеся ранее производные от основных величин:

коэффициент яркости ( $r$ ), контраст ( $K$ ), деталь яркости ( $\lg U$ ), альbedo ( $q$ ), коэффициент пропускания ( $\tau$ ), оптическая плотность ( $D$ ).

В тех случаях, когда фотометрические измерения производят по материалам съемки, выполненной в видимой области спектра, а целью измерений является определение безразмерных величин (коэффициент яркости, контраст и т. п.), возможно использование фотометрических величин, выраженных в визуальных единицах: световой поток  $F$  — в люменах (лм); освещенность  $E$  в люксах — лк (лм/м<sup>2</sup>); количество освещения  $H$  в люкс-секундах (лк·с) и яркость в нитах — нт(лм/м<sup>2</sup>·ср).

Если известно относительное распределение освещенности (или другой основной фотометрической величины) по спектру и интегральное значение освещенности в люксах, то энергетическая освещенность, соответствующая некоторой зоне  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  расположенной в пределах видимой области спектра, может быть вычислена по формуле

$$E_z = ME \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}^{лкс} d\lambda \right) / \left( \int_{380}^{770} E_{\lambda}^{лкс} V_{\lambda} d\lambda \right) \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (4.1.)$$

где  $M = 0,00147$  Вт/лм — механический эквивалент света — мощность излучения в ваттах, вызывающая ощущение светового потока в 1 лм при  $\lambda = 555$  им;  $V_{\lambda}$  — относительная спектральная чувствительность дневного зрения.

В дальнейшем, для удобства написания, в буквенных обозначениях энергетических величин индекс “э” опускается.

### **Особенности и задачи фотометрических измерений**

Космические фотоснимки содержат информацию о геометрических и фотометрических характеристиках объектов местности. Теория, методы и технология геометрических (фотограмметрических) измерений по материалам космической фотосъемки достаточно хорошо разработаны и находят широкое производственное применение при составлении топографических и тематических карт.

Иначе обстоит дело с фотометрическими измерениями. Теория, методы и технические средства фотометрических измерений разработа-



ны еще недостаточно. Кроме того, сами измерения имеют следующие особенности, затрудняющие их выполнение.

Оптические характеристики объектов, в отличие от геометрических, неустойчивы: как уже отмечалось выше, они варьируют в зависимости от состояния объекта, условий его освещения и наблюдения.

Истинные значения фотометрических характеристик объектов местности известны с несравненно меньшей точностью, чем значения геометрических характеристик.

При фотометрических измерениях по материалам космической съемки необходимо учитывать оптические характеристики атмосферы, что является сложной и не однозначно решаемой задачей. Выполненные в последние годы исследования показали, что относительная СКО измерений методом фотографической фотометрии не превышает 4—6%.

С другой стороны, оптимизация параметров бортовых средств фотосъемки, решения экспонетрической задачи (и выбора режимов химико-фотографической обработки фильмов при получении материалов на пленках)— факторов, существенно влияющих на информативность фотоснимков, а также развитие количественных автоматизированных методов дешифрирования невозможны без осуществления фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки.

Фотометрические измерения используются для решения трех классов фотометрических задач:— прямых, обратных и атмосферных.

1) *Прямые задачи*: известны фотометрические характеристики объектов, средств и условий съемки; требуется определить фотометрические характеристики изображения объектов местности.

Основные прямые задачи.

1а). Определение освещенности, соответствующей оптическому изображению объекта.

1б) Определение детали освещенности оптического изображения.

2) *Обратные задачи*: известны фотометрические характеристики изображения объектов, средств и условий съемки; требуется определить фотометрические характеристики объектов местности.

Основные обратные задачи.

2а). Определение коэффициента яркости объекта.

2б) Определение яркости объекта.

2с) Определение контраста между объектом и фоном.

3) *Атмосферные задачи*: известны фотометрические характеристики объектов местности, их изображения, средств и условий съемки (за исключением атмосферных); требуется определить фотометрические характеристики атмосферы.

Основные атмосферные задачи.

3а). Определение коэффициента пропускания атмосферы.

3б) Определение коэффициента задымленности атмосферы.

При решении всех перечисленных задач определяются зональные значения фотометрических величин, соответствующие зонам спектра, в которых производилась фотосъемка.

### **Фотометрические измерения материалов космической фотосъемки**

Решение фотометрических задач по материалам космической фотосъемки осуществляется в результате выполнения экспериментальных работ и вычислений искомых фотометрических величин. Сущность этих работ можно проиллюстрировать блок-схемой процесса фотометрических измерений, приведенной на рис. 4.1. Основным их содержанием являются: экспонирование сенситограмм; химико-фотографическая обработка сенситограмм вместе с фильмом; измерения значений оптических плотностей полей сенситограмм и изображений изучаемых объектов; нахождение по характеристическим кривым значений освещенности, соответствующих оптическому изображению объектов; вычисление искомых фотометрических величин.

Методика работы по каждому из блоков схемы излагается в рамках курсов «Аэрофотография» и хорошо описана в учебной и научно-технической литературе.

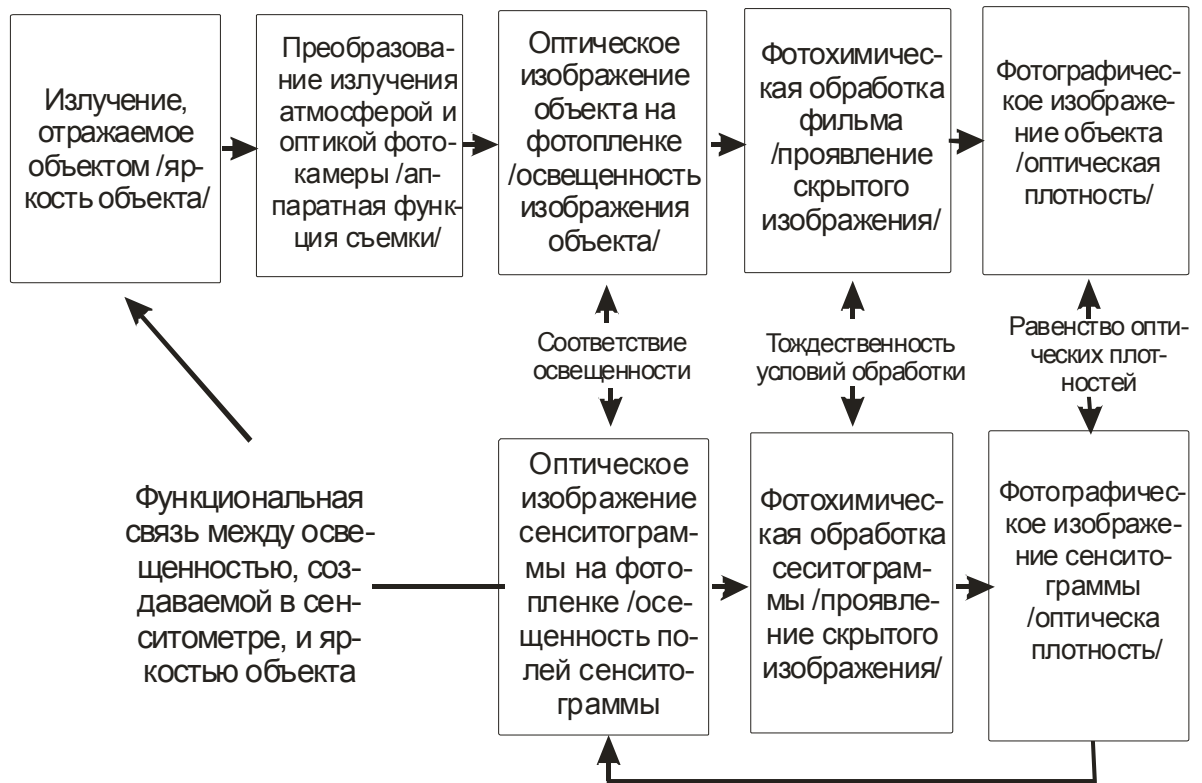


Рис. 4.1 Блок-схема процесса фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки

#### 4.2. Алгоритмы решения основных фотометрических задач

Алгоритмы решения всех фотометрических задач получают путем преобразования основных формул фотометрии: формул, устанавливающих связь между яркостными характеристиками объектов местности и освещенностью их оптического изображения в фокальной плоскости фотоаппарата, и формул, описывающих связь между освещенностью в фокальной плоскости фотоаппарата и освещенностью, создаваемой в сенситометрическом устройстве при экспонировании сенситограмм. Сущность преобразования этих формул заключается в следующем.

$$e = \pi c_1 c_2 \bar{T} \bar{r} (B + B_D + B_P) \quad (4.2.)$$

$$e = \pi c_1 \bar{T} \bar{r} \cos^4 \varphi (B + B_D + B_P) \quad (4.3.)$$

$$e = c_1 c_2 E \bar{T} \bar{r} (\bar{r} + \bar{r}_D + \bar{r}_P \bar{r}_M) \quad (4.4.)$$

$$e = c_1 E \bar{T} \bar{r} \cos^4 \varphi (\bar{r} + \bar{r}_D + \bar{r}_P \bar{r}_M) \quad (4.5.)$$

$$e = c_1 c_2 E \bar{T} \bar{r} \left[ (\bar{r}_\phi + \bar{r}_D + \bar{r}_P \bar{r}_M) + \Pi (\bar{r} - \bar{r}_\phi) \right] \quad (4.6.)$$

$$e = \pi c_1 c_2 E \bar{T} \bar{r} \left\{ \left[ \frac{1}{2} (\bar{r} + \bar{r}_\phi) + \bar{r}_D + \bar{r}_P \bar{r}_M \right] + \frac{\bar{\Pi}}{2} (\bar{r} - \bar{r}_\phi) \right\} \quad (4.7.)$$

Уравнения (4.2.) — (4.7.) решают относительно искомым фотометрических величин.

$$H = H^C \Delta_t \Delta_S \quad (4.8.)$$

$$H = H^C \Delta_t \Delta_S \Delta_H \quad (4.9.)$$

Подставляют в полученные выражения формулу (4.8.) или (4.9.) и приводят эти выражения к виду, удобному для вычислений.

При этом используются следующие обозначения:

$t\eta = t_{\text{эф}}$  — эффективное время экспонирования в фотоаппарате;

$t^c \eta^c = t_{\text{эф}}^c$  — эффективное время экспонирования в сенситометре;

$\tau_\phi \cos^4 \varphi = \tau_0 C_\phi$  где  $\tau_0$  — коэффициент пропускания оптической системы вдоль главной оптической оси,

$C_\phi = e_\phi / e_0$  — коэффициент падения освещенности оптического изображения по полю кадра;

$$A = \frac{4t_{\text{эф}}^2 \Delta_t}{t_{\text{эф}} \tau_0 E T} \left( \frac{f}{d} \right)^2, \quad A' = \frac{4t_{\text{эф}}^2 \Delta_t}{\pi t_{\text{эф}} \tau_0 E T} \left( \frac{f}{d} \right)^2, \quad A'' = \frac{4t_{\text{эф}}^2 \Delta_t}{t_{\text{эф}} \tau_0 E} \left( \frac{f}{d} \right)^2, \quad (4.10.)$$

— постоянные для данного кадра коэффициенты;

$C = \tau_D + \tau_P \tau_M, \quad C' = B_D + B_\phi$  — коэффициенты, учитывающие влияние воздушной дымки и рассеянного в камере излучения.

С учетом этих обозначений получим алгоритмы решения основных фотометрических задач, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№ за- дач	Макрообъекты		Одиночные микрообъекты	
1	2		3	
1.1	$g^c = \frac{C_\varphi}{A\Delta_S} (r + C)$	4.11.	$g^a = \frac{C_\varphi}{A\Delta_S\Delta_H} [r_\Phi + C + (r + r_\Phi)]$	4.12
	$g^c = \frac{C_\varphi}{A'\Delta_S} (B + C')$	4.13	$g^a = \frac{C_\varphi}{A'\Delta_S\Delta_H} [r_\Phi + C + (r + r_\Phi)]$	4.14
1.2	$\lg u = \lg \frac{g^c}{g_\Phi^c} = \lg \left[ \frac{\Delta_{S\Phi} U (r + C)}{\Delta_S (r + UC)} \right]$	4.15	$\lg u_\varphi = \lg \frac{\Delta_{S\Phi} [1 + \Pi(U - 1)] r + UC}{\Delta_S \Delta_H (r + UC)}$	4.16
2.1	$r = A \frac{\Delta_S}{C_\varphi} g^a - C$	4.17	$r = \frac{A}{C_\varphi \Pi} [g^a \Delta_S \Delta_H - g_\Phi^a \Delta_{S\Phi} (1 - \Pi)] - C$	4.18
2.2	$B = A' \frac{\Delta_S}{C_\varphi} g^a - C'$	4.19	$B = \frac{A'}{C_\varphi \Pi} [g^a \Delta_S \Delta_H - g_\Phi^a \Delta_{S\Phi} (1 - \Pi)] - C'$	4.10
2.3	$K = \frac{k_S g^c}{g^c - (1 + k_S) C C_\varphi / A \Delta_S}$ при условии $\Delta_S \approx \Delta_{S\Phi}$	4.11	$K = \frac{k_S g^c}{g^c (k_S + \Pi - \Pi k_S) - (1 + k_S) \Pi C C_\varphi / A \Delta_S}$ при условии $\Delta_S \approx \Delta_{S\Phi}, \Delta_H \approx 1$	4.12
3.1	$T = \frac{A''}{r_H - r_I} \left( \frac{g_H^a \Delta_{S\Phi H}}{C_{\varphi H}} - \frac{g_I^a \Delta_{S\Phi I}}{C_{\varphi I}} \right)$	4.13	$T = \frac{A''}{r_H - r_I} \left[ \left( \frac{g_H^a \Delta_{S\Phi H} \Delta_{H\Phi H}}{C_{\varphi H} \Pi_H} - \frac{g_I^a \Delta_{S\Phi I} \Delta_{H\Phi I}}{C_{\varphi I} \Pi_I} \cdot \frac{1 - \Pi_H}{\Pi_H} \right) - \left( \frac{g_H^a \Delta_{S\Phi H} \Delta_{H\Phi H}}{C_{\varphi H} \Pi_H} - \frac{g_I^a \Delta_{S\Phi I} \Delta_{H\Phi I}}{C_{\varphi I} \Pi_I} \cdot \frac{1 - \Pi_I}{\Pi_I} \right) \right]$	4.14
3.2	$r_H = \frac{A'' g_I^a \Delta_{S\Phi I}}{T C_{\varphi I}} - (r_I + r_P r_H)$ $r_H = \frac{A'' g_H^a \Delta_{S\Phi H}}{T C_{\varphi H}} - (r_I + r_P r_H)$	4.15	$r_H = \frac{A''}{T} \left( \frac{g_I^a \Delta_{S\Phi I} \Delta_{H\Phi I}}{C_{\varphi I} \Pi_I} - \frac{g_H^a \Delta_{S\Phi H} \Delta_{H\Phi H}}{C_{\varphi H} \Pi_H} \cdot \frac{1 - \Pi_I}{\Pi_I} \right) - (r_I + r_P r_H)$ $r_H = \frac{A''}{T} \left( \frac{g_H^a \Delta_{S\Phi H} \Delta_{H\Phi H}}{C_{\varphi H} \Pi_H} - \frac{g_I^a \Delta_{S\Phi I} \Delta_{H\Phi I}}{C_{\varphi I} \Pi_I} \cdot \frac{1 - \Pi_H}{\Pi_H} \right) - (r_I + r_P r_H)$	4.16

Примечания. 1. В формулах (4.15 и (4.16)  $U = r/r_\Phi$  - контраст объекта. 2. В формулах (4.11) и (4.12)  $k_S = (g^c - g_\Phi^c) / (g^c - g_\Phi^c)$  - контраст оптического изображения.

Приведенные во 2-й и 3-й графах таблицы 4.1. формулы служат для вычисления одних и тех же величин. Формулы второй графы применяют при измерениях макроизображений объектов, т. е. изображений, линейные размеры которых значительно больше ширины элементов решетки, разрешаемой системой (в этом случае  $\Pi=1$ ,  $\Delta_n=1$ ). Формулы третьей графы используют при измерении одиночных, имеющих приблизительно  $\Pi$ -образное распределение яркости, микроизображений, размеры которых близки к ширине штрихов разрешаемой решетки (при этом  $\Pi < 1$ ,  $\Delta_n \neq 1$ ). Если  $\Pi = \Delta_n = 1$ , то все формулы графы 3 преобразуются в соответствующие выражения графы 2.

Формулы (4.11) и (4.13) отличаются от формул (4.12) и (4.14) лишь используемыми в качестве исходных величин характеристиками объектов (коэффициент яркости — яркость).

Параметры атмосферы ( $T$  и  $r_d$ ) определяют известным способом двух полей. Фотографируют фотометрические эталоны, коэффициенты яркости которых известны. В результате фотометрических измерений изображения эталонов получают два уравнения с двумя неизвестными, решая которые, получают формулы (4.13) — (4.16). Индексы I и II в этих формулах означают, что соответствующие величины относятся к I или II эталонам. В действительности для контроля и повышения точности желательно использовать более двух эталонов.

### **4.3. Подготовка исходных данных для фотометрических расчетов**

Вычисление искомых фотометрических величин может производиться с помощью микрокалькуляторов, универсальных или специализированных ЭВМ. Во всех случаях существенной особенностью решения фотометрических задач по материалам космической фотографии является необходимость подготовки значительного числа исходных величин, являющихся аргументами рассмотренных в предыдущем параграфе алгоритмов.

## Параметры бортовой съемочной аппаратуры

Фактические значения параметров фотоаппаратуры:  $f$ ,  $d$ ,  $\tau_\phi$ ,  $r_p$ ,  $t$ ,  $\eta$ ,  $\Pi$ ,  $t^c$ ,  $\eta^c$ ,  $e^c$  (фокусное расстояние и диаметр действующего отверстия объектива; коэффициент пропускания оптической системы и коэффициент падения освещенности по полю кадра; продолжительность экспонирования и коэффициент полезного действия затвора; ФПМ объектива; коэффициент светорассеяния в камере и распределение его по полю кадра) определяют на заводе-изготовителе и приводят в паспорте каждого конкретного образца аппаратуры. Точность определения фактических значений этих величин должна быть строго регламентирована, и находится в пределах 1-3 %.

Примерная точность определения параметров съемочной фотосистемы:

Обозначения относительных СКО	$\sigma_f$	$\sigma_d$	$\sigma_t$	$\sigma_\Pi$	$\sigma_{\tau_\phi}$	$\sigma_t$	$\sigma_\eta$	$\sigma_{t^c}$	$\sigma_{\eta^c}$	$\sigma_{e^c}$
Значения относительных СКО (%)	0,1	1	2	5	5	1	1	1	1	2

Иногда в паспорте фотоаппарата вместо отдельных параметров фотосистемы приводят значения, соответствующие их комбинациям или аналогам: вместо значений  $f$  и  $d$  – относительное отверстие или обратную ему величину ( $f:d$ ); вместо величин  $t$  и  $\eta$  — эффективную выдержку ( $t_{\text{эф}}$ ); вместо  $t^c$ ,  $\eta^c$  и  $e^c$  — количество освещения ( $H^c = t^c \eta^c e^c$ ); а произведение  $\tau \cos^4 \phi$  заменяют произведением  $\tau_0 C_\phi$ .

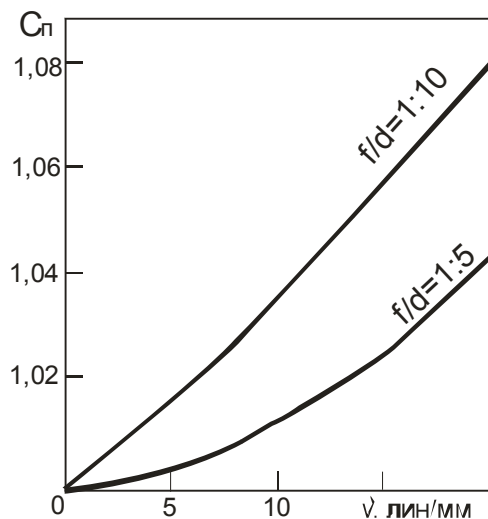


Рис. 4.2. Графики функции  $C_\Pi(v)$

Величину  $\Pi$  следует определять в соответствии с формулой для одиночных элементов изображения  $\Pi = (e - e_{\phi}) / (e_o - e_{\phi o})$ . Однако в настоящее время общепринятой величиной является ФПМ оптической системы  $\Gamma_{\text{ч}}$ , характеризующая передачу модуляции освещенности в изображении решетки. При отсутствии данных о значении величины  $\Pi$  она может быть приближенно заменена величиной  $\Pi'_v$ . Порядок ошибок, возникающих при этом, иллюстрируют графики, приведенные на рис. 4.2., где  $C_{\Pi} = \Pi / \Pi'_v$  — коэффициент, характеризующий различия между значениями величин  $\Pi$  и  $\Pi'_v$  в зависимости от соответствующей им частоты и относительного отверстия объектива. Как видно из рис. 4.2., ошибка, возникающая за счет замены величины  $\Pi$  соответствующим значением ФПМ, с увеличением относительного отверстия уменьшается и при средних значениях отверстия, в случае измерения элементов изображения, ширина которых больше или равна 0,025 мм, не превышает 5 %.

Величину коэффициента светорассеяния в камере часто характеризуют одним значением, однако в действительности она может изменяться по полю кадра, и в этом случае вместо величины  $r_p$  следует использовать значения функции  $r_p(\varphi)$ .

### **Параметры, характеризующие условия съемки**

Основными характеристиками условий съемки, от которых в значительной степени зависит точность фотометрических измерений, являются значения освещенности местности, коэффициента пропускания и коэффициента задымленности атмосферы.

Вопросы определения освещенности местности подробно рассмотрены в литературе (5, 7, 8, 14).

Более сложной и, несмотря на многочисленные исследования в этой области, все еще до конца не решенной задачей является учёт влияния атмосферы на фотометрические свойства космических снимков, в зависимости от высоты  $H$  съемки.



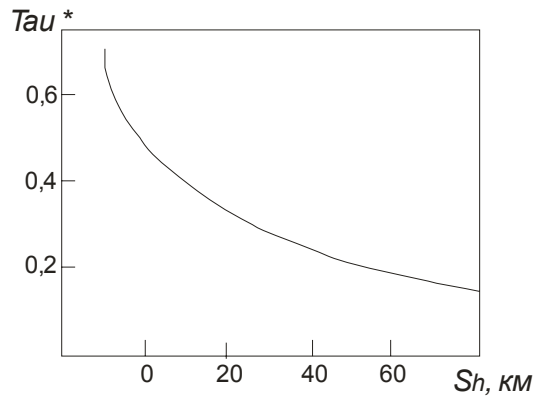


Рис. 4.3. График функции  $\tau^*(S_h)$

Автономных способов определения значений величин  $T$  и  $r_d$  с космического аппарата одновременно со съемкой в настоящее время нет. Непосредственное определение этих величин способом двух полей, требует, как правило, выполнения специальных подспутниковых работ, то есть применимо, в основном, для исследовательских целей. Поэтому пока наиболее доступным для практического применения является комбинированный способ определения оптических параметров атмосферы, заключающийся в сочетании расчетных значений коэффициента задымленности с экспериментальными данными об оптической толщине и индикатрисе рассеяния атмосферы. Если имеются таблицы значений функции  $r_d(r^*, I_0, A_0, A'_0, \varphi, \vartheta)$ , то задача определения величин  $r_d$  и  $T$  сводится к нахождению значений  $\tau^*$  и  $I_0$  характеризующих состояние прозрачности атмосферы во время съемки. Остальные аргументы  $(A_0, A'_0, \varphi, \vartheta)$  могут быть определены по снимкам, а величина  $T$  является известной функцией  $\tau^*$  и  $\varphi$ .

Одним из путей определения оптической толщины атмосферы является использование результатов измерений, ведущихся на актинометрических и озонметрических станциях. Поэтому представляет интерес исследование возможностей интерполяции получаемых станциями значений прозрачности атмосферы.

Учитывая, что сеть метеорологических станций значительно обширнее, чем сеть актинометрических и озонметрических станций в тех случаях, когда нет данных о вертикальной прозрачности атмосферы, а в сфотографированном районе имеются метеостанции, для приближенной

оценки значения оптической толщи атмосферы можно использовать корреляцию между метеорологической дальностью видимости ( $S_N$ ) и оптической толщиной атмосферы. На рис. 4.3. приведен график функции  $\tau^*_{550}(S_N)$  построенный по полученным экспериментальным данным.

Если нет никаких непосредственных или косвенных данных о прозрачности атмосферы во время фотографирования, можно поступить следующим образом. Как уже отмечалось выше, нормальная прозрачность атмосферы ( $\tau^*_{550} \approx 0,3$ ) наблюдается в 47 % случаев, а повышенная ( $\tau^*_{550} \approx 0,2$ ) — в 30%.

Таким образом, можно считать, что с вероятностью, приблизительно равной 0,77, величина оптической толщи атмосферы находится в пределах  $0,2 \leq \tau^*_{550} \leq 0,3$ , а ее средневзвешенное значение равно  $\approx 0,26$ . Соответственно, в отсутствие других данных, эти значения могут быть использованы для вычисления зональной величины оптической толщи атмосферы.

Зональные значения коэффициента прозрачности и оптической толщи атмосферы при  $\tau^*_{550} = 0,2$  и  $0,3$  приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Условное обозначение зоны	$\tau^*_{550} = 0,2$		$\tau^*_{550} = 0,3$	
	P	$\tau^*_{0}$	P	$\tau^*_{3}$
I	0,836	0,179	0,761	0,274
II	0,870	0,139	0,799	0,224
III	0,906	0,098	0,845	0,168
2	0,814	0,206	0,740	0,301
4	0,880	0,128	0,805	0,217
6	0,919	0,085	0,853	0,158

В тех случаях, когда давление атмосферы ( $b$ ) отличается от нормального, а сфотографированный объект находится на высоте  $h$  над уровнем океана, значение оптической толщи атмосферы вычисляют по формуле

$$\tau_{b,h}^* = \tau^* \frac{b}{b_0} \exp(-0,13h) \quad (4.17)$$

где  $h$  выражено в км.

О характере индикатрис рассеяния атмосферы можно судить так же, как и о величине  $\tau^*$ , по значению горизонтальной дальности видимости. Другим возможным, путем определения параметров индикатрис рассеяния может быть способ, основанный на измерении и анализе яркости различных участков небосвода.

Высоту и азимут Солнца, соответствующие дате и времени фотографирования, определяют с помощью таблиц или по известным формулам из астрономии.

Азимут плоскости наблюдения на измеряемый объект относительно солнечного вертикала ( $A'_e$ ) находят как разность азимутов Солнца и объекта в системе координат снимка. Угол визирования на объект вычисляют по формуле

$$\varphi = \arctg l/f \quad (4.18)$$

где  $l$  — расстояние от главной точки снимка до изображения измеряемого объекта.

Альbedo местности можно приближенно принять равным 0,2 для летнего ландшафта в зонах спектра I, II, 1—4 и равным 0,4 — в зонах III, 5 и 6, а при наличии снежного покрова — равным 0,7 во всех зонах. Более точным значением альbedo может служить средневзвешенная по площади величина коэффициента яркости объектов, изобразившихся на снимке ( $q \approx r_m$ ).

Когда значения всех аргументов функции  $r_d(r^*, I_0, h_0, A'_e, \varphi, q)$  определены, находят значение коэффициента задымленности. Для облегчения этой задачи можно использовать таблицы, графики или номограммы. В частности, процесс нахождения величины  $r_d$  можно выполнять в два этапа. На первом находят значение  $r_{d,0}$ , соответствующее наблюдению в надир ( $\varphi = 0$ ), на втором — значение, соответствующее конкретному объекту, направление наблюдения на который определяется углами  $A'_e$ ,

φ. Образцы используемых при этом графиков изолиний значений  $\tau_{д,0}$ , как функции оптической толщи атмосферы, высоты Солнца и альbedo местности (значения  $\tau_{д,0}$  не зависят от азимута), и графиков функций  $\tau_{д,φ}^{отн}$  (φ) для разных  $A'_{\odot}$ ,  $h_{\odot}$ ,  $\tau^*$  приведены на рис. 4.5. и 4.6.

Относительные значения коэффициента задымленности, использованные для построения графиков  $\tau_{д,φ}^{отн}$  (φ), определены по формуле

$$\tau_{д,φ}^{отн} = \tau_{д,φ} / \tau_{д,0} \quad (4.19)$$

$$\text{откуда } \tau_{д,φ} = \tau_{д,φ}^{отн} \tau_{д,0} \quad (4.20)$$

Графики функции  $\tau_{д,φ}^{отн}$  (φ), приведенные на рис. 4.5., получены для  $A'_{\odot} = 90^\circ$ , однако при  $\varphi \leq 30^\circ$  величина  $\tau_{д,φ}$  практически не зависит от азимута.

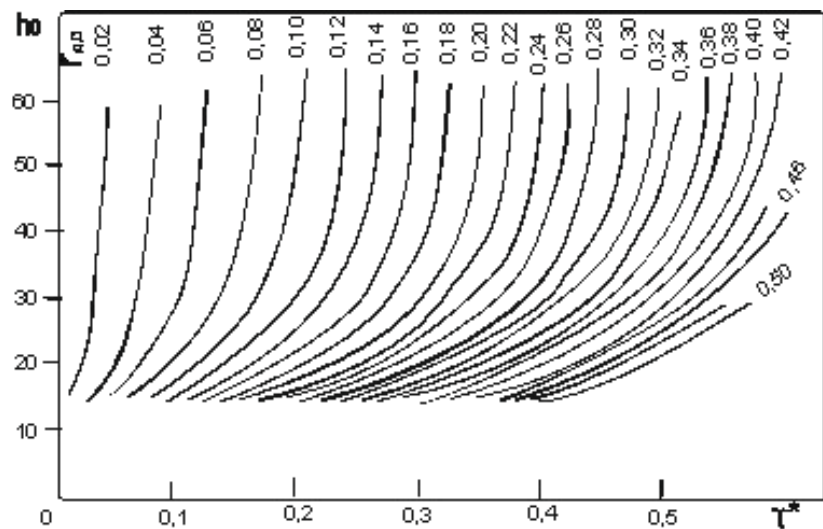


Рис. 4.4. Изолинии значений  $\tau_{д,0}$  при  $q=0,2$ .

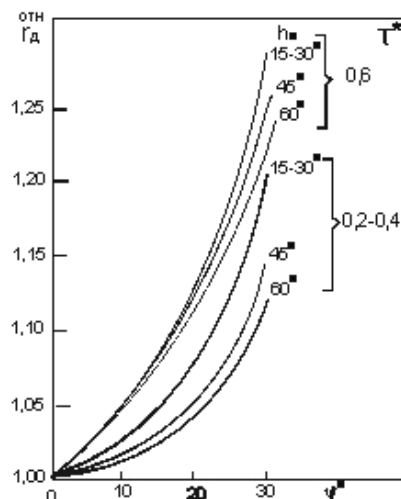


Рис. 4.5. Графики функции  $\tau_{д}$  отн (φ) при  $A' = 90^\circ$ .

## Количество освещения, соответствующее оптическому изображению

Процесс определения количества освещения ( $H = H^c \Delta_1 \Delta_2 \Delta_3$ ), соответствующего оптическому изображению измеряемого объекта, состоит из двух основных видов работ:

измерение оптической плотности изображения объекта и нахождение по характеристической кривой количества освещения ( $H^c = e^{-t \cdot \eta^c}$ ), соответствующего измеренной плотности;

вычисление поправок в величину количества освещения за отклонение от закона взаимозаменяемости ( $\Delta_1$ ), за различия спектрального состава излучения, строящего изображение объекта и использованного при экспонировании сенситограмм ( $\Delta_2$ ), и за влияние мутности эмульсионного слоя и пограничных эффектов проявления ( $\Delta_3$ ).

Измерительные свойства характеристической кривой  $D(\lg H^c)$  в решающей степени определяются условиями экспонирования и проявления сенситограмм, а также зависят от способа и точности измерения значений оптической плотности полей сенситограмм.

Возможны три основных варианта экспонирования сенситограмм:

- 1) за съемочным светофильтром (известны количества освещения полей сенситограммы за этим фильтром);
- 2) без светофильтра (известны количества освещения полей сенситограммы без светофильтра);
- 3) за съемочным светофильтром (известны количества освещения полей сенситограммы без светофильтра).

Сенситограммы впечатывают в каждый кадр или в начало и конец фильма. В последнем случае фильм должен обрабатываться в проявочной машине, что при нормальном режиме обработки обеспечивает удовлетворительную равномерность проявления вдоль всего фильма.

Измерение оптических плотностей полей сенситограммы производят на том же денситометре (микроденситометре), на котором измеряют оптические плотности изображения объектов.

В тех случаях, когда характеристические кривые соответствуют первому и второму вариантам экспонирования сенситограмм, определяемые по ним значения количества освещения ( $H^{\circ}$ ) непосредственно используют для выполнения фотометрических расчетов, а влияние отличий в условиях экспонирования сенситограмм и фильмов учитывают с помощью поправок  $A_t$  и  $A_s$ .

Если используется характеристическая кривая, соответствующая третьему варианту экспонирования сенситограмм (это имеет место в случае применения сенситометра ФСР-41), то определяемые по ней количества освещения ( $H_{хк}$ ) завышены и должны быть уменьшены пропорционально коэффициенту пропускания светофильтра ( $H^{\circ} = H_{хк} \tau_{\phi}$ ). Значения же поправки  $A_s$  в этом случае такие же, как и при использовании первого варианта экспонирования сенситограмм.

При вычислении поправки  $A_s$ , соответствующей первому и третьему вариантам экспонирования сенситограмм, границы зон спектра при экспонировании сенситограмм и при съемке одинаковы ( $\lambda_1^{\circ} = \lambda_1, \lambda_2^{\circ} = \lambda_2$ ).

В случае второго варианта экспонирования сенситограмм значения  $\lambda_1^{\circ}$  и  $\lambda_2^{\circ}$  соответствуют границам светочувствительности используемой фотопленки, а значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , как и в предыдущих случаях, — границам спектральной чувствительности бортовой фотосистемы.

Практически бывает достаточно рассчитать значения поправки  $A_s$  для некоторых классов объектов, имеющих характерные, существенно отличающиеся друг от друга графики значений СКЯ. В качестве примера в таблице 4.3. приведены значения поправки  $A_s$ , рассчитанные применительно к рассмотренным вариантам экспонирования сенситограмм для трех обобщенных классов объектов: зеленые растительные покровы (лиственный лес, травяные покровы, сельскохозяйственные культуры); почвенные покровы (оподзоленные, суглинистые и др.); ахроматические объекты (снег, водная поверхность, черноземы и т. п.).

Как видно из данных, приведенных в табл. 4.3., при экспонировании сенситограмм за съемочными светофильтрами значения по-

правки  $A_s$  близки к единице и в случае использования узких зон спектра практически могут не учитываться.

Таблица 4.3.

Условное обозначение зоны	Экспонирование сенситограмм без светофильтра (второй вариант)			Экспонирование сенситограмм за съёмочным светофильтром (первый и третий варианты)		
	Растительный покров	Почвенный покров	Ахроматические объекты	Растительный покров	Почвенный покров	Ахроматические объекты
I	1,09	1,04	1,06	1,03	0,97	0,99
II	0,76	0,72	0,71	1,06	1,02	1,00
III	1,50	1,57	1,65	0,94	0,98	1,04
1	1,01	1,13	1,12	0,90	1,01	1,00
2	0,60	0,60	0,61	0,99	0,99	1,00
3	0,57	0,58	0,58	1,00	1,00	1,00
4	0,45	0,44	0,44	1,02	1,00	1,00
5	3,38	3,53	3,60	0,94	0,99	1,00
6	1,05	1,05	1,05	0,98	0,99	0,99

Если при решении фотометрических задач используют изображения малых размеров, то кроме поправок  $A_t$  и  $A_s$  необходимо знать величину поправки ( $\Delta_n$ ) за влияние мутности эмульсионного слоя и пограничных эффектов проявления. Значения этой поправки могут быть определены с помощью графиков или таблиц значений функции  $\Delta_n(l, \pm k, \lg H, \gamma)$ . Необходимо выполнение специальных экспериментальных исследований для построения графиков (таблиц) этой функции применительно к различным типам фотопленок, различным значениям характеристик измеряемых изображений ( $l, \pm k$ ) и условиям химико-фотографической обработки фильмов ( $\lg H, \gamma$ ). Так как истинные значения ширины ( $l$ ) и контраста ( $k$ ) оптического изображения измеряемого объекта неизвестны, то задача решается методом последовательных приближений. В первом приближении находят поправку  $\Delta'_n$ , соответствующую измеренным по снимку значениям  $l'$  и  $k'$ .

#### 4.4. Инструментальные и машинные денситометрические измерения

Оптическая плотность — десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания  $D = \lg(I/t) = 10(\Phi_0/\Phi)$ , где  $\Phi_0$  и  $\Phi$  — упавший и прошедший через тело потока излучения.

Единицей оптической плотности является плотность тела, ослабляющего проходящий через него поток излучения в 10 раз.

В связи с зернистым строением фотографического почернения проходящее через него излучение рассеивается. Поэтому величина оптической плотности фотографического почернения существенно зависит от условий измерения (геометрии пучков и спектрального состава используемого излучения).

Применительно к измерениям фотографических материалов приняты три основных значения оптической плотности (ГОСТ 2653—80).

Регулярная плотность  $D_{\parallel}$  — логарифм отношения направленного, нормально падающего на фотослой потока излучения к потоку, прошедшему через слой без изменения направления.

Интегральная плотность  $D_{\Sigma}$  — логарифм отношения направленного, нормально падающего на фотослой потока ко всему прошедшему через слой потоку излучения в пределах телесного угла, равного  $2\pi$ .

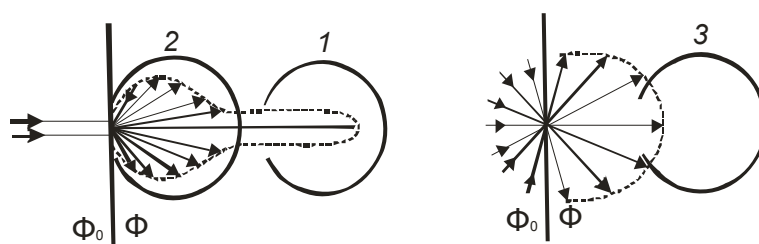


Рис. 4.6. Схема измерений регулярной (1), интегральной (2) и диффузной (3) оптической плотности фотографического почернения

Диффузная плотность  $D_{\#}$  — логарифм отношения падающего на фотослой равномерно рассеянного потока излучения к потоку, прошедшему через слой в пределах телесного угла с апертурой  $\leq 10^\circ$ .

Схемы измерений оптической плотности, соответствующие этим трем способам, приведены на рис. 4.6.

Возможен также четвертый способ измерения оптической плотности: освещение фотоматериала равномерно рассеянным излучением и измерение всего прошедшего через слой потока в пределах телесного угла, равного  $2\pi$ . Значения оптической плотности, определяемые при



таким способе измерений, в отечественной литературе называют, как и значения, получаемые при измерениях по третьей схеме (см. рис. 4.6.), диффузной плотностью. (Т. Джеймс и Дж. Хиггинс применяют в этом случае термин *дважды диффузная плотность*).

Из рис. 4.6. видно, что регулярная плотность больше интегральной. Известно также, что регулярная плотность больше диффузной, а их отношение — коэффициент Калье ( $Q > 1$ ) характеризует, в определенной степени, зернистость проявленного фотослоя. Таким образом, величина оптической плотности одного и того же фотографического почернения существенно зависит как от условий его освещения, так и от условий измерения (наблюдения или восприятия) потока излучения, прошедшего через почернение. Поэтому способ измерения оптической плотности должен соответствовать условиям практического использования фотоизображения.

Регулярная плотность наблюдается при визуальном рассмотрении негативов, освещаемых направленным светом, а также при проекционной печати снимков. Интегральная плотность соответствует случаю контактной печати при направленном освещении негатива. Диффузная плотность характеризует условия визуального изучения негативов на просмотрных столах, световое окно которых закрыто молочным или матовым стеклом, а дважды диффузная плотность имеет место при контактной печати, если негатив освещается рассеянным светом.

В случае денситометрических измерений с целью решения различных фотометрических задач по материалам космической фотосъемки значения оптической плотности полей сенситограммы используют для сравнения с оптической плотностью изображения изучаемых объектов местности. Не имеет принципиального значения, какая именно используется при этом плотность, — важно, чтобы в обоих случаях измерялась одна и та же плотность. Однако этого недостаточно. Практический опыт и результаты исследований показали, что различные типы

денситометров, работающих по одной и той же принципиальной схеме (т. е. измеряющие регулярную, интегральную, диффузную плотность), все же отличаются друг от друга по геометрии потоков излучения, падающих на фотослой и измеряемых после прохождения через него. Следствием этого является несовпадение результатов измерений оптической плотности одного и того же почернения, выполненных на приборах разного типа. Поэтому обязательным условием денситометрических измерений с целью решения фотометрических задач является использование при измерении сенситограмм и изображения объектов одного и того же прибора.

Основным общим требованием к денситометрам и микроденситометрам, предназначенным для выполнения фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки, является наличие просмотрочного стола, позволяющего не только измерять спектрограммы, но и рассматривать (дешифрировать) негатив, а также наличие устройства, обеспечивающего точное и быстрое совмещение мерного луча прибора с подлежащим измерению участком изображения.

В случае массовой обработки материалов космической фотосъемки на основе автоматизированных методов решения фотометрических задач денситометрические измерения выполняют с помощью автоматических машинных устройств ввода-вывода изображений (УВВИ).

Основой УВВИ является быстродействующий автоматизированный микроденситометр, обеспечивающий измерение дискретных значений регулярной оптической плотности квадратных участков изображения с шагом, равным размеру измеряемого участка. Минимальные размеры измеряемых участков могут быть порядка  $10 \times 10$  мкм. Значения оптической плотности обычно квантуются на 255 уровней; соответственно, при оптической плотности изображения, равной двум, ступень квантования составляет приблизительно 0,008 единицы оптической плотности.

В результате измерений с помощью УВВИ фотоснимок преобразуется в матрицу значений оптической плотности, регистрируемую на магнитной ленте.

#### 4.5. Методика автоматизированного решения обратных фотометрических задач

В общем случае задача автоматизации процесса определения яркостных характеристик объектов местности по их фотоизображению может быть сформулирована так: задана матрица значений оптической плотности элементов изображения местности, требуется определить соответствующую ей матрицу значений яркости, коэффициента яркости и контраста элементов местности.

Технология автоматизированного решения обратных фотометрических задач состоит из трех основных процессов: преобразования негатива и сенситограммы в цифровую форму; подготовки и ввода в ЭВМ исходных данных; вычисления значений промежуточных параметров и искомым фотометрических величин.

Преобразование негатива в цифровую форму производят с помощью УВВИ. В результате получают матрицу значений оптической плотности элементов изображения  $\{D_{k,t}\}$ , в которой  $k=1, 2, \dots, n_c$  — число строк;  $t=1, 2, \dots, n_s$  — число элементов в строке.

Исходные данные, необходимые для автоматизированного решения фотометрических задач, можно объединить в четыре группы.

1) Информация, постоянно хранящаяся в памяти ЭВМ (табулированные значения: освещенности равнинной местности  $E(h_{\text{Э}})$ ; коэффициента задымленности при наблюдении в надир  $r_{\text{дд}}(\tau^* h_{\text{Э}})$  для разных значений альбедо местности; относительной величины коэффициента задымленности  $\gamma_{\text{д}}^{\text{отн}}(\varphi, h_{\text{Э}}, \tau^*)$  для разных значений азимута  $A_{\text{Э}}^{\text{д}}$ ).

2) Матрицы значений оптической плотности элементов изображения местности и полей сенситограммы, записанные на магнитной ленте.

3) Параметры бортовой съемочной аппаратуры и условия съемки ( $f, x_0, y_0, \tau_\varphi, d, \Pi, r_p, t, \eta, \lg H^c; \tau_{550}^*; b$ ; координаты опорных точек в системах УВВИ, снимка и местности; номинальная высота съемки; дата и время съемки; склонение Солнца).

4) Данные, определяющие особенности решения фотометрических задач (размер элементов матрицы; координаты объектов, если необходимо определение оптических характеристик не всей местности, а отдельных объектов).

Общая схема автоматизированного решения обратных фотометрических задач показана на рис. 4.7. В результате выполнения всех операций получаем матрицы значений яркости, коэффициента яркости и контраста  $\{F_{k,t}\}, \{r_{k,t}\}, \{K_{k,t}\}$  или статистические значения МО, СКО, автокорреляционной функции и пространственно-частотного спектра этих величин, соответствующие всей местности или заданным объектам. При этом автокорреляционную функцию и пространственно-частотный спектр вычисляют по формулам (4.21. – 4.27.).

I. Дискретизация функции  $D(x)$ . В результате получаем исходную последовательность значений  $\{D_i\}$ , измеренных в точках  $x_i = x_0 + ih$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $h$  – интервал дискретности;  $N$  – объем выборки.

II. Вычисление выборочного значения МО

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (4.21.)$$

III. Получение преобразованной последовательности значений  $\{D'_i\}$ , где  $D'_i = D_i - \bar{D}; i = 1, 2, \dots, N$ .

Контроль:

$$\bar{D}' = \sum_{i=1}^N D'_i = 0$$

IV. Вычисление выборочного значения СКО

$$S_D = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.22.)$$

V. Вычисление выборочных значений автокорреляционной функции

$$\hat{R}_r = \hat{R}(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{i=1}^{N-r} D'_i D'_{i+r}, \quad (4.23.)$$

где  $r = 0, 1, 2, \dots, m$  – число шагов определения автокорреляционной функции.

VI. Вычисление первичной оценки значений спектральной плотности

$$\tilde{G}_k = \tilde{G}\left(\frac{\nu_o}{m} k\right) = 2h \left[ \hat{R}_o + 2 \sum_{r=1}^{m-1} \hat{R}_r \cos\left(\frac{k\pi r}{m}\right) + (-1)^m R_m \right], \quad (4.24.)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, m$  – индекс гармоники, для которой рассчитывается спектральная плотность.

Контроль:

$$\hat{R} = \frac{1}{2mh} \left[ \frac{1}{2} \tilde{G}_o + \sum_{k=1}^{m-1} \tilde{G}_k + \frac{1}{2} G_m \right] \quad (4.25.)$$

VII. Вычисление значений окончательной оценки спектральной плотности

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}_o &= 0,5\tilde{G}_1 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \hat{G}_k &= 0,25\tilde{G}_{k-1} + 0,5\tilde{G}_k + 0,5\tilde{G}_{k+1} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \hat{G}_m &= 0,5\tilde{G}_{m-1} + 0,5\tilde{G}_m \end{aligned} \right\} \quad (4.26.)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$ .

Кроме перечисленных операций, в вычисленные значения спектральной плотности должны вводиться поправки за влияние ФПМ микроденситометра

$$\hat{G}'_k = \hat{G}_k / P_k^2 \quad (4.27.)$$

где  $P_k$  – коэффициент передачи контраста микроденситометра, соответствующей частоте  $k$ -й гармоники.

Для практического осуществления перечисленных выше операций необходимо определить форму и размеры апертуры считывающего луча микроденситометра (величины  $h$ ), объем выборки ( $N$ ), число шагов нахождения автокорреляционной функции ( $m$ ) и протяженность участка ( $X$ ) измерения исходной последовательности значений  $\{D_i\}$ .

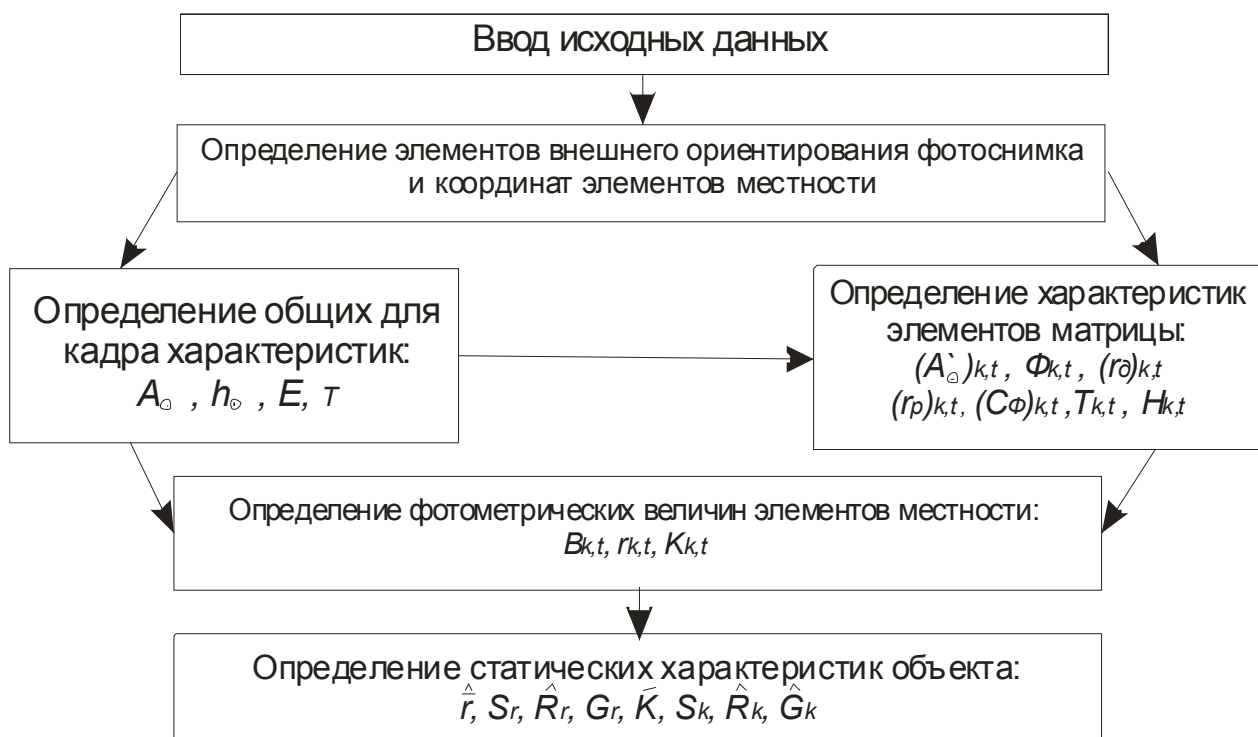


Рис. 4.7. Укрупненная блок-схема автоматизированного решения обратных фотометрических задач

Решение фотометрических задач по фотоснимкам горной местности требует введения в ЭВМ дополнительных исходных данных в виде цифровой модели рельефа, которая используется для вычисления значений освещенности элементов местности, определения коэффициентов

пропускания и задымленности атмосферы, соответствующих элементам, располагающимся на разных высотах относительно уровня океана.

Отличие решения фотометрических задач по микроизображениям от решения по макроизображениям заключается в использовании вместо формул (4.17) и (4.19) формул (4.18) и (4.10). При этом возникает вопрос: к какому виду изображений («макро» или «микро») относится данный элемент матрицы? Таким образом, в данном случае задача автоматизированного определения фотометрических характеристик элементов местности фактически объединяется с задачей автоматизированного опознавания объектов.

#### **4.6. Точность фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки**

Оценка точности фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки может быть произведена теоретически, расчетным путем, и экспериментально — по результатам измерений.

##### **Теоретическая оценка точности**

В соответствии с теорией ошибок среднеквадратическая ошибка определения некоторой фотометрической величины ( $Y$ ) определяется по формуле

$$\sigma_Y = \pm \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

где  $X_i$ — $i$ -й аргумент функции  $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$  |  $n$  — число аргументов;  $\sigma_{x_i}$ ; —средняя квадратическая ошибка значения  $i$ -го аргумента.

Подставляя в выражение (4.28.) одну из формул, приведенных в табл. 4.1., варьируя значения ее аргументов и их СКО, можно исследовать влияние различных факторов на точность фотометрических измерений. Проведенные таким образом исследования показали следующее. Точность фотометрических измерений по материалам космической фотосъемки зависит от абсолютного значения измеряемой величины, от величины ошибок аргументов рабочих формул и практически не зависит от параметров фотоаппарата (сравнивались серийный топографиче-

ский аэрофотоаппарат и специализированный космический фотоаппарат МКФ-6). Относительные СКО определения коэффициента яркости, соответствующие его абсолютным значениям  $r = 0,1$ ;  $r = 0,2$ ;  $r = 0,5$  и двум значениям контраста  $K \approx 0,16$  и  $K \approx 0,53$ , показаны на рис. 4.8. Из этого рисунка следует, что для объектов, значения коэффициента яркости которых находятся в пределах от 0,1 до 0,5, относительная СКО равна  $\pm 25$ —50%. Для менее ярких объектов ( $r < 0,1$ ) ошибка будет больше 50%, для более ярких ( $r > 0,5$ )—меньше 25%. Величина ошибок несколько возрастает с увеличением контраста объектов.

Ошибки порядка 25—50% значительны. Однако они характеризуют ошибки измерений, выполняемых при произвольных средствах и условиях съемки, т. е. являются предельными величинами, которые не будут превышены, если сохранится принятая при их расчете точность входящих в формулу (4.18.) аргументов. Значения же СКО измерений, выполняемых по конкретному фильму (негативу), будут меньше рассчитанных по формуле (4.28.):

Таблица 4.4.

№ класса	Наименование класса (подкласса)	Число измеренных объектов	$\bar{r}$	Sr (%)
I	Оазисы (сельскохозяйственные культуры в стадии вегетации; естественная влаголюбивая растительность)	30	0,11	26
II	Песчаная пустыня (пустыня на озерных отложениях; аллювиальные пески)	22	0,22	18
III	Щебнисто-гипсированная пустыня (такыры)	17	0,34	11
IV	Выходы коренных пород	11	0,43	23
V	Солончаки	17	0,44	48



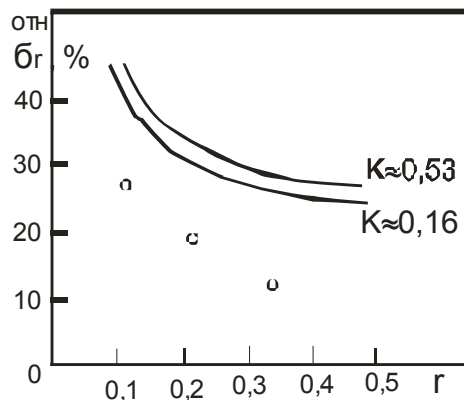


Рис. 4.8. Зависимость ошибки определения коэффициента яркости от его величины: — рассчитано по формуле (4.28); о — по данным измерений, приведенным в таблице 4.4.

Объясняется это тем, что часть ошибок, являющихся аргументами функции в формуле (4.21), постоянны для данного фильма или негатива ( $\sigma_f, \sigma_d, \sigma_T, \sigma_t, \sigma_{\eta}, \sigma_{\Delta t}, \sigma_E, \sigma_{\tau_n}$ ) и оказывают систематическое влияние на результаты измерений, выполняемых по этому фильму. Ошибки некоторых других аргументов содержат существенную систематическую составляющую (например, в случае определения значений коэффициентов  $T$  и  $\tau_d$  систематическая составляющая ошибок  $\sigma_T$  и  $\sigma_{\tau_d}$  обусловлена точностью значения оптической толщи атмосферы  $\tau^*$ ). Таким образом, величина  $\sigma_r$ , рассчитанная по формуле (4.28), характеризует случайные ошибки измерений и ошибку, систематическую для данного фильма. Поэтому СКО величины  $r$  так же, как и других фотометрических величин, определяемых по конкретному фильму, существенно меньше полученных выше значений.

Рассмотренные примеры далеко не исчерпывают возможности теоретической оценки точности фотометрических измерений. Исследования такого рода необходимы не только для всесторонней оценки точности фотометрических измерений, в частности, определения соотношения между величиной случайных и систематических ошибок, но и с целью обоснования требований к средствам и условиям съемки, обработки и измерения получаемых материалов.

## Экспериментальная оценка точности

О действительных значениях случайных ошибок фотометрических измерений можно косвенно судить по практическим результатам измерений. В таблице 4.4. приведены выборочные значения МО ( $\sigma$ ) и СКО ( $S_R$ ) коэффициента яркости пяти классов объектов северной части Туркмении во II зоне спектра ( $\lambda_{\text{эф}} = 652$  нм).

Приведенные в табл. 4.4. данные получены в результате статистической обработки значений коэффициента зональной яркости, измеренных по космическим негативам. Полученные значения величины  $S_R$  характеризуют как случайные ошибки измерений коэффициента яркости, так и, главным образом, степень однородности объектов данного класса. Поэтому СКО измерения величины коэффициента яркости значительно меньше приведенных в таблице значений  $S_R$ . Можно предположить, что степень оптической однородности примерно одинакова у объектов I, II и III классов. Соответственно, в данных, полученных для этих классов, наблюдается такой же характер соотношения между величиной коэффициента яркости и СКО (рост ошибки с уменьшением коэффициента яркости), какой был получен расчетным путем (см. рис. 4.8.). Однако для IV и V классов эта закономерность нарушается, что свидетельствует о значительной неоднородности объектов этих двух классов.

В целом данные, приведенные в табл. 4.4., как и другие подобные результаты измерений, свидетельствуют о достаточно высокой точности фотометрических измерений, выполняемых по материалам космической фотосъемки. Однако это лишь случайные ошибки измерений, и какова была при этом систематическая ошибка — неизвестно. В каждом конкретном случае она может быть различна по абсолютной величине и знаку, но не должна превосходить рассчитываемых по формуле (4.28.) значений за вычетом из них случайной составляющей.

Оценить наличие и величину систематической ошибки можно по результатам фотометрических измерений объектов, действительные характеристики которых известны. Для иллюстрации способа такой оценки на рис. 4.9. приведены СКЯ двух объектов по данным [8], соответствующие им значения коэффициента зональной яркости, принимаемые за эталон, и значения, измеренные в трех зонах спектра по аэрофотоснимкам, полученным фотоаппаратом МСК-4 с высоты 7000 м.

Исходя из рис. 4.9., можно говорить о наличии некоторой систематической ошибки измерений (в каждой зоне, естественно, будет своя ошибка). В общем же наблюдается высокая степень соответствия результатов измерений яркостных характеристик объектов одного и того же класса, но полученных совершенно различными методами.

Для практической реализации этого способа оценки точности необходимо выполнение синхронных с космической съемкой измерений СКЯ ряда объектов, которые могут быть использованы в качестве фотометрических эталонов.

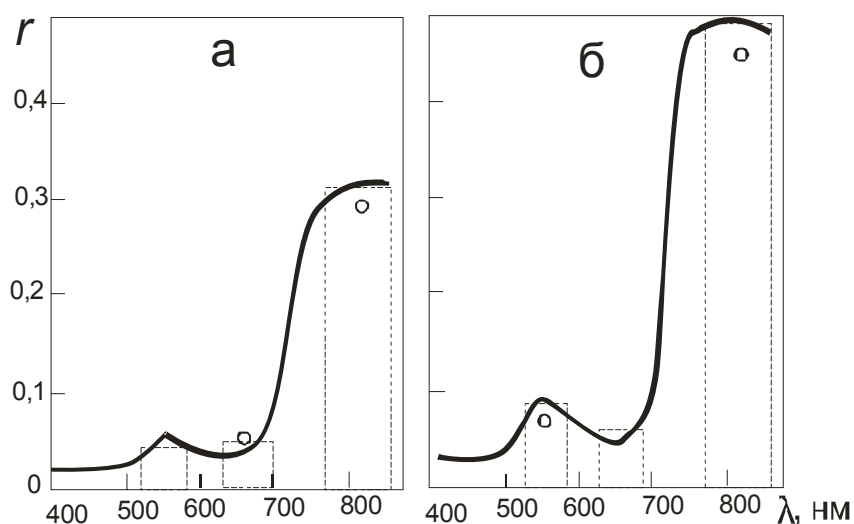


Рис. 4.9. Значения коэффициентов спектральной и зональной яркости:  
 а — сосна (спелый древостой); б — ольха (молодой древостой); --- рассчитанные по СКЯ;

Важное значение для оценки точности фотометрических измерений, калибровки фотоаппаратуры в летных условиях, приведения в единую систему результатов измерений, выполняемых с помощью различных средств, имеет использование искусственных опорных фото-

метрических полей (ОФП). Подобно тому, как невозможно выполнение точных геометрических измерений по материалам аэрокосмической фотосъемки без использования опорных точек, координаты которых известны с высокой точностью, так же невозможны и точные фотометрические измерения без использования ОФП, координаты которых — энергетические яркостные характеристики — точно известны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность технических средств и технологических процессов космической съемки образует информационную систему получения сведений о земной поверхности, необходимых для изучения природных ресурсов, мониторинга различных природных процессов, охраны окружающей среды, решения других народнохозяйственных и научных задач.

Представленные в методическом пособии сведения о спектральной отражательной способности основных типов земного ландшафта и растительного покрова основываются на литературных и фондовых данных, полученных с помощью аппаратуры СПИ по единой методике в различных природно-климатических зонах, в разное время. Рассмотрена спектральная область от 400 до 2500 нм, включающая ближний ИК участок спектра. Материалы пособия дают возможность составить общее представление о закономерностях формирования поля восходящих отраженных излучений. Разработчики аппаратуры, а также специалисты в области природноресурсного картографирования, занимающиеся вопросами дистанционных исследований окружающей природной среды, могут использовать приведенные данные при проведении различных инженерных расчетов и оценок.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на получение экспериментальных данных, которые бы в итоге позволили разработать общенаучный и специализированные статистически обеспеченные каталоги оптических характеристик природных и искусственных объектов.

Проведение натурных экспериментов по определению комплексного влияния различных факторов на величины СКЯ растительных сообществ связано с очень большими методическими, техническими и организационными трудностями. Благодаря достижениям в области вычислительной техники и определенным успехам в исследованиях оптики и архитектуры растений в последнее время значительное развитие получили теоретические ис-

следования закономерностей вариаций отражения системой растительность – почва, которые позволяют изучать влияние каждого из описанных выше факторов на величины СКЯ растительных сообществ как в отдельности, так и при их комплексном воздействии.

## Литература

1. Вендровский К.В., Вейцман А.И. Фотографическая структурометрия. М., Искусство, 1982.
2. Глаголев Ю.А. Справочник по физическим параметрам атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1970.
3. Зиман Я.Л. Исследование природных ресурсов Земли из космоса. — М.: Знание, 1980.
4. Кондратьев К.Я., Федченко Н.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеиздат, 1982.
5. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.: Изд. АН СССР, 1947.
6. Кучко А.С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования. М.: Недра. 1988. — 236 с.: ил.
7. Матиясевич Л.М. Введение в космическую фотографию.— М.: Недра, 1989. — 149 с.:ил.
8. Многозональные аэрокосмические съемки Земли. Сб. статей под ред. Р.З.Сагдеева.— М.: Наука, 1981. — 302 с., ил.
9. Мишев Д.Н. Дистанционные исследования Земли из космоса. — М.: Мир, 1985.
10. Рачулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л., Гидрометеиздат, 1981.
11. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования.//Второе изд., М.: Техносфера, 2006, - 336 с. ил.
12. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Пер. с англ., М.: Техносфера, 2008. — 312 с.:ил.
13. Росс Ю.К., Летерсон У.К. О каталогизации коэффициентов спектральной яркости лесной зоны Европейской территории Советского Союза.— Исследование Земли из космоса, 1984, № 2, с. 60—66.
14. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. М.: Министерство обороны СССР, 1986

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

Таблица I.1

Коэффициенты спектральной яркости грунтов

Длина волны, нм	Суглинок	Песок	Супесь	Грунт сухой	Чернозём
	Значение КСЯ, %				
400	-2,552	46,811	2,877	8,900	1,800
450	-0,485	57,433	7,970	10,900	2,500
500	1,911	64,475	12,737	13,300	3,800
550	5,612	71,086	18,729	16,000	4,800
600	9,255	76,380	25,078	18,300	5,200
650	10,994	77,504	28,632	19,800	5,500
700	13,254	79,434	31,198	21,200	6,300
750	14,901	80,953	33,708	23,200	8,100
800	15,502	80,859	35,512	25,400	9,400
850	16,396	80,354	35,805	28,000	9,800
900	16,911	79,552	36,065	31,600	10,200
950	17,660	77,494	36,902	30,800	11,700
1000	18,339	75,297	37,671	30,700	12,100
1050	18,890	80,265	38,285	35,700	13,000
1100	19,180	78,345	39,555	36,200	13,300
1150	19,656	70,231	39,986	37,200	13,100
1200	20,198	61,745	40,895	39,800	13,400
1250	20,538	69,788	42,255	40,000	14,300
1300	20,709	69,091	43,097	38,800	13,900
1350	21,424	53,908	43,257	38,500	14,400
1400	19,137	39,366	40,638	40,500	11,500
1450	20,221	20,005	43,850	44,000	11,700
1500	20,654	26,573	45,044	44,500	11,700
1550	21,557	35,519	45,418	44,500	10,800
1600	21,508	50,431	46,083	46,000	10,700
1650	22,255	61,371	46,456	49,000	10,400
1700	22,123	48,801	46,955	51,000	10,700
1750	21,845	29,027	47,147	50,400	9,700
1800	22,587	40,886	47,536	27,000	10,800
1850	22,999	34,519	47,274	20,400	10,800
1900	17,050	7,180	40,396	34,900	4,300
1950	19,127	3,141	42,637	39,000	2,700
2000	21,259	12,245	45,194	39,400	2,700
2050	23,277	21,437	46,323	38,200	2,600
2100	23,418	18,850	46,087	40,500	1,500
2150	23,413	13,764	45,167	43,400	1,000
2200	22,081	10,770	40,165	44,100	2,100
2250	22,329	11,866	42,411	43,500	1,900
2300	22,077	13,476	41,284	41,000	1,600
2350	21,078	11,490	37,616	33,300	2,000
2400	20,173	4,572	38,613	30,500	2,300
2450	18,892	3,074	36,846	32,000	3,000
2500	17,717	2,739	35,853	30,000	2,000



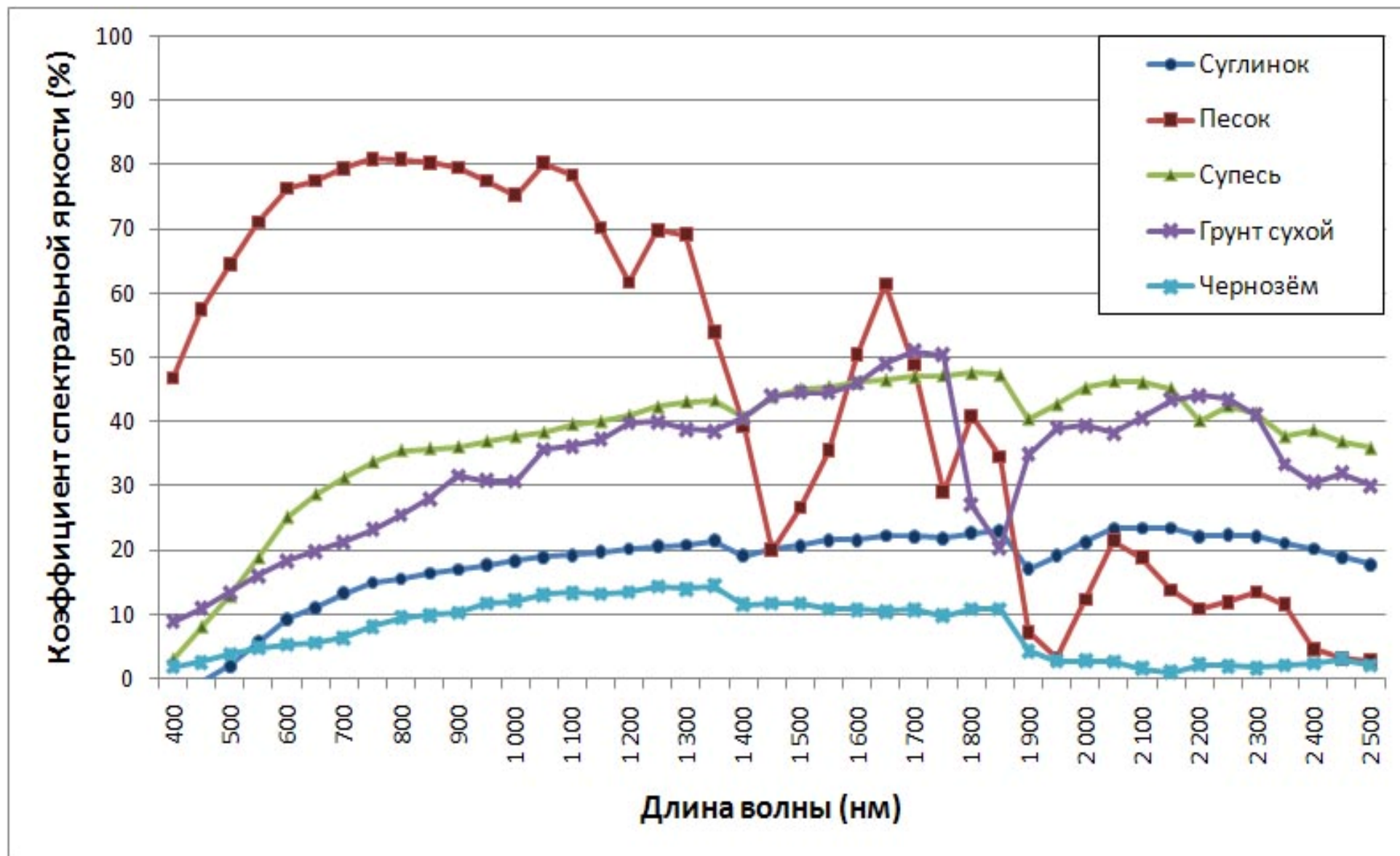


Рис. I.1 Графическое отображение коэффициентов спектральной яркости грунтов по данным таблица I.1

Таблица I.2  
Коэффициенты спектральной яркости обнажений

Длина вол- ны, нм	Апатит	Корунд	Магнетит	Гипс	Пирит
	Значение КСЯ, %				
400	28,360	92,370	5,880	89,960	9,070
450	48,160	92,780	5,580	90,950	10,950
500	54,400	93,010	5,510	91,470	13,900
550	54,310	92,890	5,400	91,700	14,990
600	50,690	92,880	5,490	92,030	15,640
650	48,640	92,490	5,430	91,730	15,920
700	47,810	92,410	5,260	91,690	16,320
750	48,070	92,510	5,370	91,220	15,880
800	51,570	91,880	5,180	90,620	15,580
850	54,880	91,740	4,810	90,580	14,830
900	57,950	91,620	4,750	90,160	14,300
950	61,020	91,560	4,520	89,320	13,860
1000	64,310	91,320	4,450	86,900	13,420
1050	66,960	91,320	4,400	89,630	13,030
1100	69,190	91,390	4,520	89,210	12,930
1150	70,880	91,150	4,510	85,700	12,660
1200	72,660	90,760	4,760	79,820	12,560
1250	73,990	90,600	5,140	83,540	12,390
1300	75,220	90,330	5,260	83,660	12,370
1350	75,680	89,790	5,430	75,980	12,490
1400	73,860	87,160	5,740	68,650	12,580
1450	74,790	86,750	5,990	48,960	12,920
1500	75,910	87,240	6,260	55,600	13,020
1550	76,950	87,550	6,580	61,520	13,280
1600	77,740	87,280	6,740	71,390	13,250
1650	78,820	87,160	7,030	77,820	13,240
1700	78,880	87,190	7,280	73,410	13,000
1750	78,570	86,500	7,470	57,280	12,870
1800	78,430	86,310	7,650	65,420	12,690
1850	76,810	84,850	7,790	63,770	12,460
1900	68,720	79,500	8,000	34,740	12,400
1950	69,170	78,000	8,230	17,900	12,220
2000	67,760	79,510	8,420	36,850	12,250
2050	74,930	80,370	8,620	51,120	12,200
2100	76,200	81,220	8,700	48,370	12,170
2150	73,370	80,830	8,840	41,610	12,170
2200	75,080	79,350	8,970	37,030	12,230
2250	73,980	77,890	9,070	38,880	12,270
2300	67,990	77,070	9,160	41,810	12,330
2350	69,930	75,360	9,380	37,660	12,340
2400	68,880	74,620	9,440	23,150	12,370
2450	65,870	72,770	9,530	16,970	12,380
2500	62,360	71,680	9,680	16,290	12,470

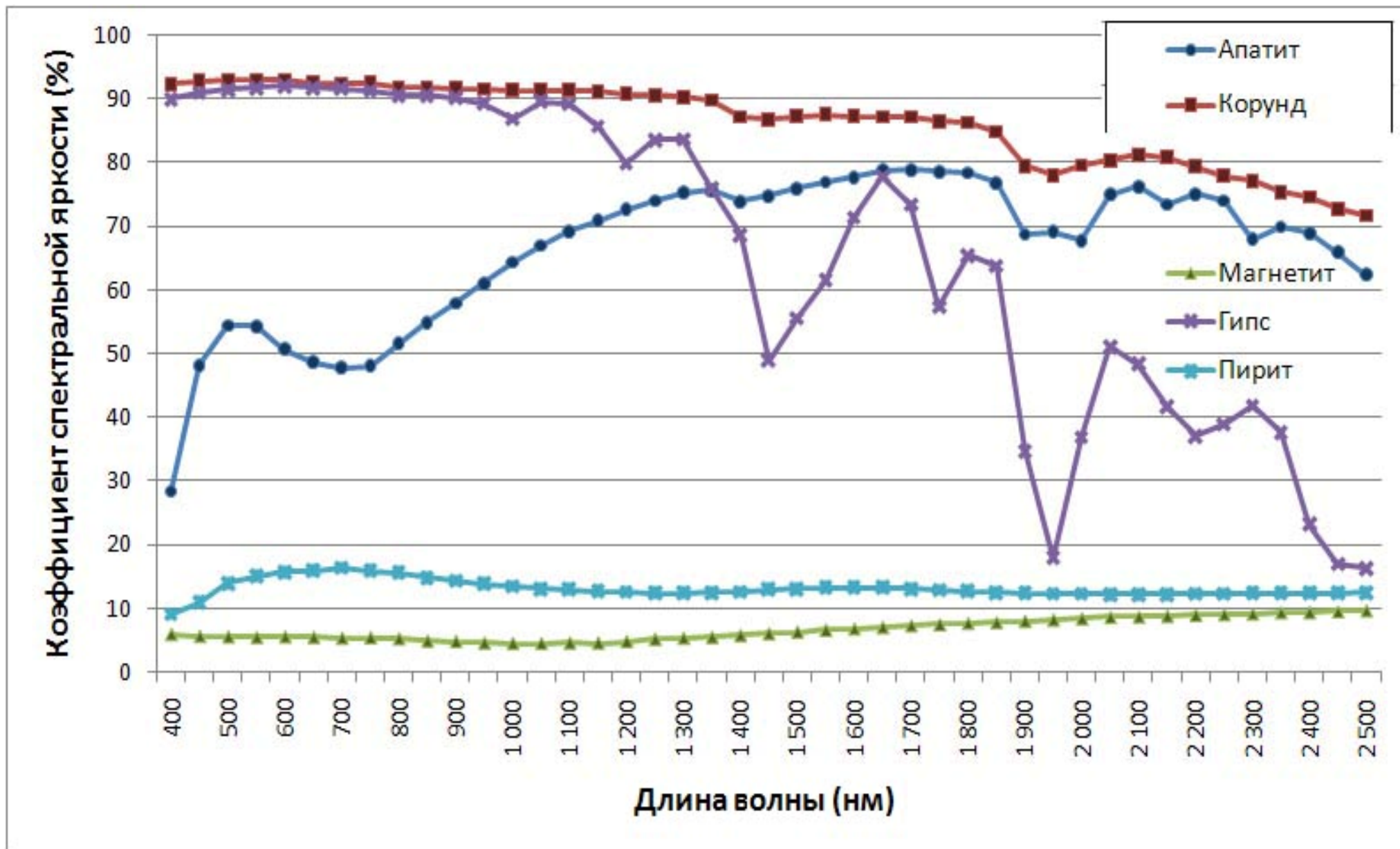


Рис. 1.2 Графическое отображение коэффициентов спектральной яркости обнажений по данным таблицы 1.2

Таблица I.3  
Коэффициенты спектральной яркости горных пород

Длина вол- ны, нм	Гранит	Кварц	Песчаник	Мрамор	Сланец
	Значение КСЯ, %				
400	29,135	39,198	3,057	35,809	9,363
450	33,899	44,950	4,527	36,502	11,426
500	36,266	48,189	5,399	36,638	13,300
550	40,520	51,439	6,811	36,668	13,770
600	48,339	55,381	12,510	35,356	13,016
650	51,207	56,597	14,314	34,993	12,205
700	53,311	56,569	16,339	35,400	11,653
750	54,852	56,949	18,573	34,937	11,339
800	55,783	57,346	18,541	34,276	11,382
850	56,094	57,876	18,513	33,454	11,584
900	56,752	58,073	19,222	32,564	11,670
950	57,937	58,734	20,240	31,986	11,726
1000	58,807	59,512	21,051	31,487	12,032
1050	59,098	60,072	20,308	31,215	12,015
1100	59,597	60,309	19,544	30,994	12,162
1150	59,431	60,673	18,914	30,674	12,423
1200	59,834	61,162	18,331	30,800	13,138
1250	59,775	62,005	17,879	30,447	14,207
1300	60,323	62,969	17,493	30,062	15,157
1350	60,430	63,697	17,028	30,262	16,207
1400	59,938	63,882	16,153	30,199	15,880
1450	60,485	64,804	16,462	29,715	18,156
1500	60,346	65,406	16,583	29,828	19,646
1550	61,204	66,479	16,715	29,861	20,374
1600	61,761	67,540	16,758	29,849	22,052
1650	61,806	67,644	16,781	29,692	23,464
1700	61,906	68,434	16,833	29,687	24,775
1750	62,128	68,868	16,952	29,188	26,287
1800	62,258	68,787	17,152	29,337	27,564
1850	62,290	69,683	16,889	28,751	28,463
1900	61,575	68,579	16,112	28,842	28,951
1950	62,121	70,306	16,808	28,781	29,536
2000	63,211	70,579	17,161	28,309	29,671
2050	64,836	72,250	17,300	28,507	32,568
2100	64,795	72,635	17,484	28,106	32,745
2150	64,809	72,313	17,569	27,388	33,086
2200	64,021	71,464	16,153	27,541	30,331
2250	64,571	71,237	17,242	25,955	21,954
2300	69,485	75,539	17,273	21,567	22,600
2350	70,113	76,211	16,677	20,275	17,284
2400	70,740	76,883	16,841	25,849	24,214
2450	71,368	77,555	16,135	22,950	24,916
2500	71,996	78,227	16,042	16,706	24,204

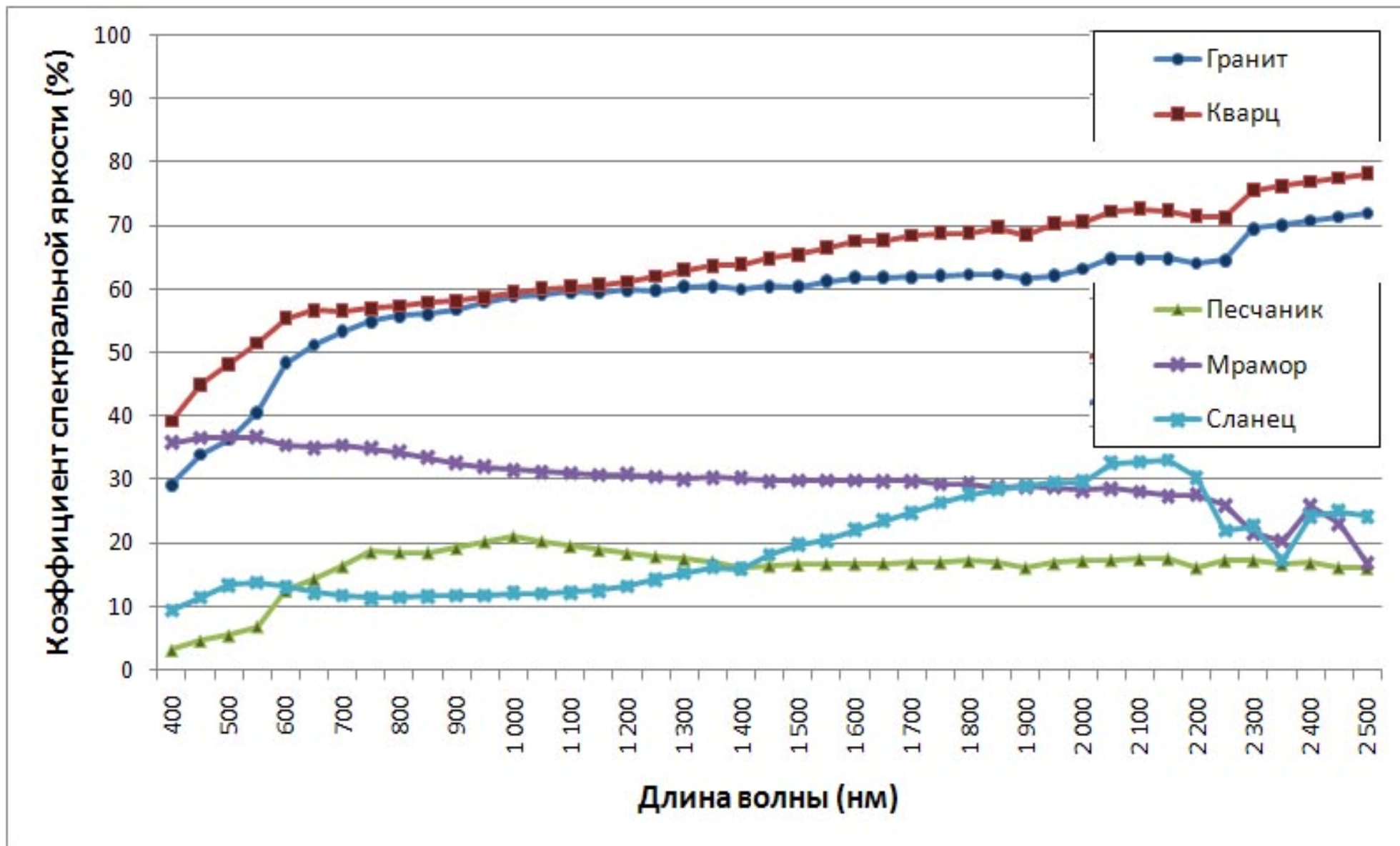


Рис 3 Графическое отображение коэффициентов спектральной яркости горных пород по данным таблицы I.3

**ПРИЛОЖЕНИЕ II**

Таблица II.1

Коэффициенты спектральной яркости лиственной растительности

Длина волны, нм	Лиственный лес	Смешанный лес (50 лет)	Смешанный лес (70 лет)	Осина, береза, ольха	Осина (80 лет)	Дуб (20 лет)
<b>Значения КСЯ</b>						
400	27	4	5	1,9	1,5	0,2
450	27	3	2	2,3	2,6	1,3
500	27	3	5	1,8	3,15	1
550	27	6,5	6	3,7	4,9	3,6
600	26	4,2	7	2,5	4,1	3,5
650	27	4,3	8	2	3,4	2,5
700	29	7	14	7	8	7
750	30	18,2	17,2	21	31,8	30
800	30	27	19,3	25,8	38,05	32
850	35	28,8	19,7	27	39,85	32
900	35	29,1	19	32	41,3	34
950	31	28,5	21,2	33,4	36,75	39
1000	31	34,4	24,8	36	35,95	45
1050	28	37,6	28,1	39	38,5	42
1100	28	31,6	29,5	34	37,05	39
1150	29	31,7	26,3	32	35	36
1200	28	31,6	24,1	31,7	33,3	35
1250	27	30,8	24,2	32	35,1	29
1300	26	26,8	23,7	33	37,05	27
1350	25	22,4	22	30	29,25	25
1400	23	16	19,9	13	12,45	16
1450	12	14,5	15,5	11	9,95	10,8
1500	8	16,2	14,3	10	13,85	12
1550	8	16,3	15,4	11	19,5	13,5
1600	11	16,4	15,8	14	24,1	17
1650	13	16,1	16,4	16	24,05	19
1700	13	15,4	17,5	21	19,75	18
1750	12	14,9	17,4	23	16,9	17
1800	13	13,8	16,7	14	16,45	16,5
1850	12	14,8	15,1	12	14,65	13
1900	11	14	11,8	5	10,1	3
1950	8	10,7	9,1	3,5	5,35	1
2000	9	9,7	8,5	4,1	4,35	1,5
2050	9	9,7	8,4	4,7	5,25	4
2100		8,7	8,7	5,2	5,95	6,1
2150		8,5	8,9	6,3	6,25	6,7
2200		8,6	9,3	7	6,25	6,9
2250		9	7,7	6,8	6,3	6,9
2300		9	6,2	6,4	6,7	5,2
2350		8,8	7,7	7,5	6,15	4
2400		8,5	8,2	6	5,55	2,8
2450		7,9	7,6	2,3	5	1,3
2500		6,1	7,1		4,75	

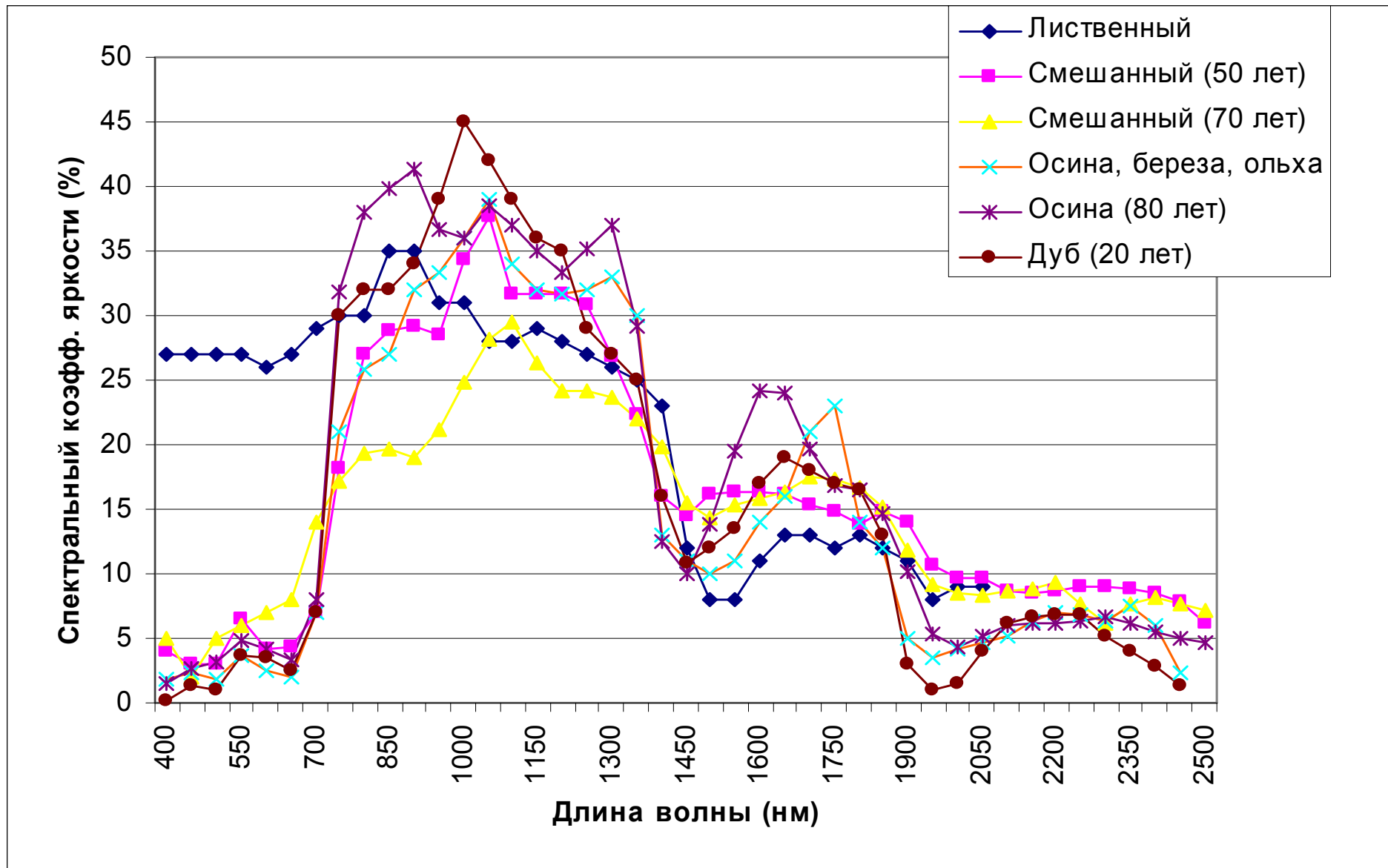


Рисунок II.1 Графическое отображение СКЯ лесной лиственной растительности по данным таблицы II.1

Таблица П.2

Коэффициенты спектральной яркости хвойной растительности

Длина волны, нм	Сосны на песке	Сосна, посадки (20 лет)	Сосна (30-60 лет)	Хвойный (ПП 90%)	Смешанный (60 % хвойный)
	<b>Значения КСЯ</b>				
400	3,4	2,2	1,8	8	1,8
450	3,8	3,75	2,3	8	2,7
500	4,3	2	2,4	7,5	2,5
550	6,4	3	3,6	6	4,5
600	4,45	3,1	3,4	5	3,1
650	3,85	2,7	3,4	5	2,4
700	6,55	5,6	6,5	7	7
750	19,25	16,65	24,5	11	24
800	28,25	24,7	29,85	12	29
850	28,6	26,2	26,35	12	30
900	26,15	26,8	31,35	13	31
950	24,75	25,05	29,75	12	30
1000	27	24,9	32,9	12	32
1050	25,7	27,2	32,9	13	32
1100	24,5	28,3	31,35	8,5	31
1150	23,15	26,85	31,1	9,5	29
1200	21,85	25,65	30,4	9	28
1250	20,15	24	27,7	9,5	28
1300	18,6	26,15	24,2	10	26,5
1350	13,9	24,9	17,1	8	21,5
1400	10,1	20,8	12,6	6,5	15
1450	11,6	10,5	10,4	6	13,8
1500	13,25	7,45	10,85	4	13,7
1550	14,05	17,9	12,25	3,5	13,6
1600	14	7,5	13,45	3	15
1650	13,25	8,2	14	3	16,5
1700	12,35	8,3	13,75	3	14,8
1750	10,65	8,3	12,4	2,5	12,7
1800	8,25	7,3	9,2	2,5	10,5
1850	7,15	5,5	8	2	7,3
1900	7,45	3,85	8,15	2	6
1950	7,95	2,6	8,95	2	5,3
2000	8,05	2,4	9,65	2	5,6
2050	7,75	2,8	10,2	3	6
2100	7	3,1	9,55		6,3
2150	7	3	8,75		6,4
2200	7,2	3,25	7,9		6,5
2250	7,25	3,6	7,55		5
2300	7,15	3,45	7,3		4,4
2350	7,25	2,5	6,95		3,7
2400	7,9	1,8	6,1		3
2450	7,5	1,05	6,05		1,5
2500	6,5	0	5,25		



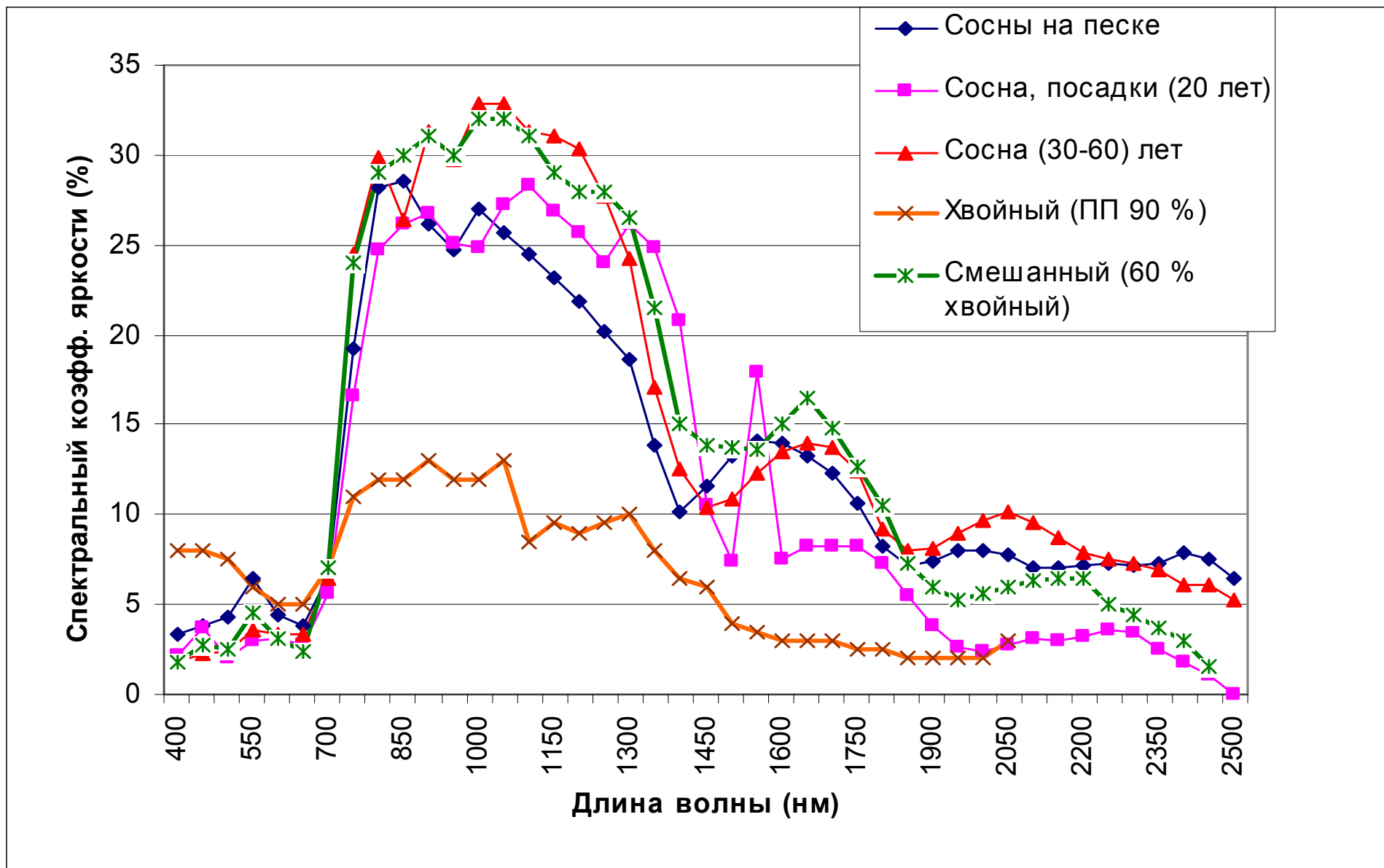


Рис II. 2 Графическое отображение КСЯ хвойной растительности по данным таблицы II.2

## Коэффициенты спектральной яркости луговой растительности

Длина волны, нм	Трава сухая	Луг сухой-дольный	Луг, заболоченный	Луг разнотравный
	<b>Значения КСЯ</b>			
400	3	3,85	11,6	1,3
450	4	4,05	5,15	1,85
500	6	3,9	4,65	2,65
550	8,2	7,1	6,4	6,05
600	7,5	5,3	8,45	4,55
650	6,6	4	12	3,4
700	7,5	10,8	17,6	8,5
750	26,2	21,95	22,25	30,3
800	33,6	26,45	28,9	35,1
850	37,3	26,25	26,5	36,2
900	39	27,7	28,25	35,9
950	40,5	27,05	32,7	34,35
1000	43,5	27,75	38,95	35,65
1050	44,4	27,4	36,15	36,3
1100	42,6	29,9	34,25	36,55
1150	41	32,1	33,15	35,5
1200	42,7	27,4	31,65	30,25
1250	44	26,6	34	31,85
1300	45,8	27,45	33,3	31,95
1350	42	26,05	24,15	26
1400	13,3	21,45	25,2	16,55
1450	17,1	12,5	33	13,8
1500	24,2	12,25	31,9	15,7
1550	26,3	14,35	29,4	18,95
1600	27,9	18,25	28,65	22,4
1650	29,5	23,35	28,7	23,5
1700	29,2	23,15	27,9	23,45
1750	25,4	20,1	28,65	23,6
1800	18,3	21,65	32,9	23,2
1850	10,8	25,3	37	19,35
1900	4,6	23,25	40,1	10,75
1950	5,1	18	35,8	4,55
2000	9,1	15,85	33,9	5,35
2050	11,1	14,95	31,95	6
2100	11,5	14,15	30,95	6,55
2150	12,5	14,1	27,8	7,8
2200	13,5	14,2	25,75	8,8
2250	12,4	13,6	26,3	9,3
2300	10,3	12,85	26,75	9,8
2350	4,6	13,9	25,4	9,2
2400	3,6	16,2	21,2	8,4
2450	2,6	17,95	14,1	7,15
2500	1,6	0	0	4,9

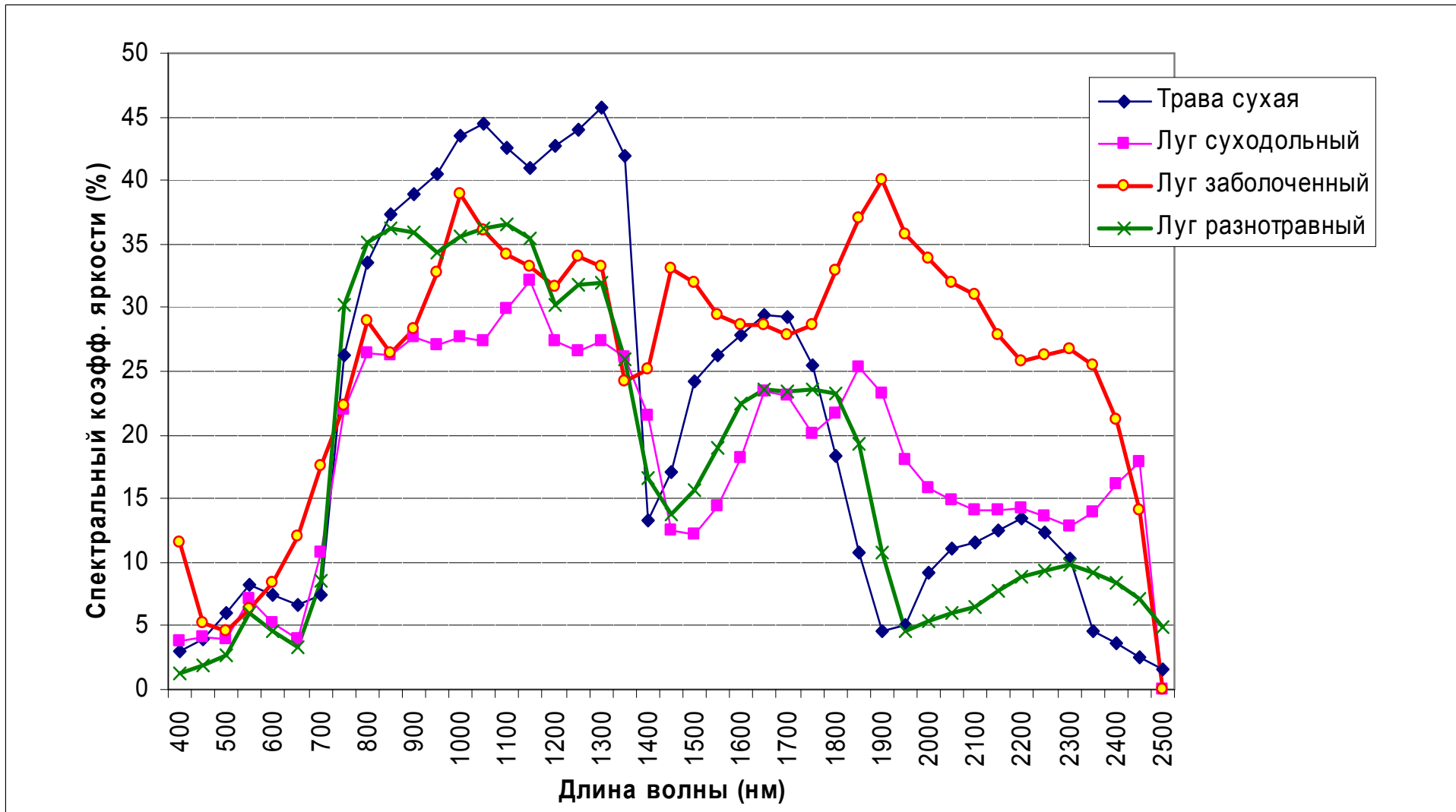


Рис II.3 Графическое отображение КСЯ луговой растительности по данным таблицы II.3

## Коэффициенты спектральной яркости сельскохозяйственных угодий

Длина волны, нм	Ячмень	Овес	Рожь	Картофель
	<b>Значения КСЯ</b>			
400	4	2,8	2,5	3,6
450	5	3,3	3,5	5,95
500	5,6	4,2	4,6	6,65
550	7,5	8,1	8,2	9
600	7,5	7,5	7	8,9
650	6,8	6,8	7,5	8,25
700	9,5	9,8	15	15
750	18,7	26	31,2	29,6
800	20,9	30	33,7	36
850	22,3	31,8	35,8	39,6
900	23,7	32,7	38	40,7
950	25,6	31,6	38,5	40,85
1000	28,3	33,5	37,4	39,25
1050	29,2	34,6	36,2	38,6
1100	29,4	36	38,3	39
1150	27,4	29,6	36,2	37,35
1200	28,1	31,4	31,7	34,9
1250	27,7	34,1	33	34,15
1300	26,2	35,4	32,6	31
1350	23,7	34,8	31,8	28
1400	17,9	33,2	28,1	25,75
1450	18,7	19,4	22,6	24,8
1500	19,8	17,7	20,2	23,95
1550	20,3	23,7	24,9	23,1
1600	21,3	28,7	29,2	23,15
1650	20,7	29,4	30,1	23,2
1700	19,8	27,4	28	23,5
1750	19,5	26	24,3	22,75
1800	19,6	21,6	18,6	20,1
1850	17,7	14	16	17,45
1900	15,3	10,7	15,3	12
1950	13,4	6,8	11,4	9,95
2000	12,7	4,2	9,2	11,55
2050	13,1	5,3	9,4	15
2100	13,6	7	11	17
2150	13,7	6,9	12,4	15,75
2200	14,6	8,4	13	13,8
2250	15,1	8,5	13,1	12,25
2300	15,4	8,1	12,9	11,1
2350	16	7,5	12,4	9,85
2400	15,4	6,4	11,2	8,15
2450	14,8	5	8,6	7,55
2500	14,3	3	7	0

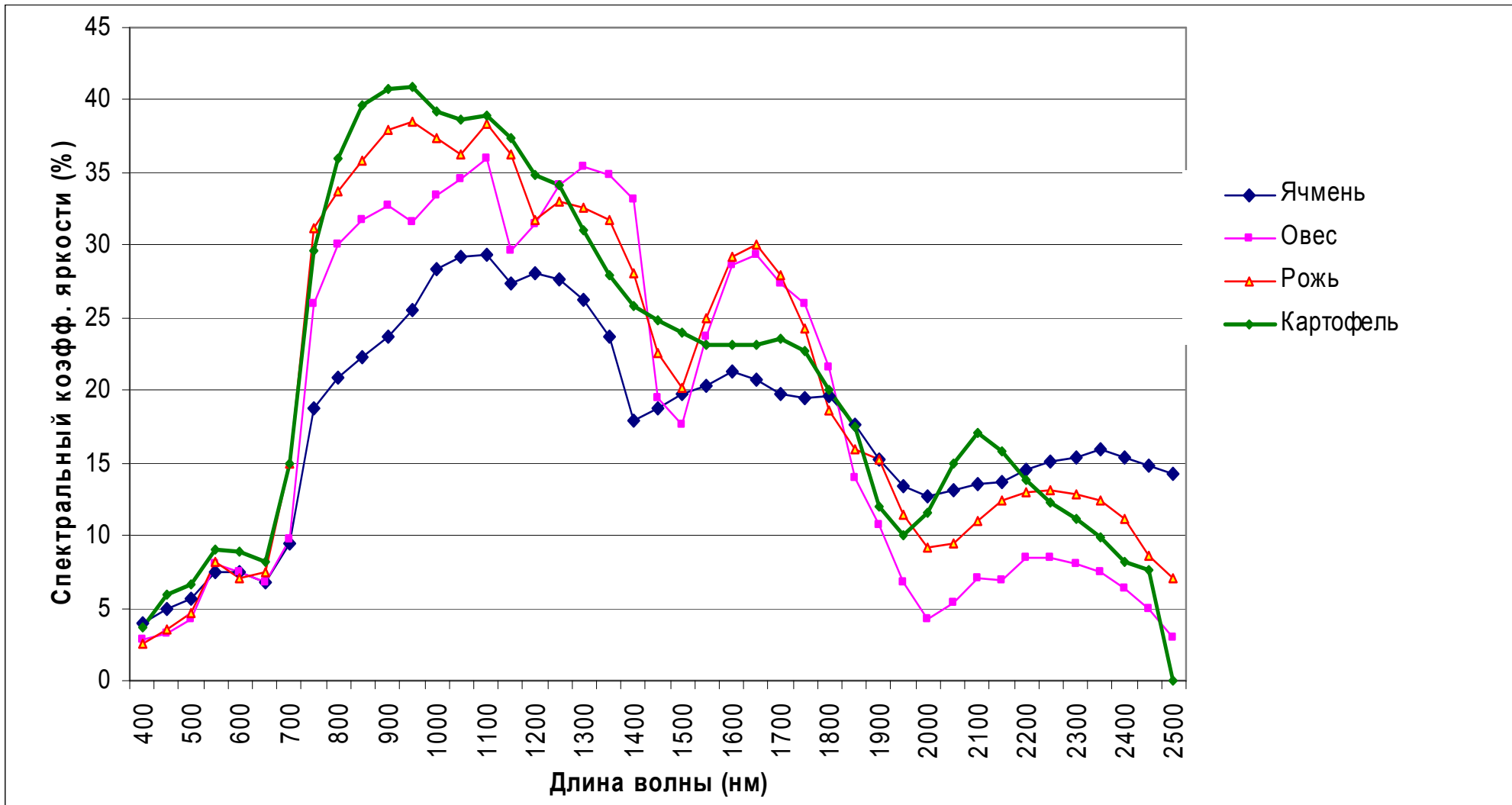


Рис. П 4 Графическое отображение СКЯ сельскохозяйственных угодий по данным таблицы П.4

**Коэффициенты спектральной яркости водных объектов**

Длина волны, нм	Лед	Наст	Снег	Снег крупа	Вода озерная
	Значение СКЯ, %				
400	1,900	99,320	98,703	96,944	3,000
450	1,860	99,400	99,140	97,720	2,800
500	1,830	99,410	99,141	97,877	2,900
550	1,810	99,290	98,977	97,204	2,900
600	1,790	99,240	98,706	96,588	2,700
650	1,780	98,820	98,041	94,713	2,700
700	1,770	98,390	97,369	92,900	3,600
750	1,760	97,770	96,392	90,312	3,600
800	1,750	96,450	94,665	86,018	3,600
850	1,740	95,850	93,385	82,854	3,600
900	1,730	94,430	91,234	77,393	3,200
950	1,720	92,770	88,478	71,699	2,200
1000	1,720	89,910	83,872	60,897	3,000
1050	1,710	89,680	83,162	60,021	5,000
1100	1,700	89,770	84,780	62,729	2,000
1150	1,690	87,610	80,169	54,558	2,500
1200	1,680	82,350	65,015	41,539	3,000
1250	1,670	76,860	64,811	30,330	3,100
1300	1,660	74,870	65,204	30,837	3,200
1350	1,650	76,430	65,496	30,254	1,200
1400	1,640	74,590	60,999	25,135	1,000
1450	1,630	29,820	13,917	1,052	1,200
1500	1,620	21,540	8,527	0,509	1,300
1550	1,614	26,410	11,910	0,801	1,500
1600	1,600	31,300	15,335	1,187	1,800
1650	1,580	39,910	20,918	2,443	2,600
1700	1,570	45,440	28,351	3,723	3,300
1750	1,550	50,690	32,741	5,375	3,700
1800	1,530	54,320	36,986	7,092	3,500
1850	1,510	54,390	37,548	7,599	1,900
1900	1,490	30,620	15,395	1,217	0,800
1950	1,460	13,100	4,494	0,242	0,900
2000	1,450	10,770	3,506	0,200	1,100
2050	1,430	13,930	5,035	0,261	1,300
2100	1,410	19,270	8,169	0,421	1,500
2150	1,370	33,640	17,541	1,471	1,600
2200	1,340	42,930	22,801	2,621	2,400
2250	1,290	44,780	28,080	3,669	2,600
2300	1,260	41,870	18,521	2,644	2,500
2350	1,200	37,040	9,903	1,835	2,400
2400	1,160	34,120	7,719	1,621	2,400
2450	1,090	31,990	6,666	1,489	2,400
2500	1,030	29,650	5,625	1,388	2,400

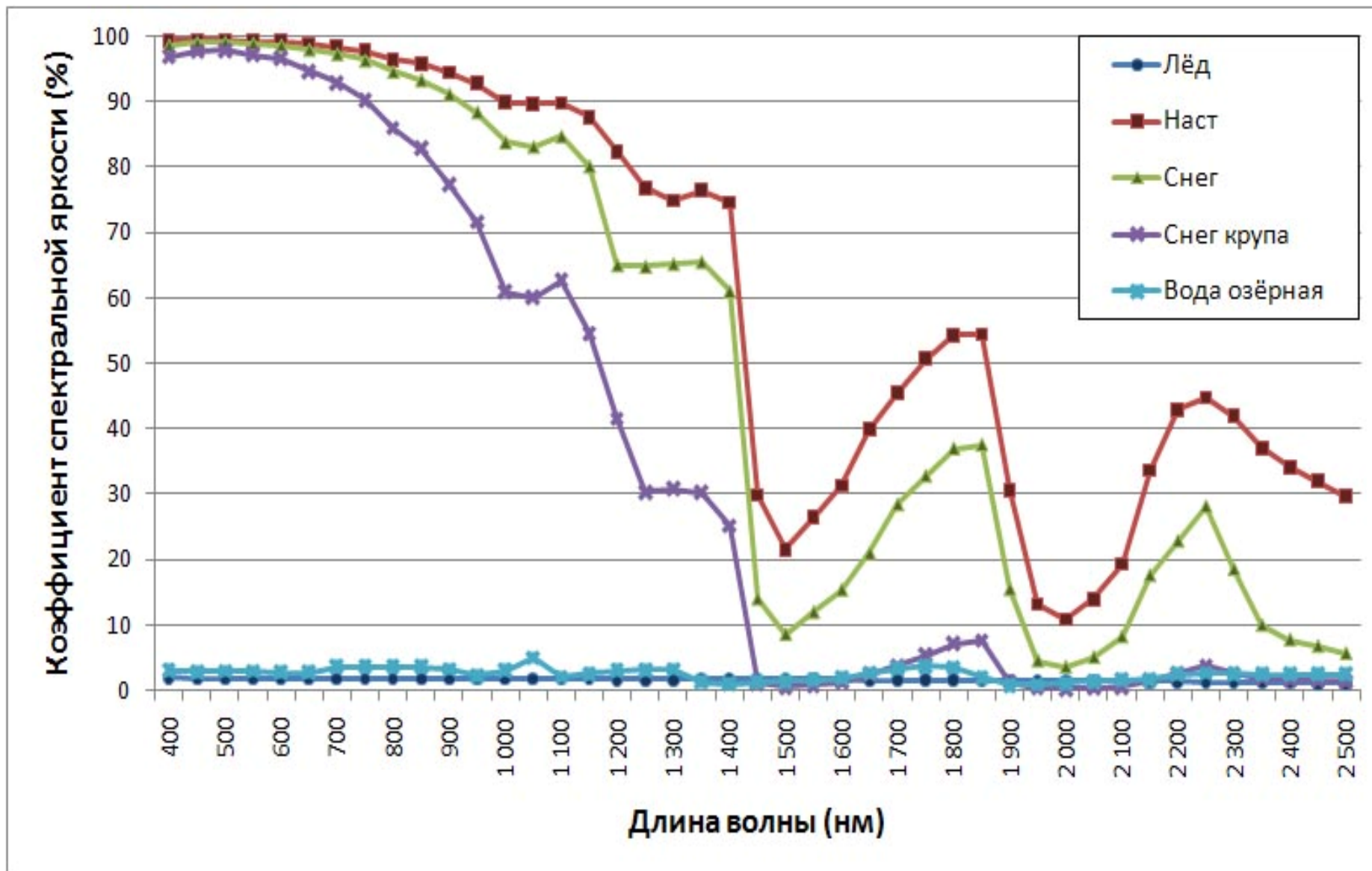


Рис. III.1 Графическое отображение СКЯ водных объектов по данным таблицы III.1