

Н. Н. Выгодская
И. И. Горшкова

Теория и эксперимент
в дистанционных
исследованиях
растительности

Н. Н. Выгодская
И. И. Горшкова

Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности



Ленинград Гидрометеониздат 1987

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. К. Росс,
д-р биол. наук Х. Г. Тооминг

Изложены закономерности отражения радиации растительностью, полученные из анализа теоретических моделей отражения системы растительность—почва. Экспериментально обоснована применимость моделей, базирующихся на теории переноса излучения в мутной горизонтально однородной среде для решения задач дистанционных исследований сельскохозяйственных посевов. Практические возможности теоретического подхода проиллюстрированы на примере определения посевов различных культур и диагностики состояния посевов в течение вегетационного периода.

Книга предназначена для агрометеорологов, экологов, геофизиков и специалистов в области дистанционных исследований природных ресурсов Земли.

The monograph by N. N. Vygodskaya and I. I. Gorshkova "Theory and experiment in vegetation remote sensing" presents the general regularities of radiation reflectance by vegetation obtained from analysis of system vegetation—soil theoretical models. The applicability of models based on the theory of radiation transfer in turbid horizontally homogeneous medium has been confirmed experimentally. The practical possibilities of theoretical approach have been illustrated on example of various crops determination and crops state recognition during the vegetative season.

The monograph is meant for agrometeorologists, ecologists, geophysicists and specialists who use remote sensing methods in natural resources investigations.

Монография

*Наталья Николаевна Выгодская
Ирина Ивановна Горшкова*

Теория и эксперимент
в дистанционных
исследованиях
растительности

Редактор А. Б. Котиковская. Художник Е. Е. Городная. Художественный редактор Б. А. Денисовский. Технический редактор Л. М. Шашкова. Корректор Л. Н. Хромова.

ИБ № 1779

Сдано в набор 24.11.86. Подписано в печать 06.03.87. М-20459. Формат 60×90/16. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 15,5. Кр.-отт. 15,5. Уч.-изд. л. 17,67. Тираж 1100 экз. Индекс ПРЛ-126. Заказ № 734. Цена 3 р. 10 к. Гидрометеониздат. 199226.

Ленинград, Бернга, 38.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

Предисловие

За последнее десятилетие выполнен большой объем работ в области аэрокосмического зондирования растительности. Однако из-за слабой разработанности теории отражения солнечной радиации от различных типов растительности и из-за отсутствия фундаментальных экспериментальных исследований материалы, полученные с помощью ИСЗ, до сих пор не могут быть использованы с высокой эффективностью для решения многих прикладных задач, в том числе и задач агрометеорологии. Это обстоятельство заставило в течение ряда последних лет усиленно заниматься математическим моделированием яркости системы почва—растительность и наземными экспериментами для выяснения зависимости спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) от различных факторов, в том числе от структуры растительности, оптических свойств элементов растений и почвы, от условий освещения и направления визирования.

Одним из немногочисленных научных коллективов в СССР, где этими работами активно занимаются, является группа, руководимая доктором геогр. наук Н. Н. Выгодской. Настоящая монография есть результат обобщения семилетней деятельности этой группы. В ней дан хороший обзор современных математических моделей отражения солнечной радиации от системы почва—растительность, обобщены многочисленные литературные данные с привлечением результатов собственных измерений, проведен анализ результатов численных экспериментов и рассмотрены теоретические зависимости СКЯ от входных параметров, характеризующих состояние растительности и почвы и условия освещения. Теоретические расчеты сопоставлены с данными экспериментов, проведенных авторами. Представленные в монографии результаты показывают, насколько велико число различных факторов, влияющих на СКЯ.

Среди опубликованных в СССР монографий по дистанционному зондированию настоящая монография выделяется тем, что в ней на основе вполне современной модели отражения системы растительность—почва описаны теоретические зависимости СКЯ, сопоставляющиеся с результатами натурных экспериментов. Кроме того, определена область применения теоретических моделей, базирующихся на концепции мутного слоя.

Многочисленные рекомендации, содержащиеся в монографии, будут полезными как при планировании комплексных экспериментов по дистанционному зондированию, так и при тематической интерпретации данных дистанционных измерений в интересах агрометеорологии и сельского хозяйства.

Ю. К. Росс

Основные сокращения и обозначения

- РП —растительный покров
ФАР —фотосинтетически активная радиация
БИК —ближний инфракрасный диапазон радиации
ХЛ —поверхностная плотность хлорофилла
СКЯ, b_λ —спектральный коэффициент энергетической яркости РП (ГОСТ 7601-78)
 b_s —спектральный коэффициент энергетической яркости почвы
 λ —длина волны
 P_i —комплексный спектральный индекс
 ρ_λ —спектральный коэффициент отражения фитоэлементов
 τ_λ —спектральный коэффициент пропускания фитоэлементов
 $\rho_{s\lambda}$ —спектральный коэффициент отражения почвы
 θ_0 —зенитный угол визирования
 $h_\odot$ —высота Солнца
 S_λ —прямая солнечная радиация
 D_λ —рассеянная радиация небосвода
 Q_λ —суммарная радиация
 L —относительная площадь поверхности фитоэлементов
 θ_ϕ —угол наклона фитоэлементов
 g^* —дифференциальная функция распределения углов наклона фитоэлементов
 G —интегральная функция распределения углов наклона фитоэлементов
 B —проективное покрытие
 γ_s —доля поверхности фитоэлементов зеленого цвета
 ω —обводненность

Введение

В дистанционных исследованиях наряду с интерпретацией эмпирических зависимостей между результатами аэрокосмических измерений и агрономическими показателями состояния посевов развивается направление по созданию математических моделей отражения солнечной радиации системой растительность—почва. Вопросами теории в нашей стране давно и успешно занимается коллектив биофизиков Института астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР. Однако в последнее десятилетие теоретический подход более интенсивно развивается за рубежом, особенно американскими исследователями. Но за редким исключением разработка математических моделей идет в отрыве от практических задач дистанционного зондирования, хотя численные эксперименты могут быть полезным инструментом при планировании натурных экспериментов и при теоретическом обосновании задач, решение которых возможно с помощью дистанционных методов.

Необходимость более активного привлечения математического моделирования для совершенствования аэрокосмических измерений побудило конференцию НАСА в 1982 г. рекомендовать исследователям обратить особое внимание на анализ существующих моделей отражения, их сравнение с натурным экспериментом на основе единого массива данных измерений и на перспективы теоретических разработок. Среди этих вопросов, с нашей точки зрения, наиболее важным является вопрос о необходимости всесторонней и корректной проверки адекватности моделей, так как отсутствие такой проверки, с одной стороны, препятствует практическому внедрению результатов теоретических исследований, а с другой — тормозит обоснованное усовершенствование теории.

В настоящей монографии обобщены результаты наших работ за 1978—1985 гг. по исследованию и проверке адекватности моделей отражения, базирующихся на теории переноса излучения в мутной однородной среде. Эти модели — классика математического моделирования радиационного режима растительного покрова. Их несомненное преимущество состоит в относительной простоте и малом наборе входных параметров, которые характеризуют состояние растительности, отражение почвы, условия освещения и визирования. Кроме того, входные параметры этих моделей обеспечены большим экспериментальным материалом, который дает представление об их природной изменчивости.

Для проверки адекватности моделей проводились серии специально поставленных **натурных экспериментов** преимущественно для сельскохозяйственных посевов на территории Украины и Молдавии. **Одновременно велись численные эксперименты в пространстве параметров, характеризующих максимально возможную их природную изменчивость.** Результаты численных экспериментов позволяли систематизировать зависимости спектральных коэффициентов энергетической яркости (СКЯ) от входных параметров модели. При этом мы не затрагивали вопросы, связанные с влиянием атмосферы, так как определение передаточной функции атмосферы есть самостоятельная и сложная задача оптики атмосферы. Исходя из этого ограничения расчетные оценки, приведенные в монографии, строго применимы только к данным наземных измерений или выполненным с низколетящих самолетов. В целом полученные теоретические закономерности формирования СКЯ мы рассматриваем как первое приближение к описанию реального природного процесса и как основу для перехода к исследованию более совершенных математических моделей отражения с целью оценки возможностей перспективных методов дистанционного зондирования.

Некоторые разработки, выполненные нами, являются составной частью комплексных исследований на подспутниковых полигонах, которые ведутся на географическом факультете МГУ под руководством Ю. Г. Симонова. Пользуясь случаем, мы хотим выразить ему признательность за внимательное отношение к нашим работам. Мы также благодарны А. Н. Голубеву, Е. Е. Егоровой, А. В. Ольчеву, В. А. Руденко, А. С. Уханову, Е. В. Фадеевой, И. Р. Антонян, Л. В. Бажинской, А. Б. Ищенко, И. В. Марченко, Н. А. Мельниковой, Е. Г. Орлатому, В. Н. Павловой, И. В. Пениной — бывшим студентам МГУ, работавшим с нами во время производственных практик и своих отпусков, а также Н. В. Красниковой — за помощь и отличную организацию полевых работ. Особую признательность мы хотим выразить Ю. К. Россу и Т. А. Нильсону, многолетнее общение с которыми оказало большое влияние на наши научные взгляды.

1.1. Краткая характеристика моделей

Первые теоретические модели радиационного режима растительного покрова (РП) были опубликованы в 1953 г. (К. С. Шифриным и японскими учеными Монси и Сазуки). В последующие 30 лет математическое моделирование радиационного режима РП развивалось в связи с двумя крупными научными проблемами: исследованием фундаментальных вопросов фотосинтетической продукции посевов и освоением дистанционных методов изучения растительных объектов.

Первоначально разрабатывались математические модели радиационного режима (ММРР) в рамках создания количественной теории продукционного процесса РП. Конечная цель ММРР как субмоделей общих моделей энерго- и массообмена состояла в расчете поглощенной растительностью радиации для широких спектральных диапазонов (фотосинтетически активной — ФАР, ближней инфракрасной — БИКР и интегральной — ИНТ радиации) [8, 46, 122 и др.]. Широкое освоение дистанционных методов изучения растительности в интересах сельского хозяйства послужило новым стимулом развития ММРР. Причем ММРР, ориентированные на решение задач дистанционного зондирования, являются в основном усовершенствованным блоком отраженной радиации в общих моделях радиационного режима. Разработка подобных ММРР ведется с целью расчета спектральных отражательных характеристик РП как функций оптико-биологических параметров РП.

Ниже основное внимание уделяется ММРР, позволяющим описать отражательные свойства РП.¹ Закономерности их формирования для любой среды в принципе могут быть исследованы с помощью теории электромагнитного поля. Уравнения, описывающие взаимодействие излучения с растительностью в рамках этой общей теории, были сформулированы в начале 80-х годов [30]. Однако математические методы их решения еще не разработаны и, кроме того, отсутствует информация о значениях входных параметров модели для разнообразных природных объектов. Указанные причины пока что ограничивают использование предложенного в [30] подхода. Опыт моделирования радиационных процессов в РП к настоящему времени накоплен преимущественно при создании ММРР, базирующихся на теории переноса

¹ Модели для отдельного листа не рассматриваются.

излучения (табл. 1.1), которая является частным случаем теории электромагнитного поля.

Как известно, теория переноса хорошо развита применительно к задачам астрофизики и физики атмосферы. В 1950 г. Чандрасекаром были получены наиболее общие уравнения переноса радиации в мутной среде. Еще ранее предложены упрощенные одномерные уравнения рассеяния диффузной радиации, которые затем были дополнены с учетом прямой радиации [46, 73, 74]. Сложность физических и биохимических процессов в системе растительность—почва потребовала модификации уравнений, уже известных в физике диффузно рассеивающих сред, в том числе описания принципиально нового свойства—геометрической структуры среды как важнейшего фактора, определяющего оптические характеристики РП.

Два обзора ММРР, разработанных для расчета характеристик отражения, сделаны в работах Бунника [73, 74]. Но эти обзоры недостаточно освещают состояние вопроса, так как автор плохо знаком с исследованиями советских ученых.

С нашей точки зрения, созданные к настоящему времени ММРР можно разделить на несколько классов, причем эта классификация прежде всего отражает поиск путей количественного описания реальной структуры природных РП и соответственно степени приближения к реальным процессам рассеяния и поглощения радиации.

К первому классу относятся ММРР, построенные на концепции мутного слоя, в которых РП рассматривается как горизонтально однородная среда, состоящая из случайно размещенных тонких пластинок с заданными оптическими свойствами, вертикальным распределением и пространственной ориентацией. Принимается также, что элементы мутности (т. е. элементы растительности) размещены в пространстве по закону Пуассона. Модели этого класса в основном различаются по детальности количественного описания пространственной ориентации, вертикального профиля относительной площади фитоэлементов и статистическому закону, характеризующему пространственное размещение элементов растительности (в некоторых моделях учитываются также отклонения от пуассоновского размещения, описываемые отрицательным и положительным биномиальным законом [122]). Наряду с разными вариантами структуры РП в ММРР рассматриваемого класса с различным приближением задаются условия освещения на верхней границе РП и оптические свойства отдельных фитоэлементов. Наиболее полно теория переноса радиации в РП, базирующаяся на концепции мутной однородной среды, разработана в цикле публикаций Росса и Нильсона [36, 46, 48 и др.].

Основные допущения, используемые при построении ММРР первого класса, заключаются в следующем: 1) фитоэлементы распределены в объеме растительности в соответствии с законом Пуассона; 2) размеры отдельных фитоэлементов малы; 3) фитоэлементы рассеивают радиацию изотропно; 4) отсутствует вер-

тикальная стратификация плотности РП и пространственной ориентации фитоэлементов. Кроме того, в отдельных ММРР (см. примечание к табл. 1.1) предполагается азимутальная симметрия всех радиационных потоков, что далеко не всегда соответствует реальным угловым распределениям.

Первое из указанных выше допущений является самым грубым, так как в природных растительных сообществах в размещении фитоэлементов наблюдаются отклонения и в сторону регулярности, и в сторону контагиозности, описываемые положительным и отрицательным биномиальным законом соответственно. Экспериментально установлено, что для большинства травостоев характерен случайный тип размещения фитоэлементов [46]. Отклонения в сторону контагиозности возможны в сильно загущенных посевах (эффект упаковки [1]), отклонения в сторону регулярности — в случае редких посевов с рядковой структурой. Нарушение случайного типа размещения фитоэлементов влечет либо завышение, либо занижение теоретических оценок пропускания радиации, рассчитанных в предположении о выполнении закона Пуассона [46, 122]. Вопрос о влиянии упорядоченности размещения фитоэлементов на отражательные свойства РП мало исследован. По теоретическим оценкам Гоудриана, для плотного РП с горизонтальными листьями влияние типа размещения фитоэлементов на альбедо A больше сказывается в видимом диапазоне. Причем отклонение от пуассоновского размещения в сторону регулярности вызывает более существенные изменения как A , так и коэффициента экстинкции K , чем отклонения в сторону группового размещения [99]:

Диапазон	Пуассоновское		Регулярное		Групповое	
	A , %	K , %	A , %	K , %	A , %	K , %
Видимый	100	100	+80	+160	—40	—30
БНК	100	100	+30	+60	—20	—25

Из этих оценок следует также, что тип размещения в большей степени влияет на ослабление радиации, чем на отражение.

Допущение о малых размерах фитоэлементов влечет за собой пренебрежение эффектом полутени, но его учет для отражения не предусмотрен ни в одной из моделей данного класса. По оценкам О. А. Анисимова [5], полученным при использовании метода статистических испытаний, вклад эффекта полутени в пропускание радиации составляет 5—7 %, что значительно меньше погрешностей, которые являются следствием неадекватного описания пространственной ориентации фитоэлементов.

Характеристика угловой структуры излучения, рассеянного отдельными фитоэлементами, не требует особой детализации вследствие объединения большого числа индикатрис различных

Характеристика некоторых теоретических моделей радиационного режима растительного покрова

Модель, автор	Год	Радиация	Оптические свойства фитозлементов	Структура РП	Оптические свойства почвы	Кратность рассеяния радиации в РП	Конечные характеристики отражения
AGR Allen, Gayle, Richardson [67, 68] ¹ Рачкулдик, Ситни- кова [44] ²	1968, 1970	Прямая	См. примечание	Задана надземная фитомасса на единицу поверхности	Матовая, с заданным коэффициентом отражения	Однократное	Альбедо
	1982	То же	Не заданы		То же	Многократное	Коэффициент яркости, альбедо
	1988	Прямая, рассеянная	Матовые, с заданными коэффициентами отражения и пропускания		То же	Однократное	Альбедо
Isobe [107, 108]	1962, 1969	То же	Матовые, с заданным коэффициентом рассеяния	Фитозлементы с постоянным углом наклона и равномерным распределением по азимуту	То же	Однократное, многократное	Коэффициент яркости, альбедо
	1972, 1983	То же	Матовые, с заданными коэффициентами отражения и пропускания	Фитозлементы с заданной функцией распределения по углу наклона и равномерным распределением по азимуту	То же	То же	Коэффициент яркости

¹ Suits [137—139]

1981, 1984	То же	То же	То же	То же	То же	То же	То же	То же	То же
1983, 1985	То же	Задана индика- тора рассеяния фитозлементов	Фитозлементы с заданной функ- цией распределе- ния по углу на- клона и по ази- муту	То же	То же	То же	То же	То же	То же
1983— —1975	То же	Непрозрачные, задана индика- тора элементарно- го слоя раститель- ности	Фитозлементы с заданной функ- цией распределе- ния по углу на- клона и равно- мерным распреде- лением по ази- муту	То же	То же	То же	То же	То же	То же
1984	То же	Заданы коэффи- циенты отраже- ния, пропускания и показатель пре- ломления	Фитозлементы со сферической ори- ентацией	То же	То же	То же	То же	То же	То же
1982	То же	Матовые, с задан- ными коэффици- ентами отражения и пропускания верхней и нижней сторон	Фитозлементы с заданной функ- цией распределе- ния по углу на- клона и равно- мерным распреде- лением по ази- муту	То же	То же	То же	То же	То же	То же

SAIL

Bunnik, Verhoef
[144, 146]⁴

Goudriaan [99]

Chen [78, 79]⁵

Росс, Нильсон
[36, 46, 48]⁶

Кууск [33]⁷

Кууск, Нильсон
[41]⁸

CSP

Cooper, Smith,
Pitts [83]

Модель, автор	Год	Раднация	Оптические свойства фотозлемента	Структура РП	Оптические свойства почвы	Кратность рассеяния радиации в РП	Конечные характеристики отражения
Kimes и др. [106] ⁹	1982—1985	То же	Матовые, с заданными коэффициентами отражения и пропускания	Фитозлементы с заданной функцией распределения по углу наклона и азимуту	Задана индикатриса отражения	То же	То же
CUPID Norman [106] ¹⁰	1985	То же	То же	То же	То же	То же	То же

¹ Коэффициенты уравнений функционально не связаны с оптическими свойствами и структурой растительности, они зависят из пяти независимых полевых излучений.

² Модель является модификацией ММРР АGR; введен параметр — коэффициент яркости (или альbedo) предельно плотного РП, значение которого находится из полевых измерений.

³ Модель является усовершенствованным вариантом модели АGR; модификация осуществлена за счет введения параметров, характеризующих оптические свойства и структуру растительности. Для описания структуры РП используются проекции площади поверхности фитозлемента на горизонтальную и вертикальную плоскости, предусмотрено выделение в РП нескольких однородных слоев; включены азимуты Солнца и визирования; дано решение для учета обратного блеска; в модификации 1983 г. введена рядковая структура РП.

⁴ Модель построена на основе модели Суитса. При описании структуры РП используется детальная характеристика распределения фитозлемента по углу наклона, особенно для направлений, близких к вертикальному; предусмотрено выделение в РП нескольких однородных слоев.

⁵ Модель является усовершенствованным вариантом модели Гудриана; введены азимуты Солнца и визирования. Более полная ММРР. Предусмотрена возможность использования реального вертикального профиля относительной поверхности и пространственной ориентации фитозлемента; введена индикатриса рассеяния радиации элементарным слоем растительности с учетом азимута визирования и Солнца.

⁷ Введена функция, учитывающая корреляцию в расположении фитозлемента; описан эффект обратного блеска.

⁸ Для учета обратного блеска введены эмпирические параметры, значения которых зависят от размеров фитозлемента, относительной площади фитозлемента и ее вертикального профиля. Модель может быть развита для произвольной пространственной ориентации фитозлемента.

⁹ Единственная трехмерная модель. В основе ее построения — выделение однородных структурных блоков; включены азимуты визирования и Солнца; возможно задание произвольного вертикального профиля относительной поверхности и ориентации фитозлемента (см. также Applied Optics, 1982, v. 21, G. Optical Society of America, 1984, v. 1).

¹⁰ Включены азимуты визирования и Солнца; возможно задание произвольного вертикального профиля относительной поверхности и ориентации фитозлемента, а также индикатрисы рассеяния фитозлемента.

фитоэлементов и их частей, ориентированных в разных направлениях. Очевидно, что это предположение не может быть распространено на РП со специфичными признаками пространственной ориентации (например, при явно выраженном гелиотропизме у растений или при их полегании).

Учет вертикального профиля структурных параметров РП не вызывает принципиальных трудностей при моделировании радиационного режима (табл. 1.1), но значительно увеличивает объем расчетов. Безусловно, целесообразность усложнения вычислений зависит от особенностей структуры исследуемых РП. Например, расчеты для сомкнутых посевов сои и кукурузы на основе моделей Суитса и SAIL показали, что значения спектральных коэффициентов энергетической яркости (СКЯ), полученные при использовании одно- и многослойной модификаций этих моделей, различались всего на 1—4 % [69]. Однако можно ожидать увеличения расхождений в оценках при наличии слоев с разной ориентацией фитоэлементов и т. п.

Дальнейшее развитие моделирования было направлено на разработку подходов, позволяющих преодолеть отмеченные выше ограничения.

Учет нелаамбертовского характера рассеяния радиации фитоэлементами с использованием как теоретических, так и экспериментальных результатов может быть выполнен в рамках рассматриваемых ММРР без их принципиальных изменений. Примером служат ММРР Ю. Росса, Т. Нильсона и К. Росса (1980 г.), а также модификация модели Гоудриана, выполненная Чеп [78, 79]. Но обычно введение индикатрис сопровождается значительным усложнением расчетных схем. Исключение составляет подход, предложенный E. Reyna и G. D. Badhwar [106], который позволяет для любой модели в отдельном субблоке оценить поправки в СКЯ, связанные с наличием зеркальной составляющей в отражении отдельных фитоэлементов. Существенным ограничением на введение индикатрис в ММРР является недостаток экспериментальных данных об угловой зависимости отражательных свойств отдельных фитоэлементов [34].

Стремление преодолеть другие ограничения ММРР, построенных на концепции мутной горизонтально однородной среды, привело как к существенным модификациям этих моделей при сохранении общего подхода, так и к развитию принципиально новых ММРР.

Выше упоминалось, что в ряде ММРР отклонение от пуассоновского размещения фитоэлементов введено через отрицательный и положительный биномиальный закон, хотя в самом общем случае размещение может быть описано с помощью марковского процесса [122]. Это первое приближение к описанию пространственно неоднородной структуры РП при сохранении допущений о малых размерах и независимом расположении фитоэлементов, заполняющих весь объем плоскопараллельного РП. Следующим шагом явилось представление РП как комбинации оголенных

участков почвы и различных геометрических тел, размещенных по тому или иному закону [66, 91]. В этом случае концепция мутной среды распространяется только на объем геометрической фигуры, заполненной фитоэлементами.

Одной из существенных модификаций является также введение корреляции в расположение фитоэлементов и зависимости прозрачности РП в направлениях падения и отражения солнечной радиации. Подобная модификация, выполненная Куусом [33] для ММРР пластинчатой среды, позволяет описать эффект увеличения яркости в направлении обратного блеска — *hot spot*. Без дополнительных теоретических построений в рамках исходной концепции мутной среды этот эффект не поддается описанию и может быть введен лишь интуитивно, как, например, в модели Суитса.

Еще более детальный учет пространственной неоднородности реализован в ММРР следующего класса, построенных на статистической теории переноса радиации в крупнодисперсной оптической среде [5, 6, 37, 38, 46, 124]. В некоторых из этих ММРР задается закон размещения как отдельных фитоэлементов (и/или внутри- и межкроновых просветов), так и растений в целом, габитус особей, густота их стояния и взаимное перекрытие. В работах Нильсона [37, 38] изложена методика и результаты расчетов отражательных характеристик РП, а также показана возможность описания эффекта обратного блеска в рамках статистической теории переноса радиации.

Поиск способа задания произвольной структуры РП и конечных размеров фитоэлементов привел к полному отказу от идеализированного представления РП мутной однородной средой. Работа Тапака [141] открывает новый этап в исследовании радиационного режима РП, который характеризуется привлечением к решению уравнений переноса излучения метода Монте-Карло. За 19 лет, прошедшие с момента опубликования этой работы, в теоретической фитоактинометрии сформировалось отдельное направление [11, 28, 47, 133 и др.]. Развитие этого направления определяется тем, что применение метода Монте-Карло не накладывает каких-либо принципиальных ограничений на структуру РП, позволяет описать такие сложные эффекты, как *hot spot* и статистический характер радиационного поля в целом. Так, например, в модели Oliver — Smith [133] полог представлен слоем, для которого заданы относительная площадь фитоэлементов и распределение их углов наклона. Дополнительно в моделях Росса — Каневского [28], Росса — Маршака [47] введены размеры фитоэлементов, статистические законы распределения расстояний между ними и их пространственной ориентации. Во всех расчетных схемах этого класса, так же как и в предыдущих ММРР, используются оптические свойства отдельных фитоэлементов и поверхности почвы. Недостатком подхода, основанного на методе статистических испытаний, является необходимость большого объема машинного времени. Кроме того, отсутствие ин-

формации о нетрадиционных фитометрических показателях в разнообразных РП (сбор которой в полевых условиях чрезвычайно трудоемок) препятствует широкому внедрению метода Монте-Карло и применению его как «эталонного» при проверке других ММРР.

Все рассмотренные выше ММРР дают возможность рассчитать отражательные характеристики системы растительность—почва. Для интерпретации спутниковых данных (и/или данных дистанционных измерений, полученных с авиационных носителей с больших высот) необходимо развитие ММРР применительно к системе атмосфера—растительность—почва. В [97, 145] предложены первые модели такого рода, построенные на уравнениях теории переноса.

При развитии теоретического моделирования особое внимание должно быть уделено двум вопросам: 1) сравнению расчетных и измеренных в натурных условиях СКЯ и 2) сопоставлению закономерностей формирования СКЯ, следующих из анализа различных ММРР. Очевидно, что совместное решение этих вопросов — наиболее логичный подход как для обоснования требований к дальнейшему усовершенствованию моделей, так и для определения области их применения при решении практических задач дистанционного зондирования РП.

Указанные аспекты проблемы только в последние годы стали предметом пристального внимания исследователей. Усиление работ по теоретическому моделированию достаточно симптоматично и закономерно и объясняется назревшей необходимостью создания фундаментальной базы существующих и перспективных аэрокосмических методов.

К настоящему времени отсутствуют сопоставления ММРР различных классов. Сравнительный анализ выполнен для ограниченного числа моделей, относящихся лишь к первому из выделенных нами классов. При этом за основу принимается модель Суитса, как наиболее исследованная. В частности, Бунник [73] оценил ее чувствительность к входным параметрам при прямой постановке задачи. Возможность решения обратной задачи — восстановления значений параметров, характеризующих оптико-биологическое состояние РП, по известным значениям СКЯ показана в цикле работ, выполненных под руководством N. Goel¹.

Обычно при сопоставлении моделей сравниваются расчетные СКЯ и тенденции их изменения в зависимости от параметров абстрактного РП. Другой подход состоит в сопоставлении для реального растительного объекта СКЯ, рассчитанных по нескольким моделям и измеренных.

Первый подход был применен для сравнения с моделью Суитса моделей Гоудриана и SAIL (табл. 1.2). В дополнение к материалам, помещенным в табл. 1.2, отметим следующее. Для моделей Гоудриана и Суитса наименьшие расхождения

¹ Remote Sens. Envir., 1983, 1984, v. 13—15.

Таблица 1.2

Результаты сравнения теоретических закономерностей изменения СКЯ по моде

Условия освещения и визирования	Относительная площадь фитоэлементов L	Ориентация фитоэлементов	Характеристика оптических свойств компонентов РП
Сунтс—			
$D_\lambda, \Theta_0 = 0 \div 90^\circ$	10	От горизонтальной до вертикальной	Почва черная, фитоэлементы прозрачные, зеленые
Сунтс—Гюдриан			
$S_\lambda, h_\odot = 15 \div 65^\circ, \Theta_0 = 0^\circ$	0,5—5,0	То же	Почвы разные, фитоэлементы прозрачные, от зеленых до желтых
Сунтс—			
$S_\lambda, h_\odot = 15 \div 90^\circ, \Theta_0 = 0 \div 90^\circ$ в плоскости вертикала Солнца	2,0	Сферическая	Почва светлая, фитоэлементы прозрачные, зеленые
Примечание. D_λ — рассеянная радиация; S_λ — прямая радиация; $h_\odot$ — хождение между СКЯ, рассчитанными по двум моделям, равно абсолютной			

в СКЯ (δ) установлены для РП, состоящих только из вертикальных и горизонтальных компонентов, т. е. в том случае, когда структура РП полностью отвечает идеализации, использованной в модели Сунтса [137]. Этот результат наглядно показывает принципиальное значение способа представления ориентации в определении СКЯ. Выявленные для сферической ориентации фитоэлементов значения $h_\odot$, при которых СКЯ инвариантны к выбору модели, могут измениться при других типах ориентации. Это предположение основано на теореме «взаимности» [78, 99], согласно которой СКЯ являются симметричными функциями относительно направления освещения и направления визирования. Следовательно, сложный характер зависимости δ от угла визирова-

лям Гудриана, SAIL и модели Суитса для абстрактного РП

Общая характеристика расхождений между СКЯ

Условия формирования и масштаб наибольших расхождений между СКЯ

Гудриан [73]

δ зависит от ориентации фитоэлементов, θ_0 и спектрального диапазона. Для $\theta_0 = 0^\circ$ СКЯ выше, чем по Суитсу, кроме случая с вертикальной ориентацией. Совпадают тенденции изменения СКЯ в зависимости от θ_0

При сферической ориентации максимальные δ в надири: в видимом диапазоне 13,5 %, в БИК-диапазоне 11,5 %

([73] и наши данные)

δ зависит от сочетания оптических характеристик фитоэлементов и почвы, плотности РП, ориентации фитоэлементов, h_0 . Совпадают тенденции изменения СКЯ в зависимости от плотности РП, ориентации фитоэлементов (для сомкнутых РП), от h_0 (в видимом диапазоне для несомкнутых РП)

При сферической ориентации максимальные δ достигают 20—30 %, минимальные формируются при $h_0 = 40 + 50^\circ$

SAIL [144]

δ зависит от θ_0 , h_0 , спектрального диапазона. Совпадают тенденции изменения СКЯ в зависимости от θ_0 , в видимом диапазоне — от h_0 . В надири при $h_0 < 45^\circ$ СКЯ выше, чем по Суитсу, при $h_0 \geq 45^\circ$ ниже

Для $\theta_0 = 0^\circ$ максимальные δ при $h_0 = 15^\circ$ (20—30 %), минимальные при $h_0 = 35 + 45^\circ$. В целом при $\theta_0 < 45^\circ$ δ возрастают

высота Солнца; θ_0 — зенитный угол визирования (для надира $\theta_0 = 0^\circ$); δ — рас-
разности СКЯ, нормированной к максимальному из сравниваемых значений СКЯ.

ния θ_0 при различной ориентации фитоэлементов, показанный в [73], сохранится и для зависимости δ от h_0 .

Отметим, что одна из наиболее сложных современных моделей — CUPID для абстрактного РП дает близкие с моделью SAIL зависимости СКЯ от h_0 и θ_0 , но сами значения СКЯ по CUPID несколько ниже, чем по SAIL (N. S. Goel, R. L. Thompson, 1985).

Второй подход был применен при сравнении с моделью Суитса моделей Cooper — Smith — Pitts (CSP) и SAIL.

Из сравнения MMPP Суитса и CSP, проведенного с привлечением результатов измерений СКЯ сомкнутых посевов сои и пастбища, следует, что для надира различия в расчетных

значениях СКЯ зависят от $h_{\odot}$ и в красной области видимого диапазона составляют 35—55 %, в БИК-диапазоне — 10—45 % [83]. В то же время отклонения (%) теоретических оценок СКЯ от измеренных $((СКЯ_T - СКЯ_M)/СКЯ_M)$ для этих моделей имеют разный знак:

Модель	Длина волны, нм	Посев сои, %		Пастбище, %
		$h_{\odot} = 55^{\circ}$	$h_{\odot} = 35^{\circ}$	$h_{\odot} = 55^{\circ}$
Суитс	650	—20	—40	—60
	800	35	20	10
CSP	650	30	35	—40
	800	—10	0	0

Для БИК-диапазона лучшее согласование с измеренными СКЯ дает модель CSP. Для видимого диапазона на основе выявленных отклонений нельзя сделать заключение о преимуществе одной из двух рассмотренных ММРР.

Сравнение ММРР Суитса и SAIL на примере посевов сои и кукурузы показало, что для различных направлений визирования использование модели SAIL позволяет достичь лучшего количественного согласования с экспериментом [69]. В частности, для посева сои в БИК-диапазоне максимальные отклонения от измеренных теоретических значений СКЯ по SAIL составляют $\pm 15 \div 20$ %, в то время как расчеты по Суитсу дают систематическое завышение при максимальном расхождении с измерениями 46 %. Для обеих моделей наибольшие ошибки расчетов возникают при направлениях визирования, расположенных в плоскости вертикала Солнца. По [106], введение зеркальной составляющей в расчеты СКЯ с помощью модели SAIL повышает их согласование с данными измерений для того же посева сои на 12 %. Таким образом, учет в моделях эффекта обратного блеска и зеркального отражения существенно искажает угловое распределение радиации, отраженной РП.

В целом имеющиеся к настоящему времени данные сравнительного анализа некоторых ММРР показывают, что модель Суитса дает существенные расхождения как с результатами расчетов по другим моделям, так и с данными измерений, особенно в БИК-диапазоне. Это указывает на недопустимость упрощенного представления структуры РП и прежде всего ориентации фитоэлементов. Соотношение между СКЯ, полученными по разным моделям, варьирует в зависимости от конкретного сочетания значений входных параметров. Для того чтобы перейти от частных результатов к всестороннему сопоставлению моделей, необходимо систематизировать теоретические закономерности для разнообразных сочетаний входных параметров совместно с проверкой адекватности моделей и анализом механизмов, определяющих СКЯ

в рамках каждой расчетной схемы. По нашему мнению, такой путь есть основа и для более обоснованной оценки преимуществ той или иной модели.

При сложившемся к настоящему времени положении в моделировании радиационного режима РП трудно отдать предпочтение какому-либо из классов ММРР или какой-либо модели. Поэтому свои исследования мы построили на «классических» ММРР, базирующихся на теории переноса радиации в мутной горизонтально однородной среде. Несомненными преимуществами этих ММРР являются относительная простота, обеспеченность экспериментальными данными о пространственно-временной изменчивости входных параметров, малые затраты машинного времени при реализации расчетной схемы на ЭВМ.

Априори можно полагать, что ввиду общности исходных предпосылок основные закономерности формирования отражательных свойств РП не должны существенно зависеть от выбора модели. Высказанное предположение подтверждается результатами предварительного сравнительного анализа некоторых моделей этого класса, который показал, что альбедо плотного РП с горизонтальными листьями в моделях Cowan, Гудриана, Суитса, и Росса — Нильсона описывается одинаковым выражением:

$$A = \rho / (1 - \tau + K), \quad K = \sqrt{(1 - \tau)^2 - \rho^2}, \quad (1.1)$$

где ρ , τ — соответственно коэффициенты отражения и пропускания отдельных фитоэлементов.

К концу 70-х годов, т. е. к моменту начала наших работ, наиболее развитыми являлись три ММРР: Гудриана, Суитса и самая сложная из них Росса—Нильсона. Мы остановились на модели Гудриана из следующих соображений. Во-первых, в отличие от Суитса, Гудриан использует более корректное описание структуры РП за счет введения дифференциальной функции распределения углов наклона фитоэлементов. Во-вторых, ММРР Гудриана сопряжена с общей моделью продукционного процесса, поэтому при необходимости может быть исследована связь отражения и характеристик энерго- и массообмена в рамках единого теоретического подхода. Кроме того, изучение закономерностей формирования отражения на основе относительно простых моделей есть необходимый шаг для перехода к более сложным, типа модели Росса—Нильсона или появившимся позднее ММРР Kimes, CUPID и др.

1.2. Описание модели Гудриана¹

Как и во всех моделях подобного класса, в модели Гудриана [99] использованы группы входных параметров, которые

¹ Здесь и далее некоторые из авторских обозначений заменены на более употребительные, а в формулах (1.3)—(1.16) сохранены в авторском варианте; θ отсчитывается от горизонта. В дальнейшем используется общепринятое обозначение $\theta_0 = 0^\circ$ для надира.

характеризуют условия освещения, структуру РП, оптические свойства фитоэлементов и почвы (рис. 1.1).

РП представляется слоем, бесконечным в горизонтальном направлении со случайным распределением фитоэлементов в пространстве. РП разделяется на m тонких элементарных слоев толщиной L_s , в пределах которых отсутствует взаимное затенение. Если суммарная относительная площадь фитоэлементов всего

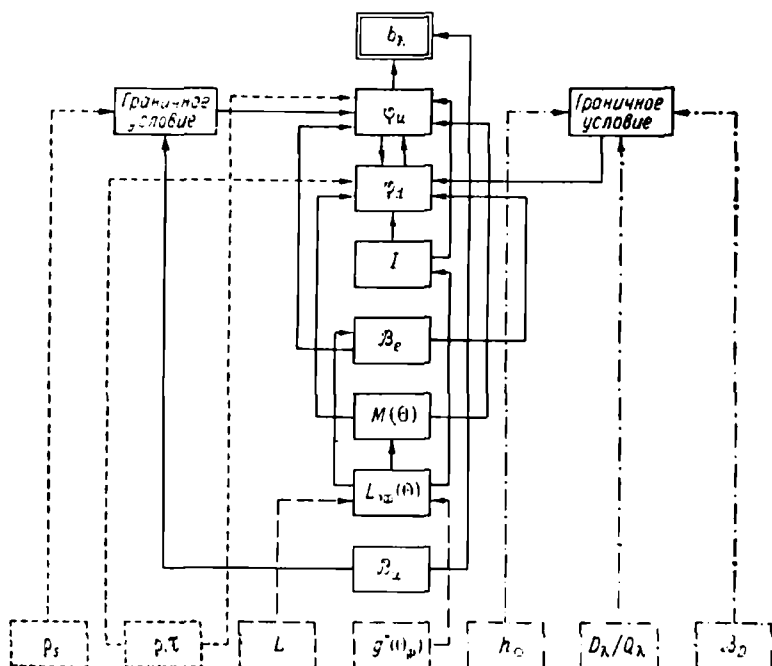


Рис. 1.1. Блок-схема модели отражения системы растительность—почва Гудриана.

Условные обозначения см. в тексте.

РП равна L , то $m = L/L_s$. Ориентация фитоэлементов в пространстве задается углом их наклона в предположении о равномерном распределении по азимуту. Фитоэлементы считаются матовыми. В качестве параметра, характеризующего оптические свойства РП, связанные с его структурой, используется средняя проекция поверхности фитоэлементов с углом наклона θ_ϕ на направление, задаваемое углом $\theta - G(\theta_\phi, \theta)$. Средняя проекция площади фитоэлементов всего слоя на направление $\theta - G(\theta)$ находится как

$$G(\theta) = \sum_{\theta_\phi=1}^9 g^*(\theta_\phi) \tilde{G}(\theta_\phi, \theta), \quad (1.2)$$

где $g^*(\theta_\phi)$ — дифференциальная функция распределения углов наклона фитоэлементов, заданная для 9 десятиградусных зон в интервале $0-90^\circ$ с условием нормирования $\sum_{\theta_\phi=1}^9 g^*(\theta_\phi) = 1$.

Диффузная радиация внутри РП подразделяется на две составляющие: восходящий поток и нисходящий, каждый из которых, в свою очередь, подразделяется на 9 классов, соответствующих десятиградусным зонам, полностью охватывающим верхнюю и нижнюю полусферу. Радиация, падающая на верхнюю границу РП, представляется как сумма прямой и рассеянной, причем вклад каждого десятиградусного сегмента небосвода в освещенность горизонтальной поверхности описывается с помощью весовой функции $B_D(\theta_s)$.

Ослабление радиационного потока, распространяющегося в направлении θ , пропорционально величине эффективной проекции листовой поверхности на это направление $L_{\text{эф}}$:

$$L_{\text{эф}}(\theta_\phi, \theta) = L_s \tilde{G}(\theta_\phi, \theta) / \sin \theta. \quad (1.3)$$

Доля радиации, проходящая слой растительности без ослабления, равна

$$M(\theta_\phi, \theta) = 1 - L_{\text{эф}}(\theta_\phi, \theta). \quad (1.4)$$

Несмотря на предположение о том, что фитоэлементы действуют как ламбертовские рассеиватели, радиация, рассеянная всем слоем растительности, имеет некоторое угловое распределение, отличное от изотропного из-за функциональной связи $L_{\text{эф}}$ и θ . Весовая функция $B_s(\theta_0, \theta_\phi)$, учитывающая этот эффект, имеет вид

$$B_s(\theta_0, \theta_\phi) = \frac{B_u(\theta_0) L_{\text{эф}}(\theta_0, \theta_\phi)}{\sum_{\theta_s=1}^9 B_u(\theta_s) L_{\text{эф}}(\theta_s, \theta_\phi)}, \quad (1.5)$$

где θ_s — направление падающих лучей; θ_0 — направление рассеянных лучей; B_u описывает зональное распределение радиации, рассеянной равномерно по всем направлениям фитоэлементами с углом наклона θ_ϕ :

$$B_u(\theta) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} 2 \sin \theta \cos \theta d\theta. \quad (1.6)$$

Доля радиации, ослабленной всем слоем j , выражается как

$$I(j) = \sum_{\theta_s=1}^9 L_{\text{эф}}(\theta_s, \theta_0) [\varphi_d(\theta_s, j) + \varphi_u(\theta_s, j+1)], \quad (1.7)$$

где $\varphi_d(\theta_s, j)$ — нисходящий поток радиации в слое j , распространяющийся в направлении θ_s ; $\varphi_u(\theta_s, j+1)$ — восходящий поток радиации, распространяющийся в направлении θ_s из слоя $j+1$.

Предположив, что все фитоэлементы в слое имеют одинаковую яркость независимо от угла наклона, в выражениях (1.3), (1.7) можно заменить $L_{\Phi}(\theta, \theta_{\Phi})$ на $L_{\Phi}(\theta)$:

$$L_{\Phi}(\theta) = L_s \sum_{\theta_{\Phi}=1}^9 g^*(\theta_{\Phi}) \tilde{G}(\theta, \theta_{\Phi}) / \sin \theta = L_s G(\theta) / \sin \theta. \quad (1.8)$$

Тогда конечные уравнения, описывающие перенос радиации в РП с произвольно ориентированными фитоэлементами при равенстве их спектральных коэффициентов отражения ρ и пропускания τ , принимают вид

$$\begin{aligned} \varphi_d(\theta_0, j+1) &= M(\theta_0) \varphi_d(\theta_0, j) + 0,5\sigma B_s(\theta_0) I(j), \\ \varphi_u(\theta_0, j) &= M(\theta_0) \varphi_u(\theta_0, j+1) + 0,5\sigma B_s(\theta_0) I(j), \end{aligned} \quad (1.9)$$

где $\sigma = \rho + \tau$.

Уравнение (1.9) решается при следующих граничных условиях. На верхней границе РП нисходящий поток равен суммарному потоку прямой и рассеянной радиации, поступающей от небосвода с заданным угловым распределением. На нижнем уровне происходит изотропное отражение радиации от поверхности почвы, имеющей коэффициент отражения ρ_* , т. е.

$$\varphi_u(\theta_0, m+1) = \rho_* B_u(\theta_0) \sum_{\theta_s=1}^9 \varphi_d(\theta_s, m+1). \quad (1.10)$$

СКЯ системы растительность—почва b_λ рассчитывается по формуле

$$b_\lambda = \varphi_u(\theta_0, 0) / B_u(\theta_0). \quad (1.11)$$

Вычисление b_λ проводится итерационным методом с учетом вышеприведенных граничных условий. Сначала система уравнений (1.9) решается для всех m слоев при $\sigma=0$ (листья абсолютно черные). Затем процедура повторяется, но с введением членов, описывающих рассеяние радиации фитоэлементами. Численные эксперименты, проведенные Гудрианом, показали, что для достижения сходимости при $\sigma=0,3$ достаточно двух циклов, при $\sigma=0,8$ число необходимых циклов возрастает до 5.

Выражения для восходящего и нисходящего потоков значительно усложняются, если $\rho \neq \tau$. В этом случае уравнения (1.9) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \varphi_d(\theta_0, j+1) &= M(\theta_0) \varphi_d(\theta_0, j) + B_s(\theta_0) \sum_{\theta_s=1}^9 L_{\Phi}(\theta_s) \{ \varphi_d(\theta_s, j) \times \\ &\quad \times [\rho(1-\xi) + \tau\xi] + \varphi_u(\theta_s, j-1) [\tau(1-\xi) + \rho\xi] \}, \\ \varphi_u(\theta_0, j) &= M(\theta_0) \varphi_u(\theta_0, j+1) + B_s(\theta_0) \sum_{\theta_s=1}^9 L_{\Phi}(\theta_s) \{ \varphi_d(\theta_s, j) \times \\ &\quad \times [\tau(1-\xi) + \rho\xi] + \varphi_u(\theta_s, j-1) [\rho(1-\xi) + \tau\xi] \}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где ξ — функция рассеяния фитоэлементов, имеющих угол наклона θ_{Φ} , которая зависит от угла падения радиации θ_s и направления рассеяния θ_0 .

Если $\theta_0, \theta_s > \theta_\phi$, то $\xi = 1$. При $\theta_0, \theta_s \rightarrow 0^\circ$, $\theta_\phi \rightarrow 90^\circ$ ξ принимает минимальное значение $-0,5$. Не останавливаясь на выводе выражений для ξ , который сделан в [99], приведем лишь окончательные формулы:

$$\xi(\theta_0, \theta_s, \theta_\phi) = \frac{\Psi_{\text{refl}}}{2\rho \tilde{G}(\theta_0, \theta_\phi) \tilde{G}(\theta_s, \theta_\phi)}, \quad (1.13)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{refl}} = & \frac{4}{2\pi^2} \{a_1(\pi^2 + 2a_c a'_c - \pi a_c - \pi a'_c) + \\ & + a_2 \sin a'_c (2a_c - \pi) + a_3 \sin a_c (2a'_c - \pi) + 2a_4 \sin a_c \sin a'_c\} \cos \theta_0; \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \sin \theta_s \sin \theta_0 \cos^2 \theta_\phi, \\ a_2 &= \sin \theta_s \cos \theta_0 \sin \theta_\phi \cos \theta_\phi, \\ a_3 &= \cos \theta_s \sin \theta_0 \sin \theta_\phi \cos \theta_\phi, \\ a_4 &= \cos \theta_s \cos \theta_0 \sin^2 \theta_\phi; \\ a_c &= \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{\text{tg } \theta_s}{\text{tg } \theta_\phi}\right) \text{ при } \theta_s < \theta_\phi, \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$a_c = \pi \text{ при } \theta_s \geq \theta_\phi. \quad (1.16)$$

Для α'_c справедливо выражение (1.16) с соответствующей заменой θ_s на θ_0 .

Таким образом, модель Гудриана позволяет рассчитать коэффициент яркости системы растительность—почва в заданном направлении визирования на основе следующих входных параметров:

1) условия освещения: соотношение прямой S_λ и рассеянной радиации D_λ в суммарном облучающем потоке; высота Солнца $h_\odot$; угловое распределение яркости небосвода $B_D(\theta_s)$;

2) структура РП: относительная площадь фитоэлементов L ; дифференциальная функция распределения угла наклона фитоэлементов $g^*(\theta_\phi)$;

3) оптические свойства отдельных фитоэлементов: спектральные коэффициенты отражения ρ и пропускания τ ;

4) оптические свойства почвы: спектральный коэффициент отражения ρ_s .

Так как в модели Гудриана предусмотрено одновременное вычисление искоемых радиационных характеристик для всех девяти зон верхней и нижней полусферы, то при проведении расчетов СКЯ угол визирования не задается. Для получения данных при конкретных условиях визирования выбирается номер зоны от 1 до 9, которая включает заданное значение θ_0 . Следовательно, модель Гудриана позволяет вводить θ_0 с точностью $\pm 5^\circ$. При этом учет азимута в расчетах не предусмотрен. Отсюда очевидно, что в модели заложено существенное ограничение в задании условий визирования, а значит, и угловая структура отраженной радиации не может быть описана адекватно разнообразным природным ситуациям.

Численные эксперименты на базе теоретических моделей целесообразно проводить, задавая при расчетах те значения входных параметров модели, которые соответствуют реально наблюдаемым в природе. Это нужно для того, чтобы теоретические зависимости максимально охватывали возможное природное разнообразие объектов и их состояний, и для того, чтобы при интерпретации полученных зависимостей можно было логично связывать их с конкретной природной ситуацией. Для обеспечения содержательной интерпретации теоретических зависимостей нами был проведен анализ причин пространственно-временной изменчивости входных параметров и систематизированы масштабы этой изменчивости. Кроме того, для параметров, описывающих в модели структуру РП, рассмотрены отдельные вопросы методики их измерений для посевов.

2.1. Оптические свойства отдельных фитоэлементов

2.1.1. Общие замечания

В качестве оптических свойств фитоэлементов в предположении, что фитоэлементы являются ламбертовскими рассеивателями, рассматриваются спектральный коэффициент отражения ρ_λ , спектральный коэффициент пропускания τ_λ и спектральный коэффициент рассеяния $\sigma_\lambda = \rho_\lambda + \tau_\lambda$.¹ При этом в модели не учитывается отдельно отражение от внешней поверхности листа (т. е. его кутикулярного слоя) и внутреннее отражение. Величина ρ_λ по аналогии со спектральным альбедо A_λ , определяемым при натурных измерениях отражения от подстилающей поверхности, находится как

$$\rho = F_\rho / F_0, \quad (2.1)$$

а величина τ — в виде

$$\tau = F_\tau / F_0, \quad (2.1a)$$

¹ В дальнейшем индекс λ при ρ_λ , τ_λ и σ_λ в тексте опускается.

где F_p , F_r — лучистый поток, соответственно отраженный и пропущенный фитоэлементом; F_0 — лучистый поток, падающий на фитоэлемент [32]. Величины ρ и τ обычно измеряют лабораторными спектрофотометрами, используя для ρ спектрофотометры со сферической насадкой. Иногда ρ измеряют наземными спектрофотометрами, выкладывая плотно фитоэлементы на черной подложке [44]. Совпадение измеренных различными способами значений ρ является удовлетворительным в случае матовых листьев, имеющих сферическую индикатрису, а также при использовании наземных приборов с углом зрения, достаточным для охвата большей части индикатрисы отражения.

2.1.2. Факторы, определяющие оптические свойства фитоэлементов

2.1.2.1. Характеристика общих тенденций

Фундаментальными исследованиями физиологов и биофизиков установлено, что основными факторами, определяющими оптические свойства фитоэлементов, являются содержание пигментов и воды в тканях фитоэлемента и его морфологическое строение [9, 34, 61, 62, 94, 96, 150 и др.]. Действие перечисленных факторов обуславливает селективность оптических свойств фитоэлементов по спектру.

Известно, что в *видимом диапазоне* ($\lambda=400\div700$ нм) рассеяние и поглощение излучения связано с наличием и концентрацией пигментов (в основном хлорофилла, каротиноидов, ксантофиллов и антоцианов). В результате селективного поглощения хлорофилла (обусловленного электронными переходами молекул хлорофилла вблизи линий поглощения магния) у зеленых растений формируется спектральная кривая отражения с двумя минимумами в синем и красном участках спектра и относительным максимумом в зеленой области. В синей области поглощение также определяется электронными переходами каротиноидовых пигментов, однако у зеленых листьев вклад этих пигментов перекрывается влиянием хлорофилла. На заключительных стадиях развития или при стрессовом состоянии растений происходит разрушение хлорофилла, растения приобретают желтую окраску в соответствии со спектром поглощения каротиноидов и ксантофиллов. При этом ρ становится монотонно возрастающей функцией λ . Антоцианы придают фитоэлементам красные оттенки и вызывают расширение области высоких значений ρ в оранжевый участок спектра при сглаживании минимума отражения в красной области (рис. 2.1) [61, 92, 93 и др.].

В *ближнем инфракрасном диапазоне* (БИК) ($\lambda=700\div1300$ нм и соответственно в зоне «БИК-плато» — $\lambda=750\div1300$ нм) рассеяние излучения определяется преимущественно внутренней структурой тканей. Коротковолновая граница БИК-диапазона зависит от границы поглощения хлорофилла в красной области видимого диапазона. Из-за незначительного поглощения излучения пигментами и водой в БИК-диапазоне при низкой вариабельности

по λ формируются максимальные значения ρ за счет многократного рассеяния в мезофильных тканях, которое в свою очередь объясняется различиями в показателях преломления межклеточных воздушных полостей и оболочек клеток. Неглубокие минимумы ρ отмечаются на $\lambda=950$ и 1160 нм в полосах поглощения воды. Кроме того, незначительное увеличение поглощения может быть следствием особенностей расположения клеток [61, 92, 94, 96 и др.].

В среднем инфракрасном (ИК) диапазоне ($\lambda=1300\div 2600$ нм) основным поглощающим компонентом является вода, содержащаяся в фитоэлементах. Соответственно на фоне высоких ρ на-

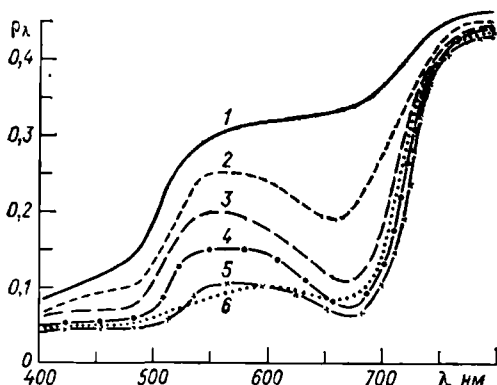


Рис. 2.1. Спектральные коэффициенты отражения ρ_λ листьев озимой пшеницы (сорт Лютеценс 6416) разного цвета.

Листья: 1) желтые; 2) зелено-желтые; 3) желто-зеленые; 4) светло-зеленые; 5) темно-зеленые; 6) зелено-желто-фиолетовые.

блюдается их снижение в полосах поглощения воды около 1430 , 1950 и 2600 нм [92, 150]. В дальнем ИК-диапазоне ($\lambda > 2600$ нм) фитоэлемент является почти черным телом, поглощая $96\text{--}98\%$ падающего излучения [92, 150].

Колебания содержания пигментов, обводненности, изменения кутикулярного слоя и в тканях фитоэлементов являются основными причинами природной изменчивости ρ и τ . Ниже эта изменчивость рассматривается только для видимого и БИК-диапазонов, для которых справедлива модель Гоудриана.

2.1.2.2. Количественная оценка влияния отдельных факторов на ρ

Влияние содержания хлорофилла. Установлено, что до 95% вариаций значений ρ в видимом диапазоне обусловлено изменением содержания хлорофилла [142]. Поэтому очевидна связь с этими изменениями сезонной динамики оптических свойств нормально развивающихся растений и большинства отклонений от нормы при стрессовых состояниях. Известна также роль хлорофилла и каротиноидов как фотосенсибилизаторов процесса фотосинтеза. Отсюда оценка связей между содержанием хлорофилла и ρ имеет практическое значение как для развития методик дистанционных измерений, так и для дальнейшей интерпретации дистанционных данных при исследовании продуктивности РП.

В листьях взрослых растений поверхностная плотность хлорофилла колеблется в широких пределах — от 0,8 до 10 мг/дм², однако у большинства видов в период активной вегетации содержится 2,0—3,8 мг/дм² [62]. В работах [9, 61, 62 и др.] было показано, что поглощение радиации возрастает при увеличении хлорофилла (ХЛ) до 2—3 мг/дм², следовательно, до этого предела ХЛ могут наблюдаться и основные изменения ρ .

Влияние ХЛ на ρ подробно изучалось нами на примере нормально развитых растений райграса итальянского. Экспериментальная часть работы выполнялась в Молдавии совместно с сотрудниками АН МолдССР. Образцы отбирались на двух опытных делянках райграса с разными сроками сева¹ и хранились в холодильной камере при температуре 4 °С, обернутые во влажную ткань. Такой способ хранения обеспечивает стабильность обводненности фитоэлементов и их оптических свойств. Параллельно со спектрофотометрированием² на Spesord-M40 для тех же образцов определялась поверхностная плотность пигментов (хлорофилла a , b и $a+b$, каротиноидов) в растворе ацетона по известным методикам. С каждой учетной площадки срезалось по 100 листьев и стеблей, из которых в зависимости от однородности РП бралась средняя проба в 3—6 повторностях как для определения пигментов, так и для измерений ρ . При анализе количественных зависимостей рассматривалась только поверхностная плотность хлорофилла $a+b$, так как между ХЛ _{$a+b$} и поверхностной плотностью каротиноидов была выявлена тесная линейная связь. Раздельный анализ для ХЛ _{a} и ХЛ _{b} также был нецелесообразен, поскольку в качестве отражательных характеристик рассматривались значения ρ для 550 и 670 нм.

Помимо указанных ρ , анализировались значения ρ для 800 нм и три комбинации: ρ_{670}/ρ_{550} , ρ_{800}/ρ_{670} и $(\rho_{800}/\rho_{670})\rho_{550}$. Первая из этих комбинаций характеризует выраженность минимума отражения в красной области по отношению к относительному максимуму в зеленой области, вторая — крутизну спектральной кривой при переходе в БИК-диапазон и третья — совокупное изменение по трем характерным точкам спектральной кривой отражения зеленого листа.

Обработка результатов проводилась с привлечением элементов информационного анализа. В том числе теснота связи между ХЛ и характеристиками отражения оценивалась по нормированному коэффициенту сопряженности K' :

$$K' = [2^{T(A, B)} - 1] / [2^{H_{\min}} - 1], \quad (2.2)$$

где $T(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$ — информационная мера связи в двухкомпонентной системе A, B , в битах; $H(A) = -\sum p(a_i) \log p(a_i)$, $H(B) = -\sum p(b_j) \log p(b_j)$ — энтропия (неопределенность) A и B соответственно; $p(a_i)$ и $p(b_j)$ — вероятности

¹ Автор опытов В. П. Дарий.

² Измерения ρ выполнены Е. Г. Абашиним для подготовленных нами проб.

состояний a_i и b_j ; $H(A, B) = -\sum \sum p(a_i b_j) \log p(a_i b_j)$ — совместная неопределенность распределений A и B ; $p(a_i b_j)$ — совместная вероятность комбинаций двух состояний из A и B ; $H_{\min}$ — минимальная неопределенность одного из состояний, в битах; $K=0$ при полной независимости A и B , $K=1$ в случае однозначного соответствия состояний A и B . Определение наиболее вероятного состояния a_i , характерного для конкретного состояния b_j , проводилось на основе критерия $c = p(a_i/b_j)/p(a_i)$ при значениях $c > 1$.¹

Результаты обработки показали, что при общем нелинейном характере связи между ХЛ и показателями отражения в красной

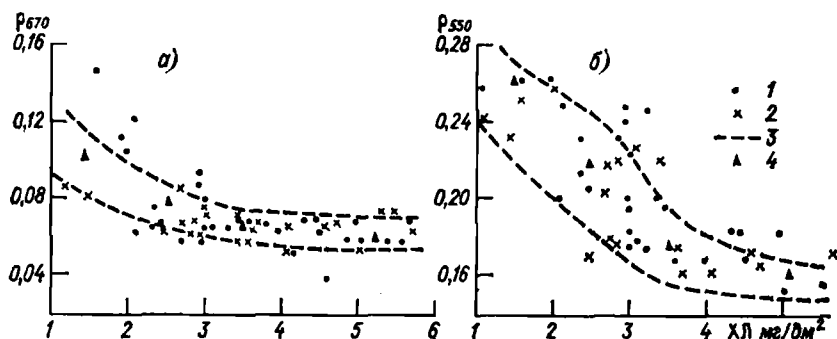


Рис. 2.2. Изменение ρ_λ листьев райграса итальянского в зависимости от поверхностной плотности хлорофилла.

а — красная область видимого диапазона, б — зеленая область; фенофазы: 1) 4—5-й лист, 2) цветение, 3) вероятные значения ρ_λ при $c > 1$, 4) наиболее вероятные значения ρ_λ при максимальных значениях c из совокупности $c > 1$.

области отмечается снижение ρ до значений $\text{ХЛ} = 2 \div 3 \text{ мг/дм}^2$ (рис. 2.2 а), в зеленой — до 4 мг/дм^2 (рис. 2.2 б). Для всей совокупности проанализированных образцов (70—80 средних проб) в интервале ХЛ от 1,1 до $6,2 \text{ мг/дм}^2$ коэффициенты вариации S_v в видимом диапазоне практически равны для узких участков спектра: для 550 нм $\bar{\rho} = 0,193$ и $S_v = 12,8 \%$, для 670 нм $\bar{\rho} = 0,066$ и $S_v = 10,6 \%$. Также близки значения K' для зеленой и красной областей видимого диапазона: 0,31 и 0,30 соответственно. Наиболее тесная зависимость выявлена между ХЛ и ρ_{670}/ρ_{550} ($K' = 0,40$). Комбинации, в которых использованы ρ_{800} , не несут дополнительной информации о ХЛ ($K' = 0,20$ для ρ_{800}/ρ_{670} и $K' = 0,29$ для $(\rho_{800}/\rho_{670})/\rho_{550}$) в силу низкой чувствительности ρ_{800} к ХЛ ($K' = 0,18$).

Полученные на примере райграса закономерности изменения ρ качественно хорошо согласуются с данными для других растений [9, 93, 142 и др.]. Однако интерпретация отражательных свойств в видимом диапазоне только как результата действия ХЛ

¹ Дано по С. Кульбах (1967 г.) и по Ю. Г. Пузаченко (1976 г.).

может быть осложнена по ряду объективных причин, в том числе из-за перекрытия спектров поглощения разных пигментов и форм собственно хлорофилла, влияния толщины листа, размеров клеток, обводненности на объемную концентрацию хлорофилла, а также вклада неселективного отражения от внешней поверхности листа и флуоресценции. Очевидно, что возможное действие этих дополнительных факторов сохраняется и в случае применения метода цветowych координат [30] для определения ХЛ.

Влияние внутренней структуры тканей фитоэлементов. В литературе имеются данные, согласно которым до 80 % инфракрасного излучения отражает мезофильная ткань, причем ρ и τ в БИК-диапазоне тесно связаны с диффузными свойствами клеточных стенок, расположением клеток в тканях и размерами межклеточных полостей в мезофилле. Морфологические факторы зависят от типа листьев (например, расположение клеток в значительной степени может рассматриваться как генетически обусловленный признак) и претерпевают закономерные изменения как в ходе онтогенеза, так и под воздействием условий произрастания.

Трудности методического характера, а также сложность самого механизма формирования многократного рассеяния объясняют незначительное число публикаций, посвященных количественному анализу влияния собственно внутренней структуры тканей фитоэлементов. В ряде работ, в том числе и в [93], установлен эффект роста ρ за счет увеличения межклеточного воздушного пространства в мезофилле зрелых листьев. Для стареющих листьев нормально развитых растений предполагается типичным некоторое снижение ρ в БИК-диапазоне. Но по данным [132], рост ρ наблюдался и при разрушении тканей мезофилла и образовании более компактных горизонтальных слоев на стадиях старения листьев. Кроме того, в [149] было показано, что инфильтрация маслом внутриклеточного пространства не привела к исчезновению различий в ρ в БИК-диапазоне.

В 1984 г. Н. Gausman опубликовал интересные результаты, которые свидетельствуют о различном влиянии на ρ в видимом диапазоне одного и того же фактора для световых и теневых листьев апельсинового дерева. Так, при меньшем на 6 % объеме воздуха в мезофилле теневых листьев по сравнению со световыми у последних (при компактном строении мезофилла) ρ положительно коррелирует с объемом воздушного пространства (особенно на $\lambda=450$ нм: $r=0,56$ при $P=0,01 \div 0,05$), а у теневых выявляется тенденция к отрицательной связи. Аналогично, при меньшей на 5,5 % обводненности ρ теневых листьев в зеленой области спектра растет при увеличении обводненности, а у световых эта связь практически отсутствует, но в синей области спектра у обоих типов листьев отмечается статистически достоверная отрицательная зависимость. Незначительные изменения толщины листа, которая влияет на ρ через изменение длины оптического пути в мезофильных тканях, привели к формированию для световых

листьев достоверной отрицательной связи в зеленой области (при сохранении обратной зависимости во всем видимом диапазоне), а для теневых, наоборот,—положительной в синей и красной областях спектра при отсутствии какой-либо зависимости в зеленой.

Хотя приведенные количественные оценки относятся к видимому диапазону, они подтверждают, во-первых, роль структуры тканей в определении ρ для этого диапазона, которая может быть опосредована через объемную концентрацию хлорофилла, и, во-вторых, сложности интерпретации воздействия морфоанатомических характеристик на оптические свойства растений в целом.

Влияние обводненности фитоэлементов. Так как при изменении обводненности фитоэлементов (ψ_f) происходят изменения в пигментном составе, объемной концентрации пигментов и во внутренней структуре тканей, спектральный отклик на ψ_f может наблюдаться и вне полос поглощения воды (см., например, приведенные выше данные). Существенное значение в сложном механизме воздействия ψ_f имеет характер соотношения между показателями преломления на границах неоднородностей (клетка—воздух, клетка—вода, вода—воздух).

Связь рассеяния и поглощения излучения в фитоэлементах с ψ_f определяется видовыми особенностями растений. Очевидно, что у ксероморфных видов, адаптированных к засушливым условиям, уровень ψ_f , при котором возможна реакция оптического аппарата на обезвоживание, значительно ниже, чем у мезофитов и тем более у суккулентов. Общими процессами, взаимосвязанно происходящими при снижении поступления влаги из почвы, являются повышение концентрации клеточного сока и осмотического давления, снижение гидратуры (обводненности цитоплазмы). В случае засухи при повышении осмотического давления выше оптимального для вида могут происходить необратимые изменения в цитоплазме и отмирание клеток. Если растение адаптировалось к засушливым условиям, то его морфоанатомическая структура может приобрести черты ксероморфности, в результате чего возрастет вклад отражения от поверхностного слоя, способствующий сглаживанию относительных минимумов ρ в видимой области спектра, при общем снижении ρ [62, 53]. Наряду с этим имеются данные о росте ρ в БИК- и ИК-диапазонах при увеличении содержания воздушно-газового компонента губчатой паренхимы, причем этот рост в случае водного стресса способствует защите растений от перегрева. Реакция пигментного аппарата также различна при летальном и нелетальном обезвоживании. Первое обычно сопровождается разрушением хлорофилла, при втором в результате адаптации растений на фоне активизации процесса синтеза белка и других процессов возможно накопление хлорофилла.

Противоречивость количественных оценок, очевидная из сопоставления опубликованных результатов, связана не только со сложностью механизма действия ψ_f , но и с методом определения спектрального отклика на изменение режима увлажнения. Ав-

торы, работавшие с высушенными образцами зеленых листьев, приходят к выводу о слабом влиянии ω_{ϕ} на ρ в видимом диапазоне [9, 32]. В то же время при измерениях ρ для листьев, взятых с растений при различных условиях увлажнения, зафиксированы относительные изменения ρ до 40—80 % [142, 149 и др.], которые в ряде случаев могут быть следствием разрушения хлорофилла в увядающих при низкой влажности растениях. Результаты, полученные с помощью имитационной методики, подтверждены опытами Т. Г. Слепцовой [52] на томатах, выращенных в условиях дефицита влаги (30 % ПВ) и нормального увлажнения (75 % ПВ), для варианта, когда листья имели равную ХЛ. Наблюдавшееся при этом относительное увеличение ρ в зеленой области спектра не превышало 12 %, снижение в красной области и в БИК-диапазоне — 5 %. В варианте, когда в листьях томатов при дефиците влаги ХЛ была в 2 раза выше, чем в контрольных растениях, отмечалось относительное снижение ρ в красной (32 %) и в зеленой (17 %) областях, т. е. тенденция изменения спектральной кривой отражения при дефиците влаги полностью определялась различиями в содержании хлорофилла.

Из этих же опытов следует, что характер относительных изменений значений комбинаций ρ в зеленой, красной областях и в БИК-диапазоне может быть более специфичным признаком режима ω_{ϕ} при разной ХЛ, чем собственно ρ . Так, для растений, выращенных в условиях дефицита влаги, при таком же содержании хлорофилла, как и в контрольном варианте, типично снижение значений ρ_{870}/ρ_{550} (до 15—20 %), увеличение $(\rho_{800}/\rho_{870}) \times \rho_{550}$ (до 12—15 %) и относительная стабильность ρ_{800}/ρ_{670} ; при большем содержании хлорофилла — увеличение значений всех трех комбинаций, особенно выраженное (до 50 %) для ρ_{800}/ρ_{670} .

В целом в литературе преобладают данные, указывающие на обратную зависимость ρ от ω_{ϕ} в видимом и БИК-диапазонах. Но из-за неполной информации об исследуемых растениях трудно в чистом виде выявить связь между ρ и ω_{ϕ} и соответственно систематизировать опубликованные данные. Можно полагать, что чем больше будет разница в ХЛ, тем сильнее должны проявляться различия в ρ фитоэлементов растений, выросших при разных режимах увлажнения.

В качестве одного из спектральных признаков дефицита влаги может использоваться длина волны «красного перепада» — максимального значения производной $\Delta\rho/\Delta\lambda$. На возможность применения этого признака указывают результаты, полученные для томатов, согласно которым максимальные значения $\Delta\rho/\Delta\lambda$ у контрольных растений отмечались при 700—710 нм, а у выращенных в засушливых условиях — при 710—720 нм¹. При этом положение спектральных зон было стабильным для листьев с ХЛ от 2,3 до 3,4 мг/дм², но сами значения $\Delta\rho/\Delta\lambda$ в целом имели тенденцию к снижению по мере увеличения содержания хлорофилла. Этот

¹ По неопубликованным данным Т. Г. Слепцовой.

результат свидетельствует также о том, что смещение «красного перепада» для листьев определяется более сложными механизмами, чем только процессы накопления и распада хлорофилла [53, 81, 131].

2.1.3. Внутривидовая изменчивость спектральных коэффициентов отражения

Пространственная и временная изменчивость ρ в пределах одного вида нормально развитых растений зависит от изменения рассмотренных выше общих факторов — пигментного аппарата, обводненности и морфоанатомической структуры.

2.1.3.1. Пространственная изменчивость

Изменения ρ можно рассматривать в пределах одного фитоэлемента, одного растения и монодоминантного сообщества.

В пределах одного листа колебания ρ обусловлены прежде всего неоднородным распределением пигментов, различия в поверхностной плотности которых могут достигать 200 % [9]. В частности, для листьев кукурузы и пшеницы в результате этих различий максимальное изменение ρ до 15—20 % отмечается в зеленой области спектра [9, 131]. Практически нет оценок вариабельности ρ в зависимости от различного характера жилкования и микрошероховатостей поверхности фитоэлементов, хотя можно ожидать, что эти причины должны в основном определять вклад поверхностной составляющей ρ .

При интерпретации дистанционных данных особый интерес представляют оценки возможных различий в ρ нижней (абаксиальной) и верхней, лицевой (адаксиальной) сторон листа, так как эти различия могут быть одной из причин колебаний b_d РП при ветре. Соотношение ρ для двух сторон листа зависит от строения покровных тканей, наличия опушения, воскового налета и его морфологии [32, 53, 62, 92, 93, 149]. В большинстве случаев ρ абаксиальной поверхности выше ρ адаксиальной, но сами значения ρ_v/ρ_n варьируют в зависимости от вида, сорта, стадии развития и условий произрастания. Общей закономерностью является также формирование максимальных различий в видимом диапазоне. Среди сельскохозяйственных культур выделяются гречиха, соя, картофель, рожь, у которых в видимом диапазоне верхняя сторона зеленого листа отражает на 40—50 % меньше, чем нижняя. Для листьев ячменя, пшеницы, кукурузы, райграсса наибольшие различия в ρ двух сторон составляют 10—20 %, а на отдельных фенофазах вообще отсутствуют [32, 96 и др.]. Возможны и ситуации, когда $\rho_v < \rho_n$ (табл. 2.1), что связано как с видовой спецификой строения поверхности листьев, так и с различиями в рассеивающих свойствах столчатой и губчатой паренхимы.

Изменение ρ в пределах других фитоэлементов исследовано слабо. По данным [32], максимальные различия в пределах одного стебля пшеницы, ржи отмечаются в красной области (до 5 раз) и объясняются пожелтением нижней части стеблей. В этой

Таблица 2.1

Относительные изменения ρ верхней и нижней сторон листьев райграса итальянского (ρ_2/ρ_1) в различные фенофазы

Фенофаза, цвет листьев	450 нм	550 нм	670 нм	800 нм
Здоровые листья				
4—5-й лист				
зеленые	1,10	1,10	1,02	0,98
светло-зеленые	1,14	1,23	1,00	1,00
желто-зеленые	1,11	1,11	0,95	0,99
Цветение				
зеленые	0,96	0,95	0,91	1,00
светло-зеленые	1,02	1,03	0,95	0,99
желто-зеленые	1,03	0,99	1,03	0,97
Листья, поврежденные бурой ржавчиной (4—5-й лист)				
Зеленые (<20 %)	1,22	1,17	1,10	0,97
Светло-зеленые (<20 %)	1,00	1,09	1,00	0,99
Светло-зеленые и желто-зеленые (>50 %)	0,96	1,00	0,73	1,02

Примечание. Для фенофазы 4—5-й лист в скобках дан процент повреждения поверхности листа.

же области видимого диапазона боковая поверхность колосьев (при горизонтальном их положении относительно щели спектрофотометра) отражает в 2 раза больше, чем верхняя. Понятно, что причиной этих различий является разная шероховатость, а их следствием может быть увеличение b_λ посевов при полегании или при ветре.

В пределах одного растения влияние общих механизмов на ρ проявляется через особенности онтогенеза растений, соотношение поверхностей световых и теневых листьев, а также поверхностей различных фракций.

Авторы, исследовавшие листья пшеницы, кукурузы, подсолнечника, конских бобов и огурцов, пришли к выводу о близости оптических свойств листьев разных ярусов (за исключением нижних, первых по появлению). Исходя из этого в первом приближении можно принять допущение об отсутствии вертикальных различий в ρ . При расчетах b_λ посевов максимальные ошибки за счет этого приближения возможны для зеленой области спектра, в которой изменения ρ листьев одного растения достигают 7—10 % [44]. Однако на примере световых и теневых листьев апельсинового дерева (см. 2.1.2.2) были выявлены более существенные расхождения в 20—40 %, но насколько эти оценки справедливы для травостоев, пока судить трудно из-за недостатка информации.

Также мало данных и об оптических свойствах других фракций растений, что объясняется несовершенством методик

лабораторных измерений для образцов с небольшой поверхностью или со сложной конфигурацией. В целом вид спектральной кривой отражения стеблей, колосьев, цветов соответствует типу пигментации, обводненности и структуры тканей [32, 44, 92]. Совсем нет данных о ρ остьев, хотя именно они могут определять фоновые значения $\bar{\rho}$ и b_λ сомкнутых посевов остистых злаков.

Из сопоставления приведенных ниже оценок $\bar{\rho}_{ст}/\bar{\rho}_\lambda$ зеленых растений райграса на фенофазе цветения следует, что при равных значениях ХЛ и w_ϕ различия в $\bar{\rho}$ существенно зависят от морфологии тканей разных фракций:

ХЛ мг/дм ²	450 нм	550 нм	670 нм
1,7	1,0	1,10	1,0
4,6	1,0	1,38	1,24
5,7	0,88	1,18	1,0

По средним оценкам [44], в период активной вегетации $\bar{\rho}$ стеблей ржи и пшеницы на 10—20 % выше $\bar{\rho}$ листьев, а в конкретных ситуациях превышения могут достигать 20—50 % [120]. На завершающих фенофазах эти различия возрастают до 20—47 % и сопоставимы с различиями между $\bar{\rho}$ обертки сухих и влажных желтых стеблей (рис. 2.3).

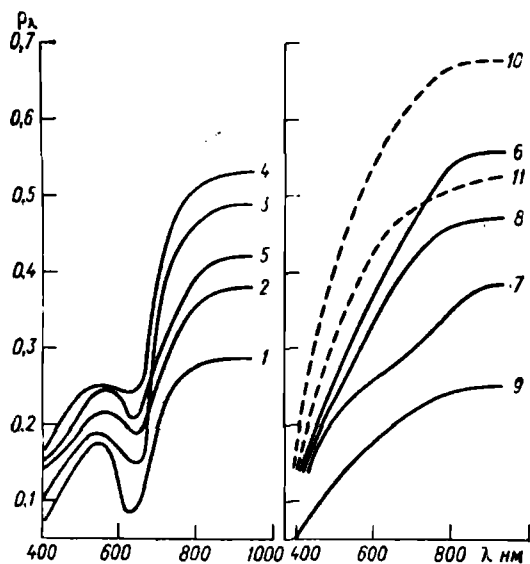


Рис. 2.3. Спектральные коэффициенты отражения ρ_λ листьев и стеблей озимой пшеницы Безостая 1.

Листья: 1) темно-зеленые, 2) светло-зеленые, 3) зелено-желтые (доля желтого цвета менее 50 %), 4) желто-зеленые (доля желтого цвета более 50 %), 5) зелено-бурые, пораженные (20—30 %), 6) ярко-желтые, сухие, 7) желто-бурые, сухие, 8) пораженные желтые с незначительным черным налетом; 9) пораженные желтые с сильным черным налетом; обертка: 10) сухого стебля ярко-желто-белесая, 11) влажного стебля желтая.

Понятно, что для дальнейшего перехода от $\bar{\rho}$ отдельных фитоэлементов к средневзвешенному значению $\bar{\rho}$ для отдельного растения необходимо иметь представление о соотношении поверхностей различных фракций, так как именно оно преимущественно

определяет изменчивость ρ одного растения во времени и при разных стрессах.

В монодоминантных сообществах изменчивость ρ одновозрастных зеленых листьев подробно исследована В. И. Рачуликом и М. В. Ситниковой на примере разнообразных сельскохозяйственных посевов [44]. По их данным при нормальных условиях увлажнения и минерального питания $C_{\nu\rho}$ составляет 4—12 % в широком интервале λ , уменьшаясь в БИК-диапазоне. На переходных фенофазах, когда в пределах РП листья имеют различные оттенки зеленого цвета, пространственная изменчивость ρ возрастает, особенно в красной области спектра (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Относительные изменения поверхностной плотности хлорофилла и средних значений коэффициентов спектрального отражения для листьев в посевах райграсса итальянского

Цвет листьев	Варианты	Хлорофилл			$\Delta\rho$ %		
		ср.	мин.	макс.	550 нм	670 нм	800 нм

А. Листья разного цвета на разных фенофазах

Зеленые—светло-зеленые	а	1,50	1,48	2,06	17	18	0
	б	1,69	1,93	1,77	24	52	—7
Зеленые—желто-зеленые	а	1,68	1,72	2,06	20	51	—7
	б	1,88	2,82	2,06	32	78	—14
Светло-зеленые—желто-зеленые	а	1,12	1,17	1,00	2	28	—7
	б	1,12	1,45	1,17	8	17	—8

Б. Листья одного цвета на разных фенофазах

Зеленые	а	4,9	3,1	6,2			
	б	0,85	1,00	1,00	0	0	0
Светло-зеленые	а	2,9	1,6	3,5			
	б	0,96	1,31	0,86	—9	28	—4
Желто-зеленые	а	2,6	1,1	3,0			
	б	0,96	1,64	1,00	—10	14	—9

Примечания. А. а — фенофаза 4—5-й лист, б — цветение; для каждой фенофазы в сравниваемой паре дано отношение ХЛ в листьях более зеленых к ХЛ в листьях менее зеленых; $\Delta\rho = (\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1) / \bar{\rho}_1$, где $\bar{\rho}_1$ и $\bar{\rho}_2$ — соответственно для листьев более зеленых и менее зеленых.

Б. а — ХЛ мг/дм² на фенофазе цветение, б — отношение ХЛ на фенофазе 4—5-й лист к ХЛ на фенофазе цветение; $\Delta\rho = (\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1) / \bar{\rho}_2$, где ρ_1 и ρ_2 — соответственно для фенофаз 4—5-й лист и цветение.

2.1.3.2. Временная изменчивость

С позиций дистанционной диагностики изменение ρ во времени для нормально развивающихся растений может рассматриваться за различные периоды — от суток до вегетационного периода в целом.

Суточная динамика ρ к настоящему времени изучена недостаточно. Имеются данные, свидетельствующие как о лабильности ρ листьев в течение суток (до 20 % в зеленой области спектра) [32 и др.], так и об их устойчивости при колебаниях ρ не более 7 % [9 и др.]. Очевидно, что для оценки высокочастотных колебаний ρ измерения необходимо проводить на одном листе без отрыва его от растения, а это условие при существующих методах измерений соблюсти практически невозможно.

Сезонная изменчивость ρ при нормальном развитии растений наиболее выражена на ранних и поздних этапах вегетации [9, 44, 61, 92, 132]. Начальные стадии вегетации характеризуются интенсивными процессами образования листовых пластинок, формирования тканей и биосинтеза пигментов. Этот динамичный период, длящийся 20—30 дней, сменяется фазой относительной стабилизации процессов. В период активной вегетации возможное увеличение ХЛ до 3—4 мг/дм² и более является предпосылкой формирования относительно устойчивых значений ρ (табл. 2.2). На заключительных этапах вегетации происходит резкое изменение оптических характеристик, вызванное разрушением хлорофилла, старением тканей и деградацией их структуры. При этом наибольшее увеличение ρ отмечается в красной области спектра (см. рис. 2.2). Однако в литературе количественные оценки ρ для завершающих фазофаз крайне ограничены. Представление о них дают полученные нами по [32, 44, 95 и др.] с привлечением собственных данных для райграса и пшеницы следующие средние значения относительных приращений $\bar{\rho}$ листьев при изменении их цвета от зеленого к желтому: на 550 нм — 40—50 %, 670 нм — 75—80 % и 750—800 нм — 5—15 %. С учетом изменения в течение вегетации фракционного состава $\Delta\bar{\rho}$ увеличивается, особенно в БИК-диапазоне, и в среднем для посевов пшеницы составляет: на 550 нм — 50—60 %, 670 нм — 75—85 % и 750—800 нм — 20—25 %.

2.1.4. Изменение спектральных коэффициентов отражения при аномальных и стрессовых явлениях

Аномальные и стрессовые явления могут проявляться как во времени, так и в пространстве. Несмотря на разнообразие причин, обуславливающих различные отклонения от нормального роста и развития растений, в конечном итоге значения ρ определяются рассмотренными выше ведущими факторами. Однако преобладающее действие какого-либо из основных факторов может быть специфично в зависимости от типа стресса, стадий поражения, устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды и резистентности к патогенам.

Возможный диапазон изменения ρ за счет ω_{ϕ} (например, при засухе, вымокании) был рассмотрен в 2.1.2.2. Поэтому ниже остановимся на изменчивости ρ при поражении растений и при различных геохимических условиях.

2.1.4.1. Фитопатологическое состояние растений

Аномальные явления — пораженность растений болезнями и поврежденность их вредителями — в случае массового распространения принимают характер стрессовых ситуаций. В целом процесс изменения оптических свойств пораженных растений достаточно сложен¹, при этом листовая диагностика существенно зависит от специфики фитопатогена. Так, например, при фитофторозе на листьях появляются бурые пятна неправильной формы, а в сырую погоду за счет усиления спороношения гриба-возбудителя — белый налет. При поражении вирусом табачной мозаики внешние проявления состоят в наличии светлых и темных зеленых пятен, скручивании пластинки листа, образовании папоротнико-видных и нитевидных листьев. Обычно еще до внешних признаков и до того, как пораженный лист бледнеет, происходит либо разрушение губчатого мезофилла, либо он пронизывается гифами гриба-возбудителя. Именно эти нарушения структуры влекут за собой при фитофторозе, полосчатой мозаике, поражении нематодами и т. п. снижение ρ в БИК- и ИК-диапазонах [134, 149, 150]. Однако спектральный отклик на фитопатологическое состояние зависит также от общего содержания и набора пигментных фондов, их фотохимической активности и от обводненности, поэтому изменения ρ могут наблюдаться и в видимом диапазоне.

Так, опыты Т. Г. Слепцовой [52] показали, что при поражении листьев томатов вирусом табачной мозаики (ВТМ) в случае равной ХЛ, независимо от условий увлажнения, ρ растет в зеленой и красной областях спектра, мало меняясь в БИК-диапазоне. Но при сохранении указанных тенденций в условиях дефицита влаги в середине вегетации, а на ее завершающих фенофазах при нормальном увлажнении различия между ρ здоровых и пораженных листьев существенно увеличиваются: если для зеленых листьев при нормальном увлажнении $\Delta\rho$ в красной области составляло 6 %, то при дефиците — уже 43 %, а для желтых листьев на фоне нормального увлажнения — 57 %. В случае различной ХЛ при фиксированных условиях увлажнения влияние содержания хлорофилла на спектральную кривую перекрывает воздействие ВТМ и значения $\Delta\rho$ в красной области у поврежденных листьев становятся на 25 % ниже, чем у здоровых. В целом наиболее чувствительной к ВТМ является красная область спектра, а также отношение ρ_{800}/ρ_{670} , причем знак последнего зависит от соотношения ХЛ в здоровых и поврежденных листьях.

Аналогично в случае поражения бурой ржавчиной зеленых листьев злаков максимальные изменения ρ наблюдаются в красной области видимого диапазона (табл. 2.3) при снижении ρ в БИК-диапазоне не более чем на 10 %.

¹ Основные тенденции, вызываемые фитопатогенами (на примере древесной растительности), можно проследить по работам Н. Г. Харина (1965 г. и др.), по публикации И. С. Кузнецовой (1984 г.).

Скан
страницы
отсутствует

Скан
страницы
отсутствует

Таблица 2.4

Листовая диагностика макро- и микроэлементов почвенного питания

Элемент	Внешние симптомы	
	при недостатке	при избытке
Азот	Бледная желтоватая окраска	Темно-зеленая окраска
Фосфор	Сероватая до темно-зеленой, синевато-зеленой или фиолетовая до красновато-бронзовой (особенно выражена у старых листьев)	
Калий	Опускаются края листьев; от краев и позднее по всей поверхности появляются желтоватые, переходящие в коричневатые пятна (некрозы); при этом листья не опадают	
Кальций	При значительном недостатке происходит скручивание краев листьев, появляются хлоротичные пятна	
Магний	Появляется пятнистый хлороз (подобный мозаичной болезни) желтоватых и бурых тонов, переходящий в некрозы	
Сера	Бледная желтоватая окраска	Красновато-коричневые тона; желтая, коричневатая и красноватая бугристость между главными жилками листа
Железо	Появляется «железный хлороз» — листья становятся желтоватыми и даже белыми (особенно молодые)	
Марганец	Появляются хлоротичные пятна между жилками, размер пятен зависит от жилкования	
Медь	Развивается хлороз	
Цинк	Листья деформируются, появляются хлоротичные пятна, листья приобретают частично бронзовый цвет и отмирают	
Молибден	Листья свертываются по краям, появляется хлороз (как и при недостатке меди, марганца, цинка и железа)	
Бор	Старые листья некротируются и свертываются по краям, становятся желтыми	

Так, у среднесолеустойчивых сортов томатов [52] при 0,3 %-ном хлоридном и 0,9 %-ном комплексном сульфатно-хлоридно-натриевом засолении резкое (на 30—40 %) снижение ХЛ по сравнению с контролем отмечалось в период бутонизации на 6—7-й день после внесения солей, а затем от цветения до конца плодоношения содержание хлорофилла превышало ХЛ в листьях контрольных растений. В зависимости от динамики ХЛ происходило изменение ρ и $\Delta\rho$. Для листьев томатов, выращенных в условиях солевого стресса, в период бутонизации максимальные значения $\Delta\bar{\rho}$ в зеленой области спектра достигали 70—90 %, в красной — 16—46 %, на более поздних фенофазах отмечалось снижение $\Delta\bar{\rho}$ по сравнению с контролем на 20—40 % в зеленой и на 18—28 % в красной области спектра. При этом $\Delta\bar{\rho}$ в БИК-диапазоне не превышало ± 5 %. В более общем случае, когда засоление вызывает разрушение хлорофилла, типично увеличение ρ , которое усиливается специфическими изменениями в покровных тканях. Для сравнительной оценки влияния засоления отметим, что диапазон возможных изменений ρ при хлорозе листьев в результате дефицита железа на щелочных почвах составляет примерно 30 % в зеленой и красной областях спектра, а при хлорозе на засоленных почвах (при засолении 0,4—1 %) в зеленой области 70—80 % [10]. По-видимому, при засолении, в отличие от других стрессовых явлений, имеют место наибольшие положительные или отрицательные отклонения в ρ для зеленой области видимого диапазона.

При интенсификации сельскохозяйственного производства внесение удобрений нивелирует природное разнообразие почвенных условий. Поэтому для культурных растений представляет особый интерес вопрос о воздействии различных удобрений на оптические свойства фитоэлементов. Анализ литературных материалов и результатов собственных измерений позволяет сделать следующие выводы о влиянии комплекса основных азотно-фосфорно-калийных (NPK) удобрений на ρ : 1) реакция отражательных характеристик листьев зависит от стадии фенологического развития, причем на ранних фенофазах наибольшие относительные изменения $\Delta\rho$ возможны при средних дозах удобрений, а на поздних — при средних и максимальных (табл. 2.5—2.6); 2) ρ наиболее чувствительны к виду и дозам удобрений в видимом диапазоне, особенно в его красной и зеленой областях (в отдельных экстремальных вариантах $\Delta\rho$ может достигать 70 %); 3) по мере увеличения содержания хлорофилла относительные изменения ρ снижаются (табл. 2.5); 4) недостаток удобрений влечет за собой возрастание ρ в видимом диапазоне в течение всех фенофаз, для БИК-диапазона возможно снижение на поздних фенофазах, 5) увеличение дозы фосфора в удобрениях способствует меньшему снижению ρ за счет действия фосфора как антагониста азота (избыток фосфора подавляет фотосинтез сильнее, чем недостаток, причем в последнем случае повышается содержание хлорофилла, но

Относительные изменения спектральных коэффициентов отражения зеленых листьев райграса итальянского в зависимости от дозы минеральных удобрений (аддасная сторона листьев)

Вариант опыта	Доза удобрений	Хлорофилл, мг/дм ² ; Δ %	ρ: Δρ %			$\frac{\rho_{\text{конт}}}{\rho_{\text{конт}}}$; Δ $\frac{\rho_{\text{конт}}}{\rho_{\text{конт}}}$ %
			550 нм	670 нм	800 нм	

Фенофаза 4—5-й лист

Контроль	Без удобрений	2,9	0,220	0,074	0,600	0,369
Среднее	$N_{120}P_{90}K_{45} + N_{90}$	52	-20	-16	-3	5
Максимум	$N_{180}P_{120}K_{60} + N_{90}$	41	-15	-7	-2	10
Минимум	$N_{90}P_{40}K_{30} + N_{30}$	10	-13	-17	1	-5

Фенофаза цветения

Контроль	Без удобрений	1,3	0,235	0,083	0,570	0,353
Среднее	$N_{120}P_{90}K_{45} + N_{90}$	223	-28	-22	5	8
Максимум	$N_{180}P_{120}K_{60} + N_{90}$	145	-32	-22	9	14
Минимум	$N_{90}P_{40}K_{30} + N_{30}$	162	-17	-19	5	-3

Примечание. Для контрольного варианта даны значения ХЛ, ρ и $\rho_{\text{конт}}/\rho_{\text{конт}}$ для вариантов с удобрениями — относительные характеристики ХЛ, ρ и $\rho_{\text{конт}}/\rho_{\text{конт}}$, полученные как разность между значениями при удобрениях и для контроля, нормированная к значению для контроля (Δ).

Таблица 2.6

Относительные изменения спектральных коэффициентов отражения адаксиальной стороны зеленых листьев райграса итальянского $\Delta\rho$ (%) за период 4—5-й лист — цветение

Вариант опыта (см. табл. 2.5)	Хлорофилл, Δ %	550 нм	670 нм	800 нм	$\Delta \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho_{\text{бел}}} \%$
Контроль	—55	7	12	—5	—4
Среднее	5	—4	5	4	9
Максимум	—22	—14	—6	6	9
Минимум	6	2	9	0	7

Примечание. Δ получены для каждого варианта как разность между значениями на фенофазах цветение и 4—5-й лист, нормированная к значениям на фенофазе 4—5-й лист.

растения отстают в росте, их общая структура становится «нежной»).

Таким образом, для индикации фона удобрений по ρ также информативным является видимый диапазон, но, в отличие от засоления, в равной степени зеленая и красная области (см. также I. Everit, A. Richardson, H. Gausman, 1985 г.). Диапазон возможных относительных изменений ρ при внесении комплекса NPK удобрений в зависимости от их дозы и времени внесения составляет 5—50 %, только N (от 0 до 224 кг/га) — 10—25 %.

2.1.5. Межвидовая изменчивость спектральных коэффициентов отражения листьев

Экспериментальные исследования показали относительную стабильность оптических параметров зеленых листьев большинства видов, которая обусловлена в основном спецификой поглощения хлорофиллом [9, 61, 62, 132 и др.]. Оптические свойства так называемого «среднего зеленого листа», описывающие универсальные спектральные характеристики растений, используются в большинстве работ по теории радиационного режима РП [46, 73, 99 и др.]. Максимальные различия в средних значениях ρ отмечаются между растениями принципиально разных местообитаний — мезофитами, ксерофитами и галофитами [10, 61]. Среди сельскохозяйственных видов преобладают мезофиты и ксеромезофиты, причем их рост и развитие дополнительно регулируются агротехническими мероприятиями. Вследствие этого межвидовая изменчивость ρ зеленых листьев культурных растений невелика (табл. 2.7), но выше внутривидовой для нормально развитых растений, особенно в БИК-диапазоне (см. 2.1.3.1).

Из данных табл. 2.8 очевидно, что диапазоны изменений ρ для видов перекрываются между собой. Однако по тенденциям

Таблица 2.7

Статистические оценки спектральных коэффициентов отражения зеленых листьев нормально развитых растений для группы из 20 сельскохозяйственных культур

Характеристика	Видимый диапазон		БИК-диапазон, 800 нм
	550 нм	650—670 нм	
$\bar{\rho}$	0,155	0,086	0,510
$\pm \sigma_{\rho} \%$	3,0	1,5	5,8
$C_{\sigma_{\rho}} \%$	19,6	17,4	11,3

Примечание. При расчетах использованы результаты собственных измерений и материалы из работ [32, 44, 73, 93—96, 119, 120, 149 и др.], а также отдельные данные из работ, которые не вошли в список литературы.

отклонения в целом спектральной кривой от спектральной кривой отражения «среднего зеленого листа» сельскохозяйственные виды четко подразделяются на 12 групп, различающихся по физиологическим особенностям растений (табл. 2.9).

Выполненная группировка видов по ρ в дальнейшем может быть использована для того, чтобы соотнести теоретические оценки b_d к посевам конкретных культур при исследованиях результатов численных экспериментов. Кроме того, группировка показала, что на основе комбинаций ρ появляется возможность идентификации культуры. Так, из схемы (рис. 2.4) следует, что

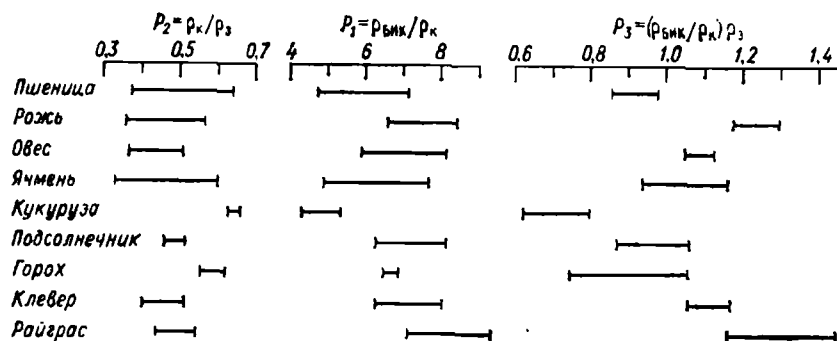


Рис. 2.4. Диапазоны изменения значений комбинаций спектральных коэффициентов отражения P_i зеленых листьев нормально развитых сельскохозяйственных растений.

использование комбинации ρ_k / ρ_3 позволяет по отражению зеленых листьев отличать: а) кукурузу от трав (клевера, райграса), гороха, подсолнечника, узколистных злаков (ржи, ячменя, овса); б) подсолнечник от гороха. Аналогично, отношение $\rho_{\text{БИК}} / \rho_k$ позволяет отличать кукурузу от трав (клевера, райграса)

Таблица 2.8

Коэффициенты спектрального отражения адаксиальной стороны зеленых листьев нормально развитых сельскохозяйственных растений (составлено по литературным данным [32, 44, 52, 94, 120 и др.])

Номер группы	Культура	550 нм ($\bar{\rho}=0,155$)			650—670 нм ($\bar{\rho}=0,086$)			780—800 нм ($\bar{\rho}=0,490$)		
		ρ	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$	ρ	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$	ρ	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$
1	Фасоль	0,185	0,154	0,186	0,107	0,085	0,108	0,564	0,466	0,588
2	Сорго	0,179	0,154	0,178	0,113	0,085	0,116	0,465	0,441	0,515
3	Хлопчатник	0,139	0,116	0,156	0,067	0,052	0,087	0,468	0,417	0,515
	Подсолнечник	0,138	0,109	0,171	0,068	0,052	0,087	0,482	0,417	0,539
4	Горох	0,133	0,116	0,156	0,077	0,073	0,087	0,552	0,466	0,588
5	Райграс	0,172	0,154	0,178	0,077	0,065	0,087	0,580	0,490	0,613
	Рожь	0,163	0,154	0,178	0,076	0,056	0,099	0,578	0,466	0,662
	Гречиха	0,157	0,132	0,182	0,077	0,056	0,103	0,502	0,441	0,564
6	Ячмень	0,173	0,154	0,194	0,083	0,052	0,116	0,474	0,392	0,564
	Сахарная свекла	0,173	0,154	0,194	0,067	0,065	0,103	0,468	0,417	0,515
7	Кукуруза	0,150	0,116	0,186	0,097	0,073	0,120	0,454	0,393	0,515
	Соя	0,135	0,109	0,156	0,087	0,069	0,108	0,468	0,392	0,539
7	Тыква	0,123	0,116	0,156	0,107	0,085	0,099	0,456	0,441	0,466
	Арбузы	0,145	0,132	0,156	0,099	0,085	0,099	0,464	0,441	0,466
8	Просо	0,167	0,154	0,178	0,072	0,065	0,087	0,488	0,441	0,539
9	Картофель	0,148	0,140	0,171	0,082	0,065	0,099	0,508	0,441	0,564
	Томаты	0,148	0,109	0,194	0,073	0,056	0,087	0,510	0,466	0,564
10	Овес	0,153	0,140	0,171	0,067	0,052	0,087	0,464	0,417	0,515
11	Клевер	0,154	0,140	0,171	0,075	0,056	0,087	0,489	0,441	0,539
12	Пшеница	0,160	0,138	0,186	0,086	0,052	0,120	0,458	0,368	0,564

Примечания. $\bar{\rho}$ — для «среднего зеленого листа» сельскохозяйственных растений; ρ — среднее значение для культуры; $\rho_{\min}$ и $\rho_{\max}$ — минимальное и максимальное значения для культуры.

Таблица 2.9

Группировка тенденций отклонений ρ зеленых листьев от $\bar{\rho}$ «среднего зеленого листа» для нормально развитых сельскохозяйственных растений (%)

Номер группы	Общая тенденция (доминирующие отклонения)	350 нм		650—670 нм		750—800 нм		Культура
		— $\Delta\rho$	+ $\Delta\rho$	— $\Delta\rho$	+ $\Delta\rho$	— $\Delta\rho$	+ $\Delta\rho$	
1	550, 650—670, 750—800 нм — положительные	<5	16—20	<5	21—25	<5	16—20	Фасоль
2	550, 650—670 нм — положительные, 750—800 нм — отрицательные	<5	11—15	<5	31—35	6—10	<5	Сорго
3	550, 650—670, 750—800 нм — отрицательные	21—25 26—30 21—25	<5 6—10 <5	36—40 36—40 11—15	<5 <5 <5	11—25 11—25 <5	<5 6—10 16—10	Хлопчатник Подсолнечник Горох
4	550, 650—670 нм — отрицательные, 750—800 нм — положительные	<5 <5	11—15 11—15	21—25 31—35	<5 11—15	<5 <5	21—25 31—35	Райграс Рожь
5	550, 750—800 нм — положительные, 650—670 нм — отрицательные	11—15 <5	16—20 21—25	31—33 21—25	16—20 32—35	6—10 16—20	11—15 11—15	Гречиха Сахарная свекла Ячмень
6	550 нм — положительные, 650—670, 750—800 нм — отрицательные	<5 <5	21—25 21—25	16—20 36—40	11—15 11—15	6—10 6—10	<5 <5	Арбуз Тыква
7	550, 750—800 нм — отрицательные, 650—670 нм — положительные	11—15 21—25 26—30 21—25 <5	<5 <5 <5 16—20 16—20	11—15 21—25 21—25 11—15 21—25	16—20 36—40 <5	6—10 16—20 6—10	<5 <5 6—10	Соя Кукуруза Просо
8	550 нм — положительные, 650—670 нм — отрицательные, 750—800 нм — симметричные	6—10 26—30	6—10 21—25	21—25 31—35	11—15 <5	6—10 <5	11—15 11—15	Картофель Томаты
9	550 нм — симметричные, 650—670 нм — отрицательные, 750—800 нм — положительные	6—10 26—30	6—10 21—25	21—25 31—35	11—15 <5	6—10 <5	11—15 11—15	Овес
10	550 нм — симметричные, 650—670, 750—800 нм — отрицательные	6—10	6—10	36—40	<5	11—25	<5	Клевер
11	550, 750—800 нм — симметричные, 650—670 нм — отрицательные	6—10	6—10	31—35	<5	6—10	6—10	Пшеница
12	550 нм — положительные, 650—670, 750—800 нм — симметричные	11—15	16—20	36—40	36—40	6—10	6—10	

подсолнечника, узколистных злаков (ржи, овса); комбинация ($\rho_{\text{БИК}}/\rho_{\text{К}}$) ρ_3 позволяет отличать: а) кукурузу от трав (клевера, райграса), подсолнечника, узколистных злаков (ржи, овса, ячменя, пшеницы), б) подсолнечник от трав (клевера, райграса), узколистных злаков (ржи, овса, пшеницы), в) горох от трав (клевера, райграса), узколистных злаков (ржи, пшеницы), г) пшеницу от других узколистных злаков (ржи, овса), кукурузы, трав (клевера, райграса), д) рожь от овса, пшеницы, кукурузы, подсолнечника, гороха и клевера.

Таким образом, очевидна потенциальная информативность сложной комбинации ρ в трех участках спектра для распознавания видов в период активной вегетации. Но насколько эта возможность реализуема на уровне посева, зависит от специфики структуры РП, образуемого различными видами.

2.1.6. Соотношение между спектральными коэффициентами отражения и пропускания фитоэлементов

Соотношение между ρ и τ во многом зависит от структуры фитоэлемента, характеристики которой наряду с $\omega_{\text{ф}}$ определяют длину оптического пути и рассеяние излучения внутри фитоэлемента, а также вклад поверхностного отражения [9, 61, 92]. В силу этого величина τ/ρ может рассматриваться и как показатель ксероморфности и мезофильности растений [61].

В БИК-диапазоне для зеленых листьев большинства сельскохозяйственных растений выполняется условие $\rho/\tau \approx 1$ (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Отношение τ/ρ для зеленых листьев нормально развитых сельскохозяйственных растений (рассчитано по литературным данным)

Культура, фенофаза [96, 120]	τ/ρ			Культура, фенофаза [44]	τ/ρ		
	550 нм	650— 670 нм	750— 800 нм		550 нм	650— 670 нм	750— 800 нм
Пшеница	0,43	0,09	0,84	Пшеница, К	0,77	0,26	0,95
Пшеница, * К	0,23	0,15	0,72	Ячмень, К	0,70	1,39	0,95
Кукуруза	0,61	0,75	1,09	Кукуруза, ВМ	0,85	0,10	0,98
Хлопчатник	1,11	0,55	1,04	Хлопчатник, Цв	0,72	0,05	0,87
Подсолнечник	0,83	0,60	1,02	Подсолнечник, Цв	0,67	0,05	0,91
Томаты	0,50	0,10	0,90	Картофель, Цв	0,62	0,15	0,77
Сорго	0,52	0,18	1,04	Просо, ВМ	0,50	0,21	0,76
Фасоль	0,58	0,34	0,74	Овес, К	0,57	0,05	0,79
Соя	1,19	0,68	1,10	Клевер, Цв	0,61	0,05	0,81
Тыква	0,75	0,53	1,05	Сахарная свекла, ЗМ	0,81	0,16	1,00
				Гречиха, Цв	0,91	0,05	0,85

Примечания: 1. Фазы: К — колошение, ВМ — выметывание метелки, Цв — цветение, ЗМ — закрытие междурядий. 2. τ/ρ для среднего зеленого листа равно 0,77 (550 нм), 0,27 (650—670 нм) и 1,00 (750—800 нм). 3. Звездочкой (*) отмечена пшеница яровая короткостебельная, мексиканского типа.

В зеленой области видимого диапазона τ/ρ изменяется от 0,23 до 1,19 и перекрывает интервал значений τ/ρ от 0,94 до 1,22, типичный для естественной растительности [61]. В красной области спектра листья малопрозрачны ($\rho \gg \tau$) и τ/ρ варьирует в широких пределах. Причем в этой области отмечаются также существенные различия в значениях τ/ρ (табл. 2.10), полученных разными авторами для хлопчатника, кукурузы и подсолнечника, которые скорее всего связаны либо с сортовыми особенностями, либо с фенологией. Но для выяснения истинной причины этих расхождений недостаточно дополнительной информации об объектах, которая приведена в использованных нами источниках.

Значения τ/ρ не вполне согласуются с группами растений по ρ (см. табл. 2.9), что свидетельствует о разных механизмах, доминирующих в определении ρ и τ . Четко выделяются только растения групп 8—12, у которых листья менее прозрачны по сравнению со «средним зеленым листом». Специфичны также листья ячменя — наиболее прозрачные из всей совокупности рассмотренных растений в красной области спектра.

В целом влияние условий произрастания на τ и τ/ρ изучено слабо. Имеются отдельные данные (в том числе Е. А. Бурикова и др., 1980 г.), из которых следует, что в зеленой области спектра при росте ω_ϕ возможно увеличение τ и снижение ρ , причем масштаб изменения $\tau/\rho(\omega_\phi)$ зависит от видовых особенностей растений.

Разумеется, что при расчете средневзвешенного для РП значения $\bar{\tau}$ необходимо через фракционный состав растительности учитывать вклад непрозрачных фитоэлементов, для которых $\tau=0$, — стеблей, колосьев, початков и т. п.

* * *

В заключение этого раздела подчеркнем следующие основные моменты: 1) межвидовая изменчивость ρ фитоэлементов превосходит внутривидовую; 2) наибольшее внутривидовое изменение ρ в видимом диапазоне связано с фенологическим состоянием растений; 3) на фиксированном этапе онтогенеза внутри- и межвидовая изменчивость ρ определяется почвенными условиями, режимом увлажнения и фитопатологическим состоянием растений (количественные оценки масштабов изменчивости см. выше), причем воздействие перечисленных факторов на ρ опосредуется в основном через изменения пигментации; 4) действие любого фактора, вызывающего колебания содержания пигментов, проявляется в диапазоне поверхностной плотности хлорофилла менее 3—4 мг/дм²; зависимость между хлорофиллом и ρ в зеленой и красной областях спектра обратная; 5) наименьший масштаб изменения ρ листьев сельскохозяйственных растений и трав характерен для БИК-диапазона; 6) комбинация ρ в красной, зеленой областях видимого диапазона и в БИК-диапазоне позволяет лучше разделять виды по сравнению с ρ для отдельных участков спектра; 7) в видимом диапазоне отмечается значительная изменчивость

τ/ρ для листьев в зависимости от вида, сорта и условий произрастания; в БИК-диапазоне листья нормально развитых растений можно считать полупрозрачными; 8) характеристики ρ и τ/ρ для «среднего зеленого листа» не отражают всего диапазона значений этих параметров, наблюдаемых природе.

В целом, несмотря на длительную историю изучения спектральных свойств отдельных растений и обширную литературу по этому вопросу, до сих пор не хватает количественных оценок для конечной систематизации и составления каталога ρ и τ хотя бы для какой-либо культуры или для регионального набора культур и сортов. По-видимому, такое положение связано с тем, что исследования оптических свойств фитоэлементов ведутся по узким целевым программам без должной общей координации. На наш взгляд, необходимо продолжение фундаментальных исследований для более полного понимания закономерностей формирования спектрального образа РП в разнообразных природных ситуациях. Учитывая перспективы дистанционного зондирования, необходимо также расширить исследования поляризационных свойств растений, флуоресценции и индикатрис отражения.

2.2. Отражательные свойства почв

В уравнениях (1.9) — (1.12) модели Гоудриана, как и в других моделях подобного класса, отражение почвы вводится через сферический коэффициент спектрального отражения ρ_s , который определяется аналогично ρ (2.1). Предполагается, что почва является ламбертовским рассеивателем и значения ρ_s не зависят от направления падения солнечных лучей и визирования.

Сложность строения почвы, а также многообразие процессов, протекающих в ходе взаимодействия излучения с отдельными компонентами почвы, затрудняют теоретическое описание зависимостей между отражательной способностью и физико-химическими параметрами почвы. В силу этих причин при изучении отражения почв преобладает эмпирический подход [10, 43, 44, 53, 56, 60, 72, 105, 135, 136 и др.], а имеющиеся теоретические разработки относятся к оценке шероховатости поверхности [30, 106 и др.]. Учитывая хорошую освещенность вопроса, ниже излагаем только принципиальные его аспекты, в той мере, в какой они существенны для понимания закономерностей и обоснования выбора значений ρ_s для численных экспериментов.

2.2.1. Характеристика общих тенденций

Известно, что отражательные свойства почвы зависят от ее химического состава, физического состояния, условий освещения и визирования. Влияние химического состава определяется совместным действием гумуса, соединений железа и различных солей, физического состояния — текстуры, структуры и влажности почвы,

условий освещения — анизотропией нисходящего и восходящего потоков излучения.

Между содержанием гумуса и ρ_s (и/или b_s) существует тесная обратная зависимость, которая может быть аппроксимирована экспоненциальным уравнением. Наибольший оптический эффект вызывает изменение гумуса в почвах с малым его содержанием — до 3 %, а наиболее информативной областью для распознавания гумуса является интервал 520—620 нм. К настоящему времени количественные зависимости установлены не для всего набора почв даже зонально-генетического ряда, но ясно, что значения эмпирических коэффициентов в аппроксимирующем уравнении характеризуются большей устойчивостью для почв с относительно постоянным составом минеральной части.

Соединения железа, встречающиеся в почве, различаются между собой по степени окисленности и гидратированности ионов железа. С присутствием железа и соответственно с электронным процессом переноса зарядов в системе Fe—O связано характерное в целом для почв увеличение отражательной способности с λ в оптическом диапазоне. При наличии закисных форм железа Fe_3O_4 возможны более низкие значения ρ_s во всем рассматриваемом спектральном диапазоне, а также слабый максимум в синезеленой области. Спектральная кривая окиси железа Fe_2O_3 имеет типичный перегиб в интервале 500—580 нм, причем при переходе от высокогидратированных к малогидратированным окислам происходит смещение максимума отражения от 500—540 нм к 550—580 (600) нм. В целом обратная зависимость ρ_s и/или b_s от валового железа существенно затрудняет интерпретацию отражательной способности только как функции содержания гумуса.

Наличие солей в почве сопровождается повышением ρ_s (и/или b_s) во всем оптическом диапазоне. Влияние труднорастворимых солей (гипсов, карбонатов) наиболее стабильно при разных режимах увлажнения, влияние легкорастворимых (сульфатных, сульфатно-хлоридных, хлоридных) в большей степени зависит от влажности почв и их гумусированности. При фиксированных значениях двух последних параметров ρ_s возрастает для очень слабо- и слабогумусированных почв при концентрации легкорастворимых солей 2—1 %, а для мало- и среднегумусированных — при концентрации выше 1—0,5 %.

Влияние текстуры почвы проявляется через обратную связь между ρ_s и размерами почвенных частиц, которая, независимо от λ , описывается экспоненциальным законом. В результате действия текстуры на рассеяние излучения почвы легкого механического состава характеризуются более низкими ρ_s по сравнению с почвами тяжелого механического состава.

При анализе влияния структуры (шероховатости) почвы оперируют уже не с величиной ρ_s , а с b_s , которая имеет тенденцию к снижению по мере увеличения размеров макроагрегатов. Однако количественные оценки влияния степени шероховатости существенно зависят от соотношения между размерами макроагре-

готов и мгновенного поля зрения приборов. Согласно литературным данным, наибольшие различия в b_s при визировании в надир отмечаются для плотной необработанной и вспаханной почвы (независимо от вида обработки последней). В случае образования на поверхности почвы корки происходит резкое увеличение b_s за счет снижения площади теней и скопления в поверхностном горизонте почвы «отмытых» частиц, имеющих высокие ρ_s . Варьирование b_s при разной обработке существенно уменьшается как для влажных, так и для темных сухих почв.

Увлажнение почвы ведет к снижению ρ_s и b_s во всем оптическом диапазоне. Основная причина этого заключается в том, что показатель преломления минерального вещества относительно воды меньше показателя преломления относительно воздуха. Соответственно, во-первых, уменьшается по закону Френеля количество рассеянной радиации и, во-вторых, увеличивается количество поглощенной, так как лучи глубже проникают во влажную почву в силу ее большей оптической однородности. Диапазон влажности почвы w_s (%), в котором отмечаются максимальные изменения ρ_s , зависит от текстуры:

Супеси	Легкие суглинки	Тяжелые суглинки	Глины	Перегнойно-глеевые почвы
0—3	0,4—10	2—12	4—25	7—30

причем минимальные значения w_s равны примерно гигроскопической влажности при данном механическом составе почв, а максимальные — полной влагоемкости. Насыщение почвы влагой выше полной влагоемкости приводит либо к стабилизации характеристик отражения, либо к их увеличению во всем оптическом диапазоне, что в свою очередь обусловлено уменьшением шероховатости и появлением водяной пленки. Экспериментально также установлена меньшая по сравнению с сухими почвами вариабельность значений ρ_s для влажных почв.

Тенденции дневного хода b_s главным образом определяются степенью анизотропии отраженного потока, которая зависит от размеров, форм и упорядоченности пространственного размещения структурных неоднородностей. Отсутствие дневного хода возможно для поверхности почвы с индикатрисой, близкой к сферической (например, боронованная или необработанная почва). При наличии блестящей сухой корки или водяной пленки формируются индикатрисы с выраженной зеркальной составляющей. Свежевспаханная почва характеризуется вытянутостью индикатрисы в направлении обратного рассеяния (эффект *hot spot*), которая возрастает с уменьшением h_0 . Понятно, что чем больше выражено отклонение индикатрисы от сферической, тем меньше доля радиации, отраженной в направлении надира. Поэтому, помимо объективных причин, амплитуда дневного хода b_s находится

в обратной зависимости от угла зрения прибора и эта зависимость должна учитываться при сопоставлении литературных данных. Очевидно также, что увеличение доли рассеянной радиации в облучающем потоке сглаживает все угловые эффекты и способствует нивелированию дневной изменчивости b_s . Кроме того, не выявлено какой-либо зависимости амплитуды b_s от λ в диапазоне 450—800 нм.

2.2.2. Спектральные отражательные характеристики почв

Каждый генетический тип почвы обладает присущей ему совокупностью физико-химических свойств, которая формируется под воздействием почвеннообразовательных процессов, специфичных для разных физико-географических зон. Следовательно, рассмотренные выше тенденции изменения отражения под влиянием различных факторов определяют спектральный образ отдельных типов почв. Однако обусловленность отражательной способности поверхностного слоя процессами, происходящими в более глубоких почвенных горизонтах, справедлива только для сформировавшихся почв. Для несформировавшихся почв, а также там, где выражены современные аллювиальные процессы, отражение в оптическом диапазоне мало информативно для характеристики и распознавания типа почв.

Для того чтобы выявить собственно характеристику типа (подтипа, вида, разновидностей и т. п.) сформировавшихся почв, целесообразно использовать значения ρ_s для почв в воздушно-сухом состоянии. Но, несмотря на обширный экспериментальный материал по отражению почв, к настоящему времени систематизированные данные и результаты формализованной классификации почв опубликованы только американскими исследователями [135]. Отсутствие у нас подобных обобщающих работ главным образом связано с теми же причинами, на которые указывалось выше при рассмотрении ρ . Разнокачественный материал, неполное описание почв, разные объемы выборок и т. д. не позволяют систематизировать опубликованные данные в соответствии с иерархией почвенных единиц даже на примере одного какого-либо типа почв или выполнить статистический анализ для выявления достоверных признаков на уровне типов. Поэтому на настоящий момент реально классификация лишь по принципу «от — до», подобно тому, как это было сделано в [55] по ρ_s для типов и подтипов почв Европейской части СССР (ЕЧС) и Прикаспийской низменности. При таком подходе появление новых материалов неизбежно сопровождается пересмотром выделенных ранее групп. Наглядным примером является табл. 2.11, в основу которой положена аналогичная таблица из [55]. Основные отличия классификации (табл. 2.11) от исходной связаны с увеличением изменчивости ρ_s для подтипов дерново-подзолистых почв Украины [30]. Последние выделяются в отдельную группу с широким интервалом значений ρ_s , перекрывающим ρ_s для большей части групп почв. Воз-

можно, что такая изменчивость ρ_s есть результат не только колебаний содержания гумуса, но и разнообразного механического состава исследованных в [30] дерново-подзолистых почв.

Из табл. 2.11 видно, что для зональных типов и подтипов ρ_s увеличивается в северном и южном направлениях от почв лесостепной и степной зон. В диапазоне 500—600 нм в группу с $\rho_s < 0,06$ объединены азональные типы почв, формирующиеся в гидроморфных условиях и обогащенные органическим веществом; в группу с $\rho_s = 0,06 \div 0,12$ объединены зональные типы и подтипы почв, богатые органическими соединениями, причем наибольшие значения ρ_s соответствуют каштановым почвам с повышенным содержанием фульвокислот, для которых характерен относительно

Таблица 2.11

Классификация почв ЕЧС и Прикаспийской низменности по их отражательным свойствам (составлено по [30, 55])

Типы и подтипы почв	ρ_s	Типы и подтипы почв	ρ_s
500—600 нм		700—800 нм	
Аллювиально-луговые Торфяно-глеевые	$< 0,06$	Аллювиально-луговые Торфяно-глеевые Черноземы типичные Черноземы обыкновенные Черноземы южные Темно-каштановые Темно-серые лесные	$\leq 0,12$
Черноземы типичные Черноземы обыкновенные Черноземы южные Темно-каштановые Каштановые Темно-серые лесные	$0,06—0,12$	Каштановые Серые лесные Светло-серые лесные Солонцы Пустынно-песчаные	$0,12—0,22$
Светло-каштановые Светло-серые лесные Солонцы Дерново-слабо- и сред- неподзолистые Пустынно-песчаные	$0,11—0,22$	Солоди Подзолисто-глеевые Солончаки	$0,22—0,28$
Солоди Подзолисто-глеевые Дерново-сильнеподзоли- стые Солончаки	$0,19—0,25$	Светло-каштановые Дерново-сильнеподзоли- стые	$0,28—0,35$
Бурые пустынно-степные Солончаки	$> 0,25$	Бурые пустынно-степные Солончаки	$> 0,35$
Дерново-подзолистые Дерново-глеевые	$0,11—0,37$	Дерново-подзолистые Дерново-слабо- и сред- неподзолистые Дерново-глеевые	$0,14—0,45$ $0,15—0,34$ $0,31—0,44$

резкий подъем ρ_s в оранжево-красной области спектра. Группу с $\rho_s=0,11\div 0,22$ составляют зональные почвы и один интразональный тип (солонцы) с меньшим содержанием гумуса при прева-лировании в нем фульвокислот, которые дают близкий оптический эффект с засолением, характеризующимся максимумом отраже-ния в желтой области спектра. В группу с $\rho_s=0,19\div 0,25$ объеди-нены зональные и интразональные почвы с малым содержанием гумуса, причем доминирование фульвокислот, а также наличие закисного железа (глеевые почвы) и засоления способствуют по-вышению ρ_s в областях спектра от голубой и зеленой до oran-жево-красной. Группу $\rho_s>0,25$ составляют зональные почвы с рез-ким недостатком гумуса, обогащенные известью при возможном различном засолении, а также интразональные почвы (солончаки) при сильной концентрации солей в поверхностном слое. Отдельно выделены дерново-подзолистые и дерново-глеевые почвы с широ-ким интервалом значений ρ_s . Некоторая перегруппировка почв в БИК-диапазоне обусловлена спецификой изменения ρ_s по спек-тру, причем, согласно [136], наиболее крутой подъем кривой в диапазоне 500—800 нм возможен для почв с низким содержа-нием органических веществ и со средним или повышенным содер-жанием железа; меньше всего этот подъем выражен у почв с вы-соким содержанием органических веществ и умеренно тонкой текстурой.

Таблица 2.12

Относительные изменения спектрального коэффициента отражения почв $\Delta\rho_s$ (%) различных таксономических уровней (составлено по литературным данным)

Таксономические единицы	Почвы	550 нм	650 нм	750 нм
Тип	См. табл. 2.11	70	85	80
Подтип	Дерново-подзолистые	65	70	66
	Серые лесные	41	52	50
	Черноземы	32	36	27
	Каштановые	30	29	24
Разновидность	Дерново-подзолистые	26	84	66
	Дерново-среднеподзолистые	41	50	46
	Дерново-слабоподзолистые	43	50	50
	Серые лесные	37	44	40
	Темно-серые лесные	3	8	2
	Черноземы типичные	32	36	27
	Черноземы обыкновенные	15	11	20
	Черноземы южные	9	16	9
	Темно-каштановые	9	9	9
Род	Дерново-подзолистые легкосуглинистые	50	50	49

Примечание. $\Delta\rho_s=(\rho_{s1}-\rho_{s2})/\rho_{s1}$, где ρ_{s1} — максимальное, а ρ_{s2} — минимальное значения для почв, рассмотренных в каждой конкретной группе.

В целом в видимом и БИК-диапазонах относительные изменения осредненных значений $\bar{\rho}$, между экстремальными вариантами типов почв зонального ряда составляют 70—85 %. Для более низких таксономических единиц отмечается тенденция к снижению $\Delta\bar{\rho}$, однако сами значения $\Delta\rho$ зависят как от возможной изменчивости отражательных свойств конкретной почвы, так и от представительности выборок (табл. 2.12). Очевидно также, что в переходных физико-географических зонах при развитии засоления, оглеенности, эрозии и т. п. пространственная мозаичность почвенного покрова может вызвать значительные изменения ρ , почв в воздушно-сухом состоянии даже в пределах одного поля. Так, например, при уменьшении гумуса в 2 раза и повышении CaCO_3 более чем в 10 раз отражение сильноэродированных черноземов, типичных в области 440—750 нм, в 2 раза выше по сравнению с неэродированными [4], т. е. $\Delta\rho$ в этом случае соизмеримы с $\Delta\bar{\rho}$ для типов почв.

Из сравнения данных табл. 2.12 и 2.13 следует, что изменение состояния конкретной почвы и условий освещения может

Таблица 2.13

Относительное изменение отражательных характеристик почв для фиксированного генетического типа почв (составлено по литературным данным)

Переменные параметры	Возможное снижение отражения, %	Возможное увеличение отражения, %
Увеличение влажности w , при разной шероховатости		
$w_1 < 5\%$; $d = 10 \div 25$ см	26—33	
$d = 5 \div 10$ см	20—24	
$d < 5$	1—26	
$w_1 = 6 \div 15\%$; $d = 10 \div 25$ см	41—54	
$d = 5 \div 10$ см	36—48	
$d < 5$	5—41	
$w_1 = 20 \div 25\%$; $d = 10 \div 25$ см	58—61	
$d = 5 \div 10$ см	45—55	
$d < 5$	37—43	
Наличие корки		30—50
Увеличение гумуса при его содержании менее 1—2 %	30—40	
от 2 до 5 %	20—25	
более 6 %	10—17	
Увеличение содержания окислов железа	10—20	
Увеличение карбонатности		40—60
Увеличение эродированности слабая эродированность		20—25
средняя эродированность		100—120
При изменении высоты Солнца от 20 до 40°	5—27	
от 40 до 65°		10—15

Примечание. d — диаметр комьев.

привести к формированию относительных различий в отражательных характеристиках, сопоставимых (а в ряде случаев превосходящих) с $\Delta\rho_s$ и/или Δb_s внутри типа, подтипа и т. п. При этом наибольшие относительные изменения связаны с колебанием влажности средне- и сильношероховатых почв, с эродированностью и засолением.

2.2.3. Соотношение между ρ_s и СКЯ почв

Важным является методический вопрос: какую характеристику отражения почв использовать в теоретических и эмпирических схемах расчета b_λ системы растительность—почва? Вполне понятно, что величина b_s в большей степени соответствует решению поставленной задачи, но материалов для систематизации b_s для разных почв и их состояний меньше, чем по ρ_s . В силу этого целесообразно ориентироваться на ρ_s , имея представление о соотношении для одной почвы как значений ρ_s и b_s (измеренных в надир), так и значений ρ_s или b_s для почвы вне и внутри посева.

Даже для ортотропной поверхности почвы согласование численных значений ρ_s и b_s для надира затруднено, так как лабораторные и полевые измерения проводятся не в идентичных условиях. Тем не менее опыт сравнения ρ_s и b_s показал, что основные тенденции и соотношения между оптическими свойствами различных почвенных образований совпадают [4, 44, 55, 60, 80]. По данным [30], при фиксированной w_s для черноземов, серых лесных и дерново-подзолистых почв (свежевспаханная поверхность) b_s , измеренные в надир, в диапазоне 550—800 нм составляют 0,5—0,75 от ρ_s , причем в БИК-диапазоне b_s/ρ_s в среднем равно 0,65 и меньше зависит от типа почв. Однако приведенные оценки нельзя рассматривать как универсальные, ибо переходные коэффициенты от ρ_s к b_s могут меняться в зависимости от w_s , шероховатости и условий освещения. Это подтверждают следующие значения b_s/ρ_s , рассчитанные по [4, 44, 55, 60] для большого числа вариантов:

Почвы	Измерения b_s	550 нм	650—670 нм	750—800 нм
Черноземы	Наземные	0,50—0,80	0,25—0,90	0,22—1,00
	Самолетные	0,66—0,80	0,63—0,82	0,66—1,00
Дерново-подзолистые	Наземные	0,80—0,87	0,67—0,71	0,64—0,90
	Самолетные	0,80—0,87	0,71—0,80	0,73—0,88

Наименьшие из указанных выше значений b_s/ρ_s соответствуют ситуациям, когда b_s измерены для влажных почв, а ρ_s — для воздушно-сухих. Без учета этих ситуаций можно принять, что превышение ρ_s над b_s в среднем составляет 20—30 %. Кроме того, различия в целом снижаются по мере увеличения высоты, с ко-

торой проводятся измерения b_s . Причиной этого является прежде всего большее пространственное разрешение самолетно-вертолетной аппаратуры, а при одинаковом разрешении самолетных и наземных приборов — большее пространственное осреднение.

Рассмотренные соотношения относятся к открытой поверхности почвы, которая отличается по своей структуре от поверхности почвы в РП. Развитие корневой системы растений, различные агротехнические мероприятия в посеве способствуют снижению в РП шероховатости поверхности почвы. Дополнительно смыкание полога препятствует иссушению поверхностного слоя почвы и образованию глянцевої корки. Что в итоге будет превалировать в определении b_s посева — снижение шероховатости или большая влажность, зависит от конкретных условий. Так, установленное в [31] на примере посевов яровой и озимой пшеницы снижение b_s на 25—30 % по сравнению с b_s для свежевспаханной почвы того же типа есть результат скорее всего разного увлажнения. Причем различия между b_s в этом случае сопоставимы с различиями в ρ_s и b_s для открытой поверхности почв. В целом из-за меньшей шероховатости и отсутствия глянцевої корки поверхность почвы внутри РП можно считать матовой. Это предположение подтверждается экспериментальными данными об отсутствии дневного хода b_s в посевах [31]. Следовательно, в моделях отражения РП в качестве первого приближения правомочно использование равенства $\rho_s \approx b_s$, независимо от направления визирования и условий освещения.

* * *

В заключение этого раздела приводим табл. 2.14, из которой видно, что использованные нами при расчетах b_s системы растительность—почва значения ρ_s охватывают широкий набор возможных вариантов почв и их состояний. Учитывая соотношение между

Таблица 2.14

Варианты значений ρ_s , использованные при проведении численных экспериментов

№	Область спектра			№	Область спектра		
	зеленая	красная	БИК		зеленая	красная	БИК
1	0,06	0,07	0,09	11	—	0,18	0,21
2	0,06	0,08	0,10	12	—	0,19	—
3	0,07	0,08	0,09	13	0,18	0,24	0,29
4	0,07	0,09	0,12	14	0,19	0,25	0,29
5	0,10	0,11	0,13	15	0,19	0,25	0,30
6	0,11	0,13	0,14	16	0,20	0,26	0,30
7	0,13	0,14	0,15	17—21	0,28	—	0,35—0,50
8	0,13	0,16	0,16	22—25	—	0,29	0,35—0,50
9	0,15	0,16	0,18	26	0,30	0,35	0,40—0,50
10	0,15	0,18	0,19				

ρ_s и b_s , можно также интерпретировать результаты численных экспериментов и относительно b_s , измеренных либо в надир, либо при произвольных углах визирования для почв со сферической индикатрисой отражения.

2.3. Относительная поверхность фитоэлементов

2.3.1. Общие замечания

В модели Гоудриана, как и в прочих моделях подобного типа (см. табл. 1.1), плотность заполнения объема воздуха, занятого растительностью, задается относительной площадью фитоэлементов L . Этот параметр характеризует кратность перекрытия единицы площади поверхности почвы фитоэлементами растений, произрастающих на этой площади. Величина L , определяющая оптическую плотность РП и соответственно поглощение солнечной радиации, а также транспирацию и суммарное испарение, входит во многие модели продукционного процесса.

Так как определение L сопряжено с трудоемкими измерениями, оценки L не предусмотрены программой сетевых агрометеорологических станций. В то же время исследованиями Ю. И. Чиркова (1969 г.) было убедительно показано значение этого параметра структуры посева как важной агрометеорологической характеристики. При массовых фитометрических описаниях РП, которые проводятся для обеспечения дистанционных обследований, обычно используется параметр B — «проективное покрытие». Определяемая в основном визуально по наблюдениям в надир, величина B характеризует проекцию фитоэлементов на горизонтальную плоскость. Ее значения экспоненциально связаны с L (см. ниже формулы (2.16) — (2.17)), поэтому все рассматриваемые далее в главе 3 зависимости между b_λ и L можно интерпретировать и как зависимости между b_λ и B .

В силу взаимосвязанности различных фитометрических параметров L (и/или B) коррелирует с показателями фитомассы, урожайностью, густотой РП, высотой растений и т. п., причем теснота этих связей определяется стадией развития растений. Наличие этих же связей позволяет использовать косвенные методы оценки L через легче определяемые фитометрические показатели [14, 35, 46 и др.]. Благодаря взаимосвязанности фитометрических параметров в практике дистанционного зондирования для решения некоторых частных задач успешно используются регрессионные связи между яркостными характеристиками и запасами фитомассы, урожайностью [10, 32, 44, 54, 64, 65, 126 и др.].

Из-за отмеченной выше трудоемкости измерений L определяется только при специальных фитометрических наблюдениях. Поэтому имеющиеся в литературе данные далеко не полностью освещают пространственно-временную изменчивость L даже на примере основных сельскохозяйственных культур.

2.3.2. Методические вопросы определения относительной поверхности фитоэлементов

2.3.2.1. Основные характеристики

Суммарная относительная площадь поверхности всех фитоэлементов L в столбе с единичным поперечным сечением находится как сумма относительной площади различных фракций растений ($L_{\text{л}}$ — листьев, $L_{\text{ст}}$ — стеблей, $L_{\text{р}}$ — репродуктивных органов, например, колосьев). При этом

$$L_i = \int_0^{z_0} u_i(z) dz, \quad (2.3)$$

где L_i — относительная площадь какой-либо фракции; u_i — площадь той же фракции в единице объема на высоте z (и/или плотность фитоплощади — foliage density); z_0 — высота РП; $z=0$ — уровень поверхности почвы.

При определении $L_{\text{л}}$ (и/или LAI — индекса листовой поверхности) используется площадь односторонней поверхности листьев ($s_{\text{л}}$), при определении $L_{\text{ст}}$ и $L_{\text{к}}$ — площади осевого сечения стеблей и колосьев. Иногда при расчетах $L_{\text{ст}}$ и $L_{\text{к}}$ в ММРР используют половину боковой поверхности и в этом случае оценки $L_{\text{ст}}$ и $L_{\text{к}}$ примерно в 1,5 раза больше, чем при расчете через сечение. Расхождения в конечных оценках L за счет разного способа вычисления $L_{\text{ст}}$ и $L_{\text{к}}$ определяются вкладом площади этих фракций в суммарную фитоплощадь. В отличие от ММРР, в моделях продукционного процесса $L_{\text{ст}}$ и $L_{\text{к}}$ находятся с учетом полной боковой поверхности, так как вся эта поверхность участвует в газообмене.

Необходимость определения $u_i(z)$ зависит от структуры модели. В модели Гоудриана принимается условное деление РП на бесконечно малые слои ($\Delta L=0,1$) при допущении равномерного заполнения фитоплощадью всего объема РП. В этом случае достаточно использовать куммулятивные характеристики L и L_i , найденные как $L_i = \sum s_i/s_{\text{см}}$ и $L = \sum L_i$ ($s_{\text{см}}$ — площадь поверхности почвы, на которой произрастают растения, $\sum s_i$ — суммарная площадь поверхности i -й фракции во всем объеме РП, приуроченном к $s_{\text{см}}$).

Для дальнейших расчетов характеристик фитоплощади и структуры РП в целом целесообразно пользоваться весовыми функциями β_i , найденными как доля относительной поверхности каждой фракции в суммарной фитоплощади (L_i/L). Через аналогичные соотношения находится доля поверхности зеленых фитоэлементов: $\gamma_{\text{з}} = L_{\text{з}}/L$ — для всей фитоплощади и $\gamma_{\text{зи}} = L_{\text{зи}}/L_i$ — для отдельных фракций. На основе β и $\gamma_{\text{з}}$ с учетом ρ и τ отдельных фракций и их частей рассчитываются средневзвешенные для РП значения $\bar{\rho}$ и $\bar{\tau}$.

При исследовании чувствительности модели к изменению L необходимо иметь представление о возможном приращении

(снижении) L за определенные отрезки времени. Для получения таких оценок можно использовать фотосинтетический потенциал посева — ФП. Значения ФП ($\text{м}^2 \cdot \text{сутки/га}$) вычисляются как сумма показателей площади ассимилирующей поверхности фитоэлементов на 1 га посева за каждый день вегетационного периода или отдельные его отрезки. Между ФП и урожаем существует тесная линейная зависимость [35, 57 и др.], причем, по оценкам А. А. Ничипоровича [42], хорошими являются посевы с $\text{ФП} \geq 2 \text{ млн} \cdot \text{м}^2 \times \text{сутки/га}$ в расчете на каждые 100 дней фактической вегетации. Исходя из этого можно принять значения $\Delta L \leq 0,02$ как желательную точность восстановления плотности полога посевов по спектрометрическим данным.

2.3.2.2. Фитометрические наблюдения в посевах сельскохозяйственных культур

Определение перечисленных выше характеристик фитоплощади входит в программу фитометрических наблюдений. Наиболее распространенными методами в этой программе являются весовой и метод математически среднего растения — МСР [45, 46]. Существующие также методы определения L через площадь просветов (с использованием фотографий, телевизионных снимков), наклонной иглы (и/или точечных квадратов), фотометрических пластин (Li-Cor, Leaf-meter) и т. п. пока не нашли широкого применения. Преобладание ручного труда в фитометрических наблюдениях влечет за собой большие трудозатраты, снижение оперативности получения наземных данных и увеличение ошибок нахождения искоемых характеристик для посева.

Методика модельных растений. Существенным шагом вперед по сравнению с традиционными полевыми методами была предложенная Ю. К. Россом и В. Россом методика МСР [45, 46], которая позволяет повысить оперативность фитометрических наблюдений при оценках средних для посева характеристик. В наших работах эта методика была несколько модифицирована с учетом пространственной изменчивости фитометрических параметров и зависимостей между первичными статистическими характеристиками и густотой посева. В методике модельных растений (ММР) для сокращения объема выборки образцов растительности (например, учетных площадок) на одном поле последовательно определяются: 1) линейные размеры (первичные статистические характеристики) отдельных особей на малых выборках; 2) переходные эмпирические функции от линейных размеров к площади фитоэлементов s_{ϕ} и запасам надземной фитомассы m_{ϕ} отдельных особей; 3) зависимости между густотой стеблестоя N и линейными размерами отдельных особей (например, высотой H). Завершающим этапом ММР является расчет через N , s_{ϕ} и m_{ϕ} средних для посева характеристик L и m . В отличие от МСР, в ММР предусмотрено определение гистограмм распределения N , H и установление переходных функций для каждой градации эмпирических распределений.

Наш многолетний опыт полевых исследований в Херсонской области показал, что для пшеницы (так же как и для кукурузы [46]) в качестве основной первичной характеристики при определении L и m на всех фенофазах целесообразно использовать высоту растений. Причем точность определения L и m возрастает, если в период колошение—цветение учитывать дополнительно число зеленых листьев, в период молочно-восковой спелости — средний диаметр стебля $d_{ст}$. На завершении вегетации зависимость s_{ϕ} от H в целом ослабевает, но тенденция к увеличению s_{ϕ} одного растения при большей его высоте сохраняется. Для озимой пшеницы количественные оценки связей между s_{ϕ} и H приведены в табл. 2.15, а данные табл. 2.16 и 2.17 подтверждают значение дополнительных признаков — числа листьев и $d_{ст}$ в определении s_{ϕ} .

Следует отметить, что в период от начала стеблеобразования до наступления молочной спелости наиболее выражена дифференциация приведенных в табл. 2.16 зависимостей по состоянию посевов. Так, например, в фенофазу цветение растения одной высоты в посевах хорошего и удовлетворительного состояний формируют равную s_{ϕ} при разнице в один лист на растение. Так как эта тенденция сохраняется при одинаковой N , в МСР и ММР должно быть предусмотрено определение переходных функций с учетом общего состояния посева.

Объем выборки для установления переходных эмпирических функций зависит от конечной задачи. Если требуется получить средние для посева значения $\bar{L}$ и $\bar{m}$, то объем выборки не превышает 30 особей; если требуется найти эмпирические распределения N , $d_{ст}$, s_{ϕ} и m_{ϕ} , то объем выборки определяется прежде всего в зависимости от пространственной неоднородности посева, но особей должно быть не менее 100. Для выявления зависимостей между N и $\bar{H}$ в посевах пшеницы достаточно провести измерения на 20—40 учетных площадках размером 0,25—1 м². Отметим, что наибольшие трудозатраты при реализации ММР связаны с получением данных об эмпирических распределениях N .

Истинное значение $\bar{L}$ для посева в целом получить невозможно, и любая методика позволяет определить это значение с каким-то приближением. Погрешность метода целесообразно оценивать на учетных площадках, на которых, срезав все растения, можно определить истинное значение искомых фитометрических параметров. Из данных табл. 2.18 следует, что лучшее приближение к истинным оценкам достигается при использовании МСР и ММР, причем расхождение в результатах, полученных по двум методикам, тем меньше, чем больше пространственная однородность РП.

Пространственная изменчивость фитометрических параметров в посевах. Из параметров, на основе которых в МСР и ММР находится среднее для посева значение $\bar{L}$, в большей степени варьирует N (табл. 2.19), особенно в посевах удовлетворительного и плохого состояний. Отсюда следует, что погрешности кон-

Зависимости между площадью листьев S_L и высотой H отдельного растения в посевах озимой пшеницы Безостая 1

Характеристика	Фено-фаза	Состояние посева	r	η	Вид зависимости $S_L = f(H)$
S_{3L}	ВТ	От плохого до хорошего	0,93	0,77	$-0,116 + 0,0126H$
S_{3L}		Плохое	0,96		$-0,160 + 0,0154H$
S_{3L}		Удовлетворительное	0,95		$-0,175 + 0,0148H$
S_{3L}		Хорошее	0,88		$-0,158 + 0,0132H$
S_{3L}	К	Удовлетворительное	0,96	0,77	$-1,13 + 0,404 \ln H$
S_{3L}			0,96		$-0,966 + 0,0161H$
S_{3L}	Цв	Хорошее	0,85		$-1,35 + 0,0257H$
S_{3L} , $n_{3L} = 2$		Удовлетворительное	0,82		$2,58 - 0,0547H + 0,00003H^2$
S_{3L} , $n_{3L} = 5$		"	0,83		$9,38 - 0,208H + 0,0012H^2$
S_{3L} , $n_{3L} = 2 \div 3$		Хорошее	0,86		$2,54 - 0,054H + 0,0003H^2$
S_{3L} , $n_{3L} = 5$	МС	"	0,79	0,93	$6,79 - 0,14H + 0,0008H^2$
S_{3L} , $n_{3L} = 3 \div 4$		Удовлетворительное, хорошее	0,88		$1,12 - 0,0249H + 0,0002H^2$
S_{3L} , $n_{3L} = 4 \div 5$		То же	0,90		$2,44 - 0,0548H + 0,0004H^2$
S_{3L} , $d < 3$		"	0,79		$-0,166 + 0,0037H - 0,00006H^2$
S_{3L} , $d < 3$	ВС	"	0,80	0,92	$-0,0494 + 0,00298H$
S_{3L} , $d = 3 \div 5$		"	0,87		$-0,0491 + 0,00371H$
S_{3L} , $d > 5$		"	0,82		$0,825 - 0,0168H + 0,00014H^2$
S_{3L} , $d > 5$		"	0,90		$0,0829 \exp(0,0198H)$
S_L		"	0,92		$0,795 - 0,0171H + 0,00015H^2$ $-0,0851 + 0,00433H$

Примечание. Дополнительные характеристики состояния одного растения: n_{3L} — число зеленых листьев, d — средний диаметр стебля, мм, r — коэффициент корреляции, η — корреляционное отношение (r , η при уровне значимости 0,05). Фенофазы: ВТ — выход в трубку, К — колошение, Цв — цветение, МС и ВС — молочная и восковая спелость.

Таблица 2.16

Изменение средней площади зеленого листа (дм^2) одного растения в посевах пшеницы в зависимости от числа зеленых листьев и высоты растений.

Херсонская область

(сорт Безостая 1, фенофаза цветение)

Состояние посева	Число зеленых листьев	Высота растений в естественном положении, см					
		85	90	95	100	105	110
Удовлетворительное	2—3	0,11	0,11	0,15	0,15	0,16	0,14
	3—4	0,14	0,16	0,15	0,15	0,22	0,20
	4—5	0,26	0,25	0,25	0,30	0,42	0,50
Хорошее	2—4		0,11	0,10	0,13	0,12	0,12
	4—5		0,16	0,14	0,26	0,40	0,28

Таблица 2.17

Изменение средней суммарной площади листьев (дм^2) одного растения в посевах пшеницы в зависимости от среднего диаметра стебля и высоты растений.

Херсонская область

(сорт Безостая 1, посева удовлетворительного и хорошего состояний, фенофаза молочная спелость)

Характеристика	Диаметр стебля, мм	Высота растений в естественном положении, см							
		80	90	95	100	105	110	115	120
Площадь зеленых листьев $\bar{z}_{\text{д}}$	$\leq 3-5$	0,10	0,12	0,12	0,12	0,14	0,18	0,20	0,24
	$5 > 5$	0,14	0,14	0,14	0,15	0,18	0,20	0,26	0,40
Общая площадь листьев $\bar{z}_{\text{д}}$	$\leq 3-5$	0,14	0,18	0,20	0,24	0,24	0,27	0,28	0,30
	$5 > 5$	0,14	0,14	0,16	0,12	0,16	0,18	0,32	0,32

оценок $\bar{L}$ для поля преимущественно связаны с погрешностями оценок N . Для того чтобы обеспечить нахождение $\bar{L}$ с ошибкой менее 10 %, необходимо значения N посева определить с ошибкой не более 5 %. Объем выборки, достаточный для оценки $\bar{N}$ с заданной точностью, легко установить по известным формулам, зная примерно коэффициент вариации N . Учитывая реальные C_v , можно констатировать, что для оценки $\bar{N}$ с ошибкой 5 % при $P = 0,9$ требуются выборки объемом в несколько сотен точек. Колоссальные трудозатраты для такого объема выборок можно сократить исходя из того, что после завершения стеблеобразования N становится относительно устойчивой характеристикой посева. С этой же целью целесообразно использовать крупномасштабные снимки полей для выделения контуров с различной структурой посева и далее при наземных обследованиях оценивать $\bar{N}_i$ в пределах каждого контура по пересчетам на 5—15 учетных площадках,

Таблица 2.18

Определение запасов надземной фитомассы и относительной поверхности фитоэлементов в посевах озимой пшеницы (учетные площадки 0,25 м²)

Фенофаза	N экз/м²	Фракция	Методика				
			I (<i>m</i> , <i>L</i>)	II	III	IV	V
Запас надземной фитомассы (для I методики дана сырая масса <i>m</i> в кг/м², для II—V — отклонения в %)							
МС	460	Общая	2,36	+59	+45	+28	+10
	500		2,28	+79	+33	+18	+9
	730		4,71	+55	+31	+10	+9
	992		6,41	+25	+10	—7	—8
МВС	384	"	2,35	+23	—14	+8	—5
	628		4,10	+27	+15	+11	+4
ВПС	424	"	2,07	+24	+16	+4	—3
	808		4,16	+20	+14	+8	—7

Относительная поверхность фитоэлементов (для I методики дано *L* в м²/м², для II, V — отклонения в %)

МС	650	Общая	3,45	+42	—	—	+8
		Зеленые листья	2,37	+42	—	—	+9
		Желто-зеленые листья	0,17	—78	—	—	+29
		Стебли	0,76	+87	—	—	—5
		Колосья	0,15	—60	—	—	+20
МВС	384	Общая	2,18	+21	—	—	0
		Зеленые листья	0,50	+82	—	—	—6
		Желто-зеленые листья	0,30	—57	—	—	+13
		Стебли	1,12	+15	—	—	—2
		Колосья	0,23	—17	—	—	+17
ВПС	808	Общая	3,68	+26	—	—	+4
		Зеленые листья	0,76	+89	—	—	+23
		Желто-зеленые листья	0,32	—68	—	—	—28
		Стебли	2,19	+16	—	—	+4
		Колосья	0,40	+25	—	—	—12

Примечание. Методика: I — полное срезание растений на площадке; расчет: II — по 10 растениям, взятым подряд с рядка, III — по 10 растениям, случайно взятым с площадки, IV — по МСР, V — по ММР. Фенофаза: МС — молочная спелость, МВС — молочно-восковая спелость, ВПС — восковая — полная спелость.

а значения $\bar{N}$ для всего посева найти как средневзвешенное с учетом относительной площади контуров.

Очевидно, что ошибки определения средних характеристик для посева зависят не только от представительности выборки, но и от схемы, по которой проводится сбор фитометрической информации. Выбор оптимальной схемы (расположение точек, размеры учетных площадок, расстояние между ними) — один из наиболее сложных вопросов методики наземных обследований. На практике используются всевозможные схемы, в том числе площадки распо-

Таблица 2.19

Характерные значения коэффициентов вариации C_v (%) для некоторых фитометрических параметров в посевах озимой пшеницы различных состояний. Херсонская область

Фенофаза	H	$H_{ст}$	$d_{ст}$	$s_{л}$	N	B	m	L
Выход в трубку	13—20	28—30	26—29	20—26	23—170*	30—170*	30—190*	30—190*
Цветение—колошение	7—15	9—18	13—30	24—28	25—110			
Молочная спелость	12—30	12—20	23—40	23—30	27—100*	35—80	24—200*	30—110 *
Восковая спелость	15—17	12—20	14—20	21—40	38—48	63—68		35—61 *

Примечание. H — высота рассеяния в вытянутом положении, $H_{ст}$ — длина стебля, $d_{ст}$ — средний диаметр стебля, $s_{л}$ — средняя площадь листьев одного растения, N — густота стеблестоя, B — проективное покрытие, m — общий запас надземной фитомассы, L — суммарная относительная поверхность фитоэлементов; оценки, отмеченные звездочкой (*), получены почвенно-ботанической группой Партии подспутниковых географических экспериментов географического факультета МГУ [26, 27] при выборке на каждом поле в 30 учетных площадок, значения m и L при этом находились методом полного срезания растений на учетных площадках 0,25 м².

лагаются по одной или нескольким диагоналям, по пересекающимся трансектам и т. п., применяется случайный или регулярный шаг между точками, размеры самих учетных площадок варьируют от 0,0625 м² до нескольких квадратных метров. Разнообразие методических рекомендаций связано как с природной изменчивостью РП, так и с задачами конкретных исследований. При оценке существующих методик следует учитывать, что большинство из них разрабатывалось безотносительно к задачам дистанционного зондирования. Поэтому оперативность методики и возможность на ее основе определять масштабы пространственной неоднородности РП не принимались во внимание. Как уже отмечалось, МСР и ММР позволяют увеличивать оперативность наземных наблюдений за счет использования переходных функций. Но даже и в этих методиках необходимо предусматривать оперативное получение достаточно объективных оценок эмпирических распределений и средней для посева густоты.

С целью выявления размеров пятен гетерогенности и обоснования типа выборок в посевах озимой пшеницы нами были проведены специальные серии методических измерений N по трансектам длиной 500 м и в пределах квадрата 3,24 га [14]. Для того чтобы априори снять влияние рельефа, измерения выполнялись на плакорных участках. Предварительно, на основе полного срезания растений с квадрата 2,5×2,5 м, было установлено, что оценки, полученные для учетных площадок 0,25 м², можно достоверно распространять на площади до 1,5—2,5 м². Исходя из этого

учетные площадки 0,25 м² вдоль трансект и в пределах квадрата располагались через 1—1,5 м.

Одним из основных методических результатов проведенной работы является вывод о наличии пятен неоднородностей с линейными размерами от 15 до 50 м. Так как эти пятна достоверно выделялись на двух обследованных полях с посевами хорошего и удовлетворительного состояний, можно предполагать их обусловленность агротехническими причинами (в первую очередь способом сева и обработки почвы). Понятно, что характерные размеры пятен могут варьировать в зависимости от расчлененности рельефа и пестроты почвенных условий в пределах поля, фитопатологического и фитосанитарного состояния посевов, от наличия колоний грызунов, полегания, засухи и других аномальных явлений. Учитывая многообразие причин, обуславливающих пространственную неоднородность посева, и априори неизвестные масштабы неоднородностей, учетные площадки в посевах пшеницы желательно располагать при переменном расстоянии между ними (от 1 до 500 м), что заведомо обеспечит вероятное попадание в выборку разномасштабных неоднородностей.

В ходе этого же эксперимента также было доказано, что точность оценок средних значений $\bar{N}$ и $\bar{B}$, полученных по измерениям вдоль одной трансекты, в случае равного объема выборок (но более 30 учетных площадок) несущественно зависит от типа выборки.

Репрезентативность одной трансекты была проверена по данным измерений в пределах квадрата 3,24 га. Предварительно было установлено, что при существующей на поле мозаичности в распределении N разные варианты выборок позволяют определять $\bar{N}$ с отклонением не более $\pm 10\%$ от значения условно генерального среднего, полученного при выборке из 357 учетных площадок (табл. 2.20). При этом наибольшие отклонения были вы-

Таблица 2.20

Эмпирические распределения густоты стеблестоя N , полученные при разных выборках в посеве озимой пшеницы удовлетворительного состояния на фенофазе молочной спелости

Тип выборки; расстояние между точками, м	Объем выборки (учетные площадки)	N экз/0,25 м ²						$\bar{N}$ экз/0,25 м ²
		≤ 30	31—50	51—70	71—90	91—120	> 120	
Регулярная сетка; 1, 5, 15	357	0,036	0,154	0,306	0,240	0,182	0,082	75
	239	0,017	0,151	0,293	0,247	0,192	0,100	78
Регулярная сетка; 15	169	0,054	0,154	0,325	0,219	0,195	0,053	72
30	49	0,061	0,184	0,285	0,245	0,184	0,041	71
60	25	0,080	0,080	0,400	0,200	0,200	0,040	71
Случайные точки по всей площади	171	0,050	0,131	0,384	0,242	0,118	0,075	76
Диагональ, случайные точки	30	0,036	0,143	0,321	0,393	0,107		69
Диагональ, регулярные точки	30	0,038	0,115	0,346	0,386	0,115		68

явлены при выборках по одной из диагоналей. Далее на основе модельных вариантов пространственной структуры, построенных путем изменения конфигурации и взаимного расположения пятен с разной N при сохранении ее эмпирического распределения и среднего значения для реального посева, было установлено, что при одинаковых выборках и равных их объемах оценки $\bar{N}$ существенно зависят от пространственной структуры посева (табл. 2.21).

Таблица 2.21

Средние значения густоты стеблестоя $\bar{N}_i$, полученные при разных выборках, и их отклонения $\Delta\bar{N}_i$ (%) от $\bar{N}=75$ экз/0,25 м², полученного при регулярной выборке объемом в 357 учетных площадок

Вариант пространственной структуры	Характеристика	Регулярная сетка			Диагонали			Контурная выборка
		Расстояние между точками, м			I	I	II	
		15	30	60	регулярные точки	случайные точки	случайные точки	
		$n=169$	$n=49$	$n=25$	$n=30$			
A	$\bar{N}_i$	72	71	71	68	69	73	72
	$\Delta\bar{N}_i$	-4,0	-5,3	-5,3	-9,3	-8,0	-2,7	-4,0
B	$\bar{N}_i$	72	69	52	52	55	69	71
	$\Delta\bar{N}_i$	-4,0	-8,0	-30,7	-30,7	-26,7	-8,0	-5,3
B	$\bar{N}_i$	72	63	55	89	90	92	74
	$\Delta\bar{N}_i$	-4,0	-16,0	-26,7	18,7	20,0	22,7	-1,3
Г	$\bar{N}_i$	72	83	93	71	68	71	74
	$\Delta\bar{N}_i$	-4,0	10,7	24,0	-5,3	-9,3	-5,3	-1,3

Примечание. Варианты структуры: А — исходная ситуация, реально наблюдаемая в посевах на площади квадрата 3,24 га ($Cv_N=38\%$); Б—Г — модельные ситуации; Б — полосчатая структура (в натуральных условиях может быть следствием неравномерного сева, формироваться при полегании, при подсевах изреженных участков, фитопатологических явлениях и т. п.), В — крупноагрегатная структура с постепенным увеличением густоты вдоль I диагонали к одной стороне квадрата, Г — крупноагрегатная структура при постепенном увеличении густоты от периферии участка к его центру (варианты В и Г возможны в посевах, расположенных на склонах, при выраженности эрозионных процессов, наличии крупных пятен заселения, неравномерном внесении удобрений, вариант Г возможен также при орошении в центре поля и т. п.); n — объем выборки (число учетных площадок 0,25 м²). Для контурной выборки $\bar{N}_i$ вычислялись как средневзвешенные с учетом площади контура.

Независимо от характера размещения пятен, только выборка достаточного объема по точкам, случайно размещенным по всей площади, регулярная выборка при расстоянии 15 м между точками, а также контурная выборка обеспечивают оценки $\bar{N}$

с отклонением не более $\pm 5\%$ от условно генерального среднего значения. При увеличении расстояния между точками, расположенными регулярно, и при обследовании вдоль диагоналей отклонения $\bar{N}$ возрастают до $\pm 30\%$. Следствием только указанных выше ошибок осреднения N могут быть следующие отклонения в средних для посева значениях $\bar{L}_д$ и $\bar{L}_{зл}$, рассчитанных по МСР или ММР:

$\bar{N}=75 \text{ экз/м}^2$	$\bar{L}_д=1,41 \pm 0,04$	$\bar{L}_{зл}=0,87 \pm 0,02$
$\pm \Delta N (\%) = 5$		
10	1,36—1,51	0,82—0,91
20	1,30—1,53	0,78—0,93
30	1,15—1,72	0,70—1,04
	1,01—1,87	0,60—1,13

Явная зависимость результатов, полученных при обследовании по диагоналям, от пространственной структуры свидетельствует о том, что методику диагоналей (или отдельных трансект) нельзя рекомендовать как унифицированную при фитометрических обследованиях сельскохозяйственных полей и естественных травостоев. Большие трудозатраты, необходимые для обеспечения случайной и регулярной выборок достаточного объема, также делают нерациональным их использование, хотя при отсутствии априорных данных регулярная выборка со смешанным шагом опроса может дать полезную информацию о структуре посева для интерпретации результатов дистанционных измерений, выполненных аппаратурой высокого пространственного разрешения. Учитывая полученные результаты, только контурную выборку можно рекомендовать как наиболее оптимальную при всех вариантах пространственной структуры РП. Однако оперативная ее реализация, как уже отмечалось, возможна при наличии крупномасштабных фото- или телевизионных снимков либо в случае предварительных аэровизуальных обследований посевов.

Таким образом, при современных фитометрических методиках (и в основном из-за ошибок осреднения по площади посева) вряд ли реально получение значений $\bar{L}$ и $\bar{m}$ с ошибкой менее 20 %. Более точные оценки возможны для небольших участков посевов или травостоев при специально поставленных экспериментах.

Не улучшает ситуацию и применение вместо L проективного покрытия. Хотя использование визуальных оценок B и позволяет повысить оперативность наземных измерений, но неизбежно сопровождается увеличением суммарных ошибок из-за субъективности наблюдателя. Кроме того, величина B является не полным аналогом L , так как она не отражает кратность перекрытия подстилающей поверхности площадью фитоэлементов и соответственно не может характеризовать процесс рассеяния и поглощения излучения во всем объеме РП.

Одним из возможных подходов к повышению оперативности наземных наблюдений и к увеличению объема выборки по всей площади объекта является установление эмпирических зависимостей между L и B . Но так как связь между этими параметрами в значительной степени определяется пространственной ориентацией фитоэлементов и их пространственным размещением (см. ниже 2.4.4), наблюдается большая природная изменчивость функций $B(L)$ [13]. Поэтому очевидно, что для установления и тем более для систематизации подобных зависимостей требуются специальные исследования в различных РП с учетом условий произрастания и стадий фенологического развития растений. Использование на практике вместо зависимостей $B=f(L)$ эмпирических констант типа индекса перекрытия листьев LOI (отношение $L_{\text{пл}}$ вдоль линии визирования к B , предложенное D. Ferns в 1984 г.) также возможно после проведения предварительных полевых экспериментов.

Дополнительные источники ошибок. Из числа других реальных причин ошибок определения L остановимся еще на двух, наиболее на наш взгляд распространенных: 1) недостаточная представительность пробы высечек для установления переходных коэффициентов от массы к площади листьев и 2) оценка L в объеме РП, не совпадающем точно с объемом, который попадает в поле зрения прибора. Первая из указанных причин может повлиять на точность оценок L вообще при полевых наблюдениях, вторая может привести к погрешностям в интерпретации данных дистанционных измерений, выполняемых при стационарной установке приборов.

По общепринятой методике на основе высечек находится площадь 1 г сухого вещества — удельная поверхностная плотность (УПП) листьев. Сама величина УПП является показателем интенсивности работы фотосинтетического аппарата растений, их адаптации к условиям произрастания и связана с транспортом ассимилятов [57, 58]. Не останавливаясь здесь на этом вопросе, заслуживающим специального исследования, отметим только некоторые моменты, имеющие методическое значение.

При отборе проб на высечки следует учитывать, что УПП зависит от вида, сорта, фенофазы, влажности и плодородия почв, густоты РП, степени развития отдельных растений, яруса, поврежденности листьев и т. п. Множество факторов, влияющих на УПП, определяет необходимость тщательного отбора проб для высечек.

Для оценки возможных ошибок за счет субъективного отбора проб нами на одном поле с посевом озимой пшеницы в период молочной спелости было взято две группы по 90—100 растений. Из первой группы, взятой без учета гистограмм распределения H и $d_{\text{ст}}$, площадь высечек составляла 980 см², из второй, взятой с учетом этих гистограмм, — 1300 см². Для первой группы среднее для всех листьев значение УПП было равно 155 г/см², для зеленых — 151 г/см², для второй группы — 196 и 200 г/см² соответст-

венно. При этом в первую группу случайно попали в основном особи с H ниже средней, небольшим $d_{ст}$ и с преимущественно зелеными листьями. В итоге расчет по УПП для первой группы дал оценки $\bar{L}_д$ посева на 21 % ниже по сравнению с расчетом по УПП, полученной по представительной выборке растений, а $\bar{\gamma}_з$ для листьев — на 33 % ниже. С учетом 20 %-ной ошибки осреднения по площади суммарная ошибка $\bar{L}_д$ для посева при использовании УПП первой группы составила 29 %. В случае расчета по УПП только листьев верхнего и среднего ярусов (при площади высевок 970 см²) растений второй группы (соответственно все листья — 180 г/см², зеленые — 185 г/см²) значения $\bar{L}_д$ оказались на 17 % ниже, $\bar{\gamma}_з$ листьев на 30 % выше, чем при расчете по полной выборке УПП второй группы, а суммарная ошибка $\bar{L}_д$ составила 26 %.

Выявленное занижение L_d за счет некорректных оценок УПП — это частный результат конкретного опыта. Знак ошибки может быть разный, в зависимости от характера накопления и перетока ассимилятов в растении. Но в целом при использовании весового метода определения L_d субъективный отбор растений и листьев для высевок (при достаточной площади самих высевок) может привести к увеличению основной ошибки определения $\bar{L}$ еще примерно на 10 %. Поэтому для уменьшения возможных погрешностей следует отбор растений на высеки проводить с учетом гистограмм распределения линейных размеров особей при включении в выборку различных листьев всех ярусов.

Теперь рассмотрим, какие погрешности можно ожидать, если L определяется не точно для того объема РП, который попадает в поле зрения приборов. Этот методический вопрос весьма существен, так как при наземных измерениях b_d в ряде случаев (например, при изучении дневного хода) используются приборы, устанавливаемые стационарно над одной площадкой РП.

Понятно, что отраженный сигнал формируется в основном под влиянием свойств растительности, попадающей в поле зрения прибора (дополнительное воздействие оказывают также тени от окружающих фитоэлементов, а при разреженном РП — почва). Растительность соответственно заключена в объеме усеченного конуса, верхний радиус которого определяется углом зрения прибора и высотой его установки над верхней границей РП, а нижний — углом зрения и расстоянием от прибора до поверхности почвы. Определить L в усеченном конусе технически сложно, поэтому фитометрические характеристики находятся либо в объеме цилиндра, а чаще — в объеме параллелепипеда. При этом обычно площадь поперечного сечения геометрических фигур выбирается с учетом размеров поля зрения прибора на верхней границе РП.

Для проверки возможных ошибок в оценках L мы провели две методические серии измерений, в ходе которых на основе полного срезания растений определялись значения L_d и L на фиксированной площадке для различных объемов (табл. 2.22). Во всех случаях малый диаметр соответствовал диаметру окружно-

Таблица 2.2:

Оценка погрешностей определения относительной поверхности фитоэлементов в фиксированном объеме РП (посевы озимой пшеницы, молочная спелость)

Геометрическая фигура	I серия					II серия				
	N экз/м ²	L_d	L	ΔL_d %	ΔL %	N экз/м ²	L_d	L	ΔL_d %	ΔL %
Усеченный конус	407	0,92	1,78			450	0,66	1,50		
Малый цилиндр	1127	2,60	4,80	+183	+169	900	1,36	2,78	+106	+85
Большой цилиндр	407	0,98	2,08	+7	+14	450	0,81	1,89	+23	+20
Средний цилиндр ¹	930	1,70	3,29	+85	+85	—	—	—	—	—
Параллелепипед	340	0,87	1,75	-5	-2	380	0,73	1,55	+11	+3

¹ Цилиндр с диаметром основания, равным среднему между диаметрами малого и большого цилиндров.

Примечание. $\Delta L = [(L_{кон} - L_i) / L_{кон}] \cdot 100$ %.

сти, попадающей в поле зрения прибора на верхней границе, а большой — на поверхности почвы в посеве. При этом фигуры были вложены одна в одну и имели общее основание.

Из табл. 2.22 следует, что наименьшие погрешности по сравнению с оценками для конуса наблюдаются, когда L_d и L находятся в объеме параллелепипеда со стороной квадрата в основании, равной диаметру большей окружности. Использование большого цилиндра также возможно, но в этом случае возрастает ошибка за счет менее точного определения фитоэлементов, попадающих в нужный объем. Оценки L_d и L для малого цилиндра оказались завышенными по сравнению с конусом в 2 раза. Аналогичное завышение будет происходить и при использовании параллелепипеда, имеющего в основании квадрат со стороной, равной малому диаметру.

Полученный вывод справедлив, очевидно, для всех узколистных злаков. Для растений с крупными листьями или в посевах с выраженной структурой и несомкнутым пологом вообще нецелесообразно проводить наземные измерения на фиксированных малых площадках с помощью приборов, имеющих угол зрения менее 20°. Учитывая реальные ошибки определения L , лучше всего при наземных измерениях применять переносные приборы, а постоянные площадки закладывать со сторонами не менее чем в 2—3 раза превышающими диаметр окружности в поле зрения прибора на верхней границе РП. В противном случае полученные L не будут строго соответствовать измеренному отраженному сигналу.

2.3.3. Изменяемость относительной поверхности фитоэлементов сельскохозяйственных посевов

Большинство опубликованных в литературе данных о L приводятся без описания методики, с помощью которой они

получены, и не сопровождаются какими-либо статистическими оценками. Исходя из отмеченных в 2.3.2 реальных ошибок определения $\bar{L}$ для посевов экспериментальные данные можно систематизировать только на уровне тенденций либо рассматривать изменение L в рамках материалов, полученных одним автором для конкретных объектов.

2.3.3.1. Зависимость L от видового состава РП

Значения L для сельскохозяйственных посевов и естественных травостоев могут варьировать в очень широких пределах: от близких к 0 до 20—30 м²/м². Собственно значения L нельзя рассматривать как видовую характеристику, так как отдельные растения и фитоценоз в целом развивают ассимиляционный аппарат, адаптируясь к конкретным условиям произрастания [3, 12, 20, 35 и др.]. В большей степени видовой характеристикой являются значения оптимальной $L_{\text{опт}}$ и максимальной $L_{\text{макс}}$ площади фитоэлементов.

Теоретические закономерности формирования $L_{\text{опт}}$ для видов, различающихся по своему светолюбию и произрастающих на разных широтах в условиях короткого и длинного дня при различном приходе ФАР, были выявлены Х. Г. Тоомигом [57, 58] при решении вариационной задачи максимизации продуктивности с учетом взаимосвязи между дыханием и фотосинтезом. Основной вывод, полученный Х. Г. Тоомигом относительно $L_{\text{опт}}$, состоит в том, что при прочих равных условиях по мере снижения радиации приспособления П происходит увеличение $L_{\text{опт}}$. При росте затрат на дыхание менее светолюбивые виды могут формировать $L_{\text{опт}}$, равные $L_{\text{опт}}$ светолюбивых видов с низкими коэффициентами затрат. Например, для кукурузы, сорго и подсолнечника $L_{\text{опт}} = 3 \div 5$, для брюквы — $5 \div 7$. Согласно расчетам, видовые различия перекрывают влияние длины дня и географических изменений в приходе ФАР при определении $L_{\text{опт}}$. Причем чем ниже P , тем в большей степени выражена зависимость $L_{\text{опт}}$ от пространственной ориентации фитоэлементов. Теоретически $L_{\text{макс}}$ достигается в посевах в том случае, когда рост ассимилирующей поверхности продолжается до момента равенства суммарного для посева фотосинтеза и дыхания. В зависимости от видовых особенностей растений и режима ФАР $L_{\text{макс}}$ может быть различной, как и $L_{\text{опт}}$. Для культур и сортов, выращиваемых в умеренных и высоких широтах на кормовую или силосную массу, реальны $L_{\text{макс}} = 20 \div 30$.

Проблема формирования $L_{\text{опт}}$ и $L_{\text{макс}}$ достаточно сложна и многогранна. Однако рассмотрение всех ее аспектов выходит за рамки настоящей работы. Подчеркнем только, что практика сельского хозяйства и агрометеорологии подтвердила значимость величин $L_{\text{опт}}$ и $L_{\text{макс}}$ при решении вопросов о повышении урожайности. Так, в условиях юга Украины при выращивании кукурузы на зерно максимальный урожай формируется при $L = 3.5$, на силос — при 4,8 и на зеленый корм — при 7,2 [20]; при выращивании ярового ячменя на зерно в условиях Нечерноземья $L_{\text{опт}}$ варь-

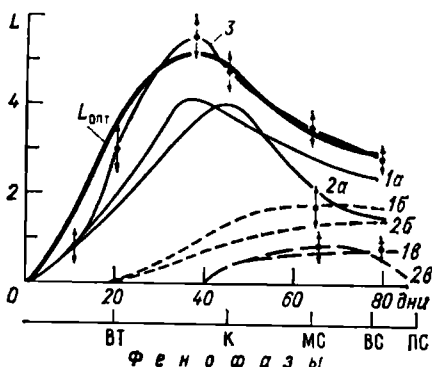
ирует в зависимости от N , составляя для редких посевов 2,5—3 м²/м², а для густых 4—5 м²/м² [1, 3].

2.3.3.2. Динамика характеристик фито площади

В работах Х. Г. Тооминга также было доказано значение оптимального хода $L_{\text{опт}}$ и $L_{\text{макс}}$ в течение вегетационного периода для достижения высоких урожаев [58, 59]. С позиций настоящей работы теоретические результаты представляют интерес при оценке возможной динамики L для разных видов и сортов, произрастающих в различных условиях. Согласно расчетам, при равных значениях Π для северных районов характерны более высокие темпы роста в первую половину лета, причем основные раз-

Рис. 2.5. Изменение относительной поверхности фитоэлементов L в посевах ярового ячменя в течение периода вегетации.

Экспериментальные данные: Эстония, сорт Домен, (по [35]) — 1) сухой год, 2) влажный (а — L_d , б — $L_{\text{ст}}$, в — L_R); 3) Калужская область, сорта Винер и Московский 121, средние данные за 1968—1971 гг., по [1—3]; стрелками показан диапазон для разной густоты. Расчетные данные — $L_{\text{опт}}$ для $\phi=58^\circ$ [57, 58]. Усл. обозначения фенофаз см. рис. 2.6.



личия между широтами проявляются в первые 10—30 дней развития растений. В средних широтах, независимо от срока сева, в первую половину вегетационного периода виды с высокими Π характеризуются более интенсивным ростом по сравнению с относительно теневыносливыми видами. Но последние развивают в целом большую фито площадь и фитомассу. Данные, представленные на рис. 2.5, свидетельствуют о хорошем согласовании теоретических результатов с наблюдаемыми в природе закономерностями.

Изменения в течение вегетационного периода. Ритм развития растений в онтогенезе в первую очередь определяется их генетикой. На фоне генетических особенностей скорость роста и развития существенно зависит от факторов внешней среды, в том числе и от агротехнических мероприятий, а также от фитоценологических отношений (взаимной конкуренции или взаимной толерантности). В результате комплексного воздействия разнообразных факторов смена фаз развития растений может происходить через различные интервалы календарного времени, но видовая специфика функций роста при этом остается достаточно устойчивым показателем [20, 35 и др.]. Поэтому процессы роста и развития растений за разные годы и в различных условиях произрастания сравниваются с помощью биологического времени

(выраженного либо качественно в виде смен фаз, либо количественно с помощью накопленных сумм эффективных температур) или времени, выраженного через число дней от появления всходов, а для озимых культур — от возобновления вегетации весной. При этом следует отметить, что при интерпретации данных дистанционного зондирования для какой-либо территории полезно пользоваться и шкалой календарного времени на текущий год (см. главу 5).

При адаптации теоретической модели отражения к посевам конкретных культур желательно располагать данными о том, с какой фазой или межфазным периодом связаны максимальные значения L и в какой период возможны наибольшие изменения характеристик фитоплощади во времени.

В работах физиологов отмечается, что наибольшие скорости роста листа типичны для тех листьев, пластинка которых составляет 15—20 % от размеров полностью сформировавшегося листа. Эта особенность морфогенеза листьев в сочетании с морфогенезом всего растения определяет в посевах наибольшие приросты $L_{\text{л}}$ в период от завершения листообразования до начала интенсивного роста стеблей и репродуктивных органов, а L — несколько позднее, когда к приросту листьев добавляется прирост стеблей (табл. 2.23). На фазовых до колошения (или выметывания метелки) L и $L_{\text{л}}$ в отдельные межфазные периоды могут увеличиваться вдвое. Максимальные значения $L_{\text{л}}$ обычно формируются к концу вегетативного роста (табл. 2.23, 2.24, рис. 2.5). С началом роста репродуктивных органов происходит отток в них ассимилятов из вегетативных органов, который сначала вызывает снижение УПП, а затем приводит к постепенному отмиранию всех листьев. Заметное уменьшение доли $L_{\text{л}}$ в L для посевов узколистных злаков начинается после колошения (рис. 2.6 а, б), в посевах кукурузы — после цветения метелки (рис. 2.6 в). Интенсивность снижения $L_{\text{л}}$ на фазовых налива и созревания зерна при прочих равных условиях определяется степенью развития отдельных особей. Например, для пшеницы Безостая 1 на фазовых восковой спелости снижение $s_{\text{л}}$ за сутки у растений с $H = 60 \div 100$ см аппроксимируется практически линейной зависимостью (при $r = 0,96$):

$$\Delta \bar{s}_{\text{л}} = -0,0268 + 0,00056H, \quad (2.4)$$

где $\Delta s_{\text{л}}$ в $\text{дм}^2/\text{сутки}$.

Динамика пожелтения посевов, показатели которой находятся на основе L и $L_{\text{эл}}$ и через которую можно скорректировать ρ , связана с жизненным циклом отдельных органов растений, с состоянием растений и посева в целом. Так, в период от конца молочной спелости до начала восковой спелости в посевах пшеницы первыми начинают желтеть особи, оставшие в росте, и в меньшей степени те, у которых H выше средней. Для средних по высоте растений $\gamma_{\text{эл}}$ составляет 72—76 %, а наиболее зеленым остается подгон. Во время восковой спелости зависимость $\gamma_{\text{эл}}$

Таблица 2.23

Характеристика периодов максимальных изменений относительной поверхности фитоэлементов в посевах некоторых сельскохозяйственных культур

Культура, сорт, гибрид	Район	Увеличение						Снижение					
		L _д			L			L _д			L		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1. Яровой ячмень Домен	Эстония	ВТ-6л	0,18	0,90	5л—7л	0,23	1,15	нМС	0,12	0,6	МС— ВС	0,09	0,45
2. Озимая пшеница Безостая I	Херсонская об- ласть	ВТ-5л	0,12	0,96	5л—7л	0,20	1,20	нМС	0,14	0,7	МС— ВС	0,10	0,80
3. Кукуруза Краснодарский 440	То же	9л—12л	0,20	1,60	9л— ВМ	0,26	2,10	кВС	0,09	1,8	кВС— ПС	0,10	2,00
4. Картофель Сулев	Эстония	Рост ботвы	0,25	5,0	Нет данных	Икл	0,35— 0,40	Нет данных	4,0	Нет данных			

Примечание. I — по [35] и по Х. Э. Мяги, 1974 г., 2, 3 — по собственным данным, 4 — по [58] и по Х. И. Мязгалу, Т. Х. Тамметс, 1981 г., а также по Т. Х. Тамметс, 1985 г. I — фенофаза, II — ΔL за сутки, III — ΔL за период; ВТ — выход в трубку, 5л — 12л — 5-12-й лист, нМС — начало молочной спелости, кВС — конец восковой спелости, ПС — полная спелость, ВМ — выметывание метелки, Икл — интенсивное клубнеобразование.

Таблица 2.24

Экстремальные значения N (экз/м²), L_n (м²/м²) и коэффициенты вариации C_v (%) для совокупности полей с озимой пшеницей в двух административных районах Херсонской области (составлено по [26, 27])

Фенофаза, состояние посева, год	N			L_n		
	макс.	мин.	C_v	макс.	мин.	C_v
РС, 1978 Плохое	413	216	37	0,5	0,2	62
Удовлетворительное	638	422	32	1,0	0,5	52
Хорошее	1002	626	31	3,2	0,6	51
Отличное	1372	1016	22	3,4	1,3	44
К, 1978 Плохое	356	254	28	2,2	1,4	50
Удовлетворительное	521	341	32	4,2	2,4	40
Хорошее	614	478	23	4,3	3,2	34
Отличное	723	560	17	6,5	4,5	29
МВС, 1978 Плохое	466	246	23	0,35	0,15	41
Удовлетворительное	417	309	26	0,65	0,3	52
Хорошее	668	404	25	1,45	0,4	58
Отличное	662	559	19	1,15	0,8	49
РС, 1981 Плохое	748	458	28	0,9	0,4	43
Удовлетворительное	939	621	30	1,2	1,0	38
Хорошее	913	806	31	1,75	1,5	42
Отличное	1033	836	21	1,9	1,3	26

Примечание. РС — начало роста стебля; К — колошение, МВС — молочно-восковая спелость.

от H (для $H=60 \div 115$ см) описывается следующим выражением ($r=0,74$):

$$\gamma_3 = 12,4 + 1,4171H - 0,0079H^2. \quad (2.5)$$

При этом среди нормально развитых особей интенсивность пожелтения ($\Delta\gamma_3$ за сутки, %) обратно связана с H ($r=-0,81$):

$$\Delta\gamma_3 = 14,5 - 0,118H. \quad (2.6)$$

Выявленный на примере озимой пшеницы противоположный характер зависимости скорости отмирания листьев и интенсивности пожелтения от H объясняется тем, что в γ_3 учитываются желтеющие стебли и колосья, площадь которых при завершении вегетативного и репродуктивного роста практически не меняется.

Для посева в среднем при созревании пшеницы наблюдается снижение $\gamma_{3л}$ при увеличении L_n (табл. 2.25). Эта общая тенденция полностью справедлива для посевов удовлетворительного и плохого состояний, а в посевах хорошего состояния проявляется только при $L_n < 3$. Повышение $\gamma_{3л}$ в плотных посевах хорошего состояния связано как с наличием растений, имеющих H больше средней, так и с более долгим сохранением жизнедеятельных листьев. Однако за счет внутреннего разнообразия $\gamma_{3л}$ и L_n

Таблица 2.25

Зависимость между долей поверхности листьев зеленого цвета $\gamma_{зл}$ и относительной поверхностью листьев $L_{л}$ в посевах пшеницы различных состояний в период фенофазы молочно-восковая зрелость. Херсонская область (составлено по [26, 27])

$L_{л}$	$\gamma_{зл} \%$				Σ
	≤ 30	31—50	51—70	≥ 71	

Посевы хорошего, удовлетворительного и плохого состояний

$\leq 1,0$	0,050	0,175	0,325	+0,450†	40
1,1—1,5	0,133	0,156	+0,378†	0,133	45
1,6—2,0	0,084	+0,556†	0,305	0,055	36
2,1—2,5	+0,229†	0,343	+0,370	0,058	35
$\geq 2,6$	+0,200†	+0,360	+0,400	0,040	25
P_t	0,132	0,354	0,354	0,160	181

Посевы хорошего состояния

$\leq 1,5$	0,067	0,400	+0,400	+0,133†	30
1,6—2,0	0,087	+0,521†	0,347	0,043	23
2,1—2,5	+0,200†	+0,440	0,320	0,040	15
$\geq 2,6$		0,357	+0,571†	0,072	14
P_t	0,098	0,435	0,392	0,075	92

Примечание. Σ — число учетных площадок на поле. Знаком плюс (+) отмечено состояние при $c > 1$ (см. (2.2)); † — наиболее вероятные состояния из совокупности $c > 1$.

в группе посевов одного состояния и на одном поле собственно влияние состояния нивелируется при оценках $\bar{\gamma}_{зл}$, которые в среднем для посевов озимой пшеницы на фенофазе молочно-восковой зрелости равны:

Состояние посевов	$\bar{L}_{л}$	$\bar{\gamma}_{зл} \%$	$C\sigma_{\gamma_{зл}} \%$
Хорошее	1,7—2,5	49	47
Удовлетворительное	1,1—2,3	52	40

Межгодовые различия в L , определяемые сроками сева, всхожестью семян, степенью кустистости и развития отдельных особей, являются результатом изменения условий произрастания. Среди последних погодные условия чаще всего оказываются доминирующим фактором для посевов. В естественных травостоях сложного видового состава реакция РП на погодные условия в виде колебаний L выражена слабее из-за взаимокомпенсационных

изменений в развитии растений, формирующих сообщество. Также можно ожидать снижения межгодовой изменчивости при оптимальном подборе сортов и агротехнических мероприятий.

На одном фоне удобрений и при фиксированных нормах высева семян Е. В. Абашиной было установлено, что для сортов ячменя Винер и Московский 121 за период от 8-го листа до молочной спелости в сухой год посевы образуют фитоплощадь в 2—2,5 раза больше, а во влажный в 1,3—1,8 раза меньше, чем

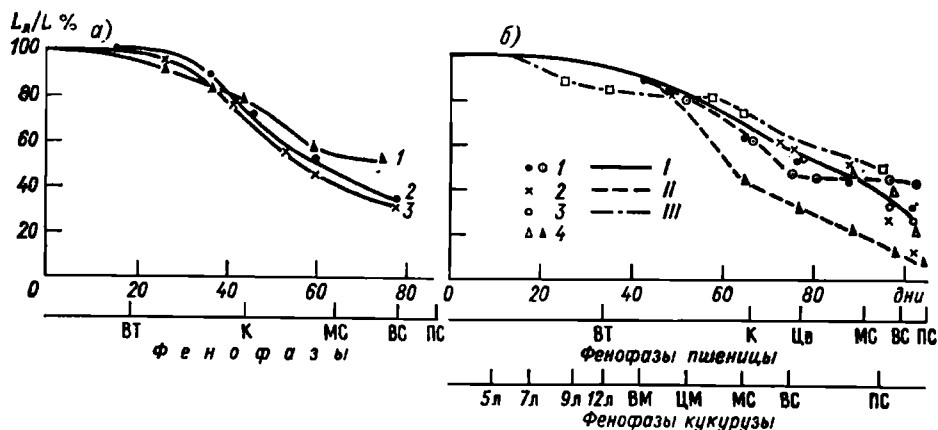


Рис. 2.6. Изменение доли поверхности листьев в суммарной фитоплощади $L_{\text{л}}/L$ в течение весенне-летней вегетации.

а — яровой ячмень (по [1, 3, 35]); 1 — Калужская область, сорта Винер, Московский 121 (средние данные за 1968—1971 гг.), 2, 3 — Эстония, сорт Домен, сухой год (2 — с удобрением, 3 — без удобрений).

б — озимая пшеница, сорт Безостая 1 (I, II) и кукуруза, сорт Краснодарский 440 (III). Херсонская обл.; 1, III — нормальное увлажнение, II — засуха начиная с колошения; 1) $L \geq 8$, 2) $L = 3-4$, 3) $L = 2-3$, 4) $L < 1.5$.

Фенофазы: BT — выход в трубку, К — колошение, Цв — цветение, МС — молочная спелость, ВС — восковая спелость, ПС — полная спелость, 5л—12л — появление 5—12-го листа, ВМ — выметывание метелки, ЦМ — цветение метелки.

в нормально влажный год. Причем максимальная реакция на погодные условия была выявлена в густых посевах [1, 3]. По наблюдениям за 4 года в Херсонской области, наибольшая изменчивость L также наблюдалась в густых посевах озимой пшеницы, особенно на ранних фенофазах. Так, в период выход в трубку — начало стеблеобразования максимальная разность между средним за 4 года значением $\bar{L}$ и значением L за текущий год при $N = 1000$ экз/м² составляла 2,8, при $N = 200$ экз/м² — 0,3; в период молочно-восковой спелости эта разница при $N = 660$ экз/м² составляла 1,2 и при $N = 480$ экз/м² — 0,8. Большее снижение L в густых посевах в засушливый год обусловлено обострением корневой конкуренции, а увеличение L при избыточном увлажнении происходит как за счет развития отдельных особей, так и за счет увеличения кустистости.

В то же время межгодовые колебания меньше или соизмеримы с внутригодовыми изменениями L и $L_{\text{л}}$, которые на фикси-

рованной фенофазе наблюдаются в группе посевов какой-либо культуры одного состояния (см. табл. 2.24), а также в пределах площади одного посева (см. табл. 2.19). Причинами, определяющими разнообразие L и L_d при однотипных погодных ситуациях и равных N , являются прежде всего эдафические условия (в том числе и опосредованное через них влияние предшественника).

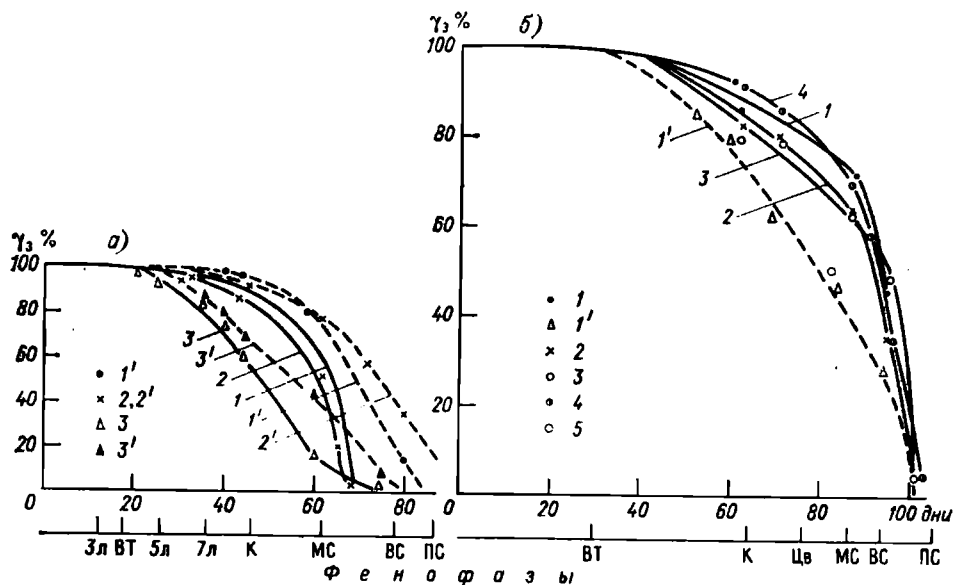


Рис. 2.7. Изменение доли поверхности зеленых фитоэлементов γ_z и зеленых листьев $\gamma_{зд}$ в течение весенне-летней вегетации.

а — яровой ячмень, сорт Домен, Эстония, по [35]; 1, 2, 3) γ_z , 1', 2', 3') $\gamma_{зд}$; 1, 1', 2, 2') сухой год (2, 2' — без удобрений), 3, 3') влажный год при ранней засухе.
б — озимая пшеница, сорт Безостая 1, Херсонская область; 1—4) γ_z , 5) $\gamma_{зд}$; 1, 1') $L \geq 5$, 2) $L = 3 + 4$, 3) $L = 2 + 3$, 4) $L < 1.5$, 5) $L < 1.0$; 1—5) средние данные за годы с нормальным увлажнением, 1') засуха начинающаяся с колошения. Остальные обозначения см. рис. 2.6.

Поэтому выявить собственно воздействие погодных условий разных лет можно только при соблюдении равенства всех прочих параметров. Реализация этого требования, в свою очередь, возможна только на основе массового статистического материала по обследованию сельскохозяйственных полей, полученного с помощью унифицированных методик наблюдений.

Реакция растений на погодные условия в разные годы проявляется также в изменении L_d/L и γ_z . Из рис. 2.6 и 2.7 видно, что при засухе происходит снижение доли L_d и увеличение доли площади желтых фитоэлементов. При этом изменение значений γ_z и сдвиг начала и полного пожелтения являются наиболее показательными характеристиками засушливых условий. В относительно влажные годы на примере посевов озимой пшеницы не удалось выявить статистически значимых отклонений

в значениях $L_{\text{пл}}/L$, но было зафиксировано более позднее пожелтение посевов.

В заключение коротко остановимся на особенностях *вертикального профиля*, так как допущение о равномерном распределении L является одним из основных ограничений модели Годуриана.

Для растительности в целом характерно стремление к максимально возможному при данных условиях произрастания заполнению фитоэлементами объема РП [12]. Чем сложнее видовой состав сообщества, при котором каждая особь, ценогруппа, ярус и т. п. занимает свои экологические микрониши, тем в большей степени выражена равномерность вертикального распределения фитоплощади. В монодоминантных сельскохозяйственных посевах вертикальный профиль зависит от видовых особенностей структуры отдельного растения (в том числе от характерных размеров междузлий, фитоэлементов, пространственной ориентации последних), от условий произрастания, фенофазы и густоты посева. В среднесомкнутых посевах типично положение слоя с максимальными значениями L в средней части полога (табл. 2.26) [1, 3, 20, 35, 51 и др.]. По мере увеличения N наблюдается сдвиг слоя с $L(z)_{\text{макс}}$ в более верхние ярусы, но степень загущенности,

Таблица 2.26

Схематические типы вертикальной структуры естественных и искусственных травостоев на период активной вегетации

Характеристика вертикального профиля	Загущенные РП	Густые РП	Средние РП	Редкие РП
Отсутствие репродуктивных органов				
Количество основных ярусов	2	2	2	Неопределенно
Положение $L(z)_{\text{макс}}$	Выше $0,3H$	Неопределенно	$0,5—0,65H$	Ниже $0,7H$
Наличие репродуктивных органов, вынесенных вверх, при углах их наклона менее 60°				
Количество основных ярусов	3	3	3	2
Положение $L(z)_{\text{макс}}$	$0,3 \div 0,4H$	$0,3 \div 0,7H$	$0,6 \div 0,8H$	Ниже $0,8H$
Наличие репродуктивных органов, вынесенных вверх, при углах их наклона более 60°				
Количество основных ярусов	3	3	3	2
Положение $L(z)_{\text{макс}}$	Выше $0,3H$	Неопределенно	$0,5—0,65H$	Ниже $0,7H$

Примечание. Отсчет относительной высоты слоя z идет от верхней границы РП, высота которого равна H .

при которой происходит этот сдвиг, варьирует в зависимости от видового состава РП.

На фоне общих тенденций реальные различные структуры полога. Более специфичным признаком, чем собственно профиль L , является изменение положения слоев с доминированием площади разных фракций растений. Так, для самого верхнего слоя посева пшеницы (составляющего не более 15 % от общей высоты РП) характерно доминирование колосьев, для нижнего (17—30 % от H) — стеблей и для промежуточного между ними — листьев. При исключении самого верхнего слоя в последующих за ним слоях наблюдается относительно равномерное распределение L . Логично предположить, что подобный вертикальный профиль должен отражать структуру посевов большинства узколистных злаков в период после формирования колоса и до интенсивного отпада листьев. Большинство опубликованных экспериментальных данных для разнообразных естественных и искусственных травостоев указывает на то, что наибольшую выраженность вертикальной стратификации полога следует ожидать в очень густых РП. Для остальных вариантов травяных ценозов можно в первом приближении принять допущение об относительно равномерном распределении L в слое, составляющем 0,7—0,9 от общей высоты РП.

* * *

Таким образом, конкретные значения L агроценозов и естественных травостоев могут варьировать в широких пределах. Причем для посева одной культуры временные и пространственные изменения L соизмеримы между собой. В качестве относительно характерного видового признака можно рассматривать значения $L_{\text{опт}}$ и $L_{\text{макс}}$. Однако для реальных травяных ценозов опубликованных экспериментальных данных недостаточно для систематизации $L_{\text{опт}}$ и $L_{\text{макс}}$. Устойчивым видовым признаком являются фенологические ритмы развития и связанная с ними динамика $L_{\text{л}}/L$ и $\gamma_{\text{з}}$, а также период формирования максимальных значений L , $L_{\text{л}}$ и их максимальных приростов. Именно эти данные могут служить основой для адаптации теоретических моделей отражения типа модели Гоудриана к посевам конкретных культур и к естественным травостоям.

2.4. Пространственная ориентация фитоэлементов

2.4.1. Общие замечания

Пространственная ориентация фитоэлементов (распределение их площади по углам наклона и азимуту) является одним из основных параметров структуры РП. Этот параметр определяет площадь поверхности, взаимодействующей с потоками радиации при различных углах падения солнечных лучей, площадь и распределение просветов в пологе, а также взаимное затенение и

площадь теней на поверхности почвы. При эмпирическом подходе, в том числе и в регрессионных моделях отражения [32, 44, 54, 126 и др.], пространственная ориентация учитывается косвенно через эмпирические коэффициенты для различных РП и их состояний. Теоретические модели позволяют вскрыть характер воздействия этого параметра структуры на рассеяние и поглощение излучения в РП.

До недавнего времени соответствующие расчеты и экспериментальная их проверка были выполнены преимущественно при исследовании закономерностей пропускания и поглощения [12, 36, 46, 57, 122 и др.] и в меньшей степени для A_λ [46, 99, 108] и b_λ [73, 106, 130]. Ограниченное число работ, в которых экспериментально проверено влияние собственно пространственной ориентации на радиационные потоки в РП, объясняется трудоемкостью измерения этого параметра. В то же время недостаточный объем экспериментальных данных определяет и отсутствие исследований по адаптации теоретических моделей отражения к конкретным РП, а также по чувствительности моделей к природной изменчивости пространственной ориентации. Для восполнения указанного пробела в настоящем разделе приводятся результаты обобщения литературных данных и материалов собственных измерений пространственной ориентации для основных сельскохозяйственных культур. Отметим, что после выхода монографий Ю. К. Росса [46] и Х. Г. Тооминга [57] немного было публикаций по пространственной ориентации. Но ни в одной из отечественных монографий [10, 30, 32, 44 и др.] пространственная ориентация не рассматривалась в рамках проблемы дистанционного зондирования РП.

2.4.2. Методические вопросы определения пространственной ориентации фитоэлементов

Учитывая круг специалистов, на которых рассчитана монография, кратко изложим методики расчета по [46, 49, 50] и полевых измерений пространственной ориентации.

2.4.2.1. Основные характеристики

В уравнениях переноса радиации в РП ориентация фитоэлементов характеризуется дифференциальной функцией пространственной ориентации $g(r_\phi)$, где $r_\phi = (\phi_\phi \theta_\phi)$ — направление нормали к верхней стороне фитоэлемента или его части (θ_ϕ — угол наклона, отсчитываемый от вертикали, ϕ_ϕ — азимут, отсчитываемый от севера по часовой стрелке). Причем

$$g = \frac{\Delta s_{\phi_i}}{\sum_i s_{\phi_i}} \frac{1}{\Delta \Omega}, \quad (2.7)$$

где $\Delta \Omega$ — единичный телесный угол вокруг направления r_ϕ ; $\Delta \Omega = \sin \theta_\phi \Delta \theta_\phi \Delta \phi_\phi$; Δs_{ϕ_i} — площадь поверхности фитоэлементов, ори-

ентированных в направлении r_Φ ; $\sum_i s_{\Phi_i}$ — общая площадь поверхности фитоэлементов в заданном объеме РП.

Условием нормирования (2.7) является выражение

$$\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} g(\theta_\Phi, \varphi_\Phi) d\varphi_\Phi \sin \theta_\Phi d\theta_\Phi = 1. \quad (2.8)$$

На практике функция $g(r_\Phi)$ обычно определяется для шести 15-градусных интервалов по углу наклона θ_Φ и восьми 45°-ных секторов по φ_Φ , т. е. всего для 48 градаций. Поэтому условием нормирования принимается выражение

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^8 g(r_\Phi) = 1. \quad (2.9)$$

Дифференциальная функция $g(r_\Phi)$ связана с интегральной G -функцией распределения ориентации в пространстве соотношением

$$G(r) = \int_{2\pi} g(r_\Phi) |\cos \widehat{r_\Phi r}| d\Omega, \quad (2.10)$$

где $r = r(\theta_\odot, \varphi_\odot)$, $\theta_\odot$ — зенитное расстояние Солнца, $\varphi_\odot$ — азимут Солнца (и/или зенитный угол и азимут визирования);

$$\cos \widehat{r_\Phi r} = \cos \theta \cos \theta_\Phi + \sin \theta \sin \theta_\Phi \cos(\varphi - \varphi_\Phi). \quad (2.11)$$

G -функция является проекцией единицы площади поверхности фитоэлементов на поверхность, перпендикулярную направлению r .

Для посевов многих сельскохозяйственных культур и естественных травостоев можно принять, что g и G -функция не зависят от φ_Φ [3, 23, 35, 46, 50, 51, 71 и др.]. Тогда (2.8) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} g'(\theta_\Phi) \sin \theta_\Phi g''(\varphi_\Phi) d\theta_\Phi d\varphi_\Phi &= \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} g^*(\theta_\Phi) \frac{1}{2\pi} d\theta_\Phi d\varphi_\Phi = \\ &= \int_0^{\pi/2} g^*(\theta_\Phi) d\theta_\Phi = 1, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $g^*(\theta_\Phi)$ определяет вероятность того, что нормали фитоэлементов ориентированы в единичном интервале угла наклона θ_Φ . Однако в случае густых рядковых посевов, когда распределение L имеет максимум в перпендикулярном рядкам направлении, а также для культур с выраженным геолитотропизмом (подсолнечник, соя, фасоль, хлопчатник), нельзя пренебрегать зависимостью G -функции от азимута. В то же время практически для всех видов (включая и древесную растительность) неравномерное распределение по азимуту чаще всего наблюдается при послойном анализе ориентации. В этом случае особенности ориентации отра-

жают адаптацию растений к радиационному режиму [12]. Но для всего сообщества или для одной кроны формируется преимущественно суммарное равномерное распределение фитоэлементов по φ_{Φ} .

При допущении о независимости g -функции от φ_{Φ} де Вит [148] предложил несколько теоретических типов распределения фитоэлементов по θ_{Φ} (рис. 2.8), из которых при моделировании радиационного режима и продуктивности РП обычно рассматриваются три типа ориентации: сферическая, вертикальная и горизонтальная. Предполагается, что эти типы характеризуют наиболее распространенный и экстремальные типы ориентации в природе. При горизонтальной ориентации $G(\theta) = \cos \theta$, при вертикальной —

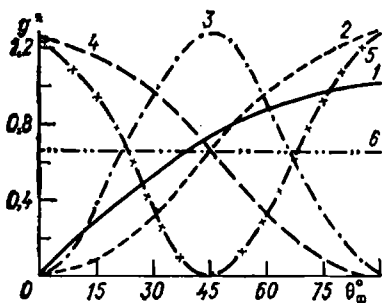


Рис. 2.8. Модельные функции распределения угла наклона фитоэлементов [148].

Ориентация фитоэлементов: 1 — сферическая ($g^* = \sin \theta_{\Phi}$), 2 — эректофильная ($g^* = 2(1 - \cos 2\theta_{\Phi})/\pi$), 3 — плагиофильная ($g^* = 2(1 - \cos 4\theta_{\Phi})/\pi$), 4 — планофильная ($g^* = 2(1 + \cos 2\theta_{\Phi})/\pi$), 5 — экстремофильная ($g^* = 2(1 + \cos 4\theta_{\Phi})/\pi$), 6 — равномерная ($g^* = 2/\pi$).

$G(\theta) = (2 \sin \theta)/\pi$, при сферической — $G(\theta) = 0,5$. Для расчета функций $G(\theta)$ можно использовать таблицы Рива из [57], а для $G(\theta, \varphi)$ — вспомогательные таблицы, приведенные в [23]. Отметим, что сферическая ориентация листьев, считается наиболее характерной для травяных сообществ и, кроме того, является простейшим вариантом для моделирования. При выявлении отклонений реального распределения θ_{Φ} от сферического, а также с целью экспертных оценок типа распределения применяется индекс угла наклона χ_{Φ} , который рассчитывается для интервалов θ_{Φ} в 30° :

$$\chi_{\Phi} = \pm \frac{1}{2} [(0,13 - g_1) + (0,37 - g_2) + (0,50 - g_3)], \quad (2.13)$$

где g_{1-3} — доли поверхности фитоэлементов, имеющие θ_{Φ} в интервалах $0-30^\circ$, $30-60^\circ$ и $60-90^\circ$ соответственно. Знак χ_{Φ} определяется знаком разности $(0,5 - g_3)$. Значения χ_{Φ} изменяются от -1 (вертикальная ориентация) до $+1$ (горизонтальная ориентация).

В некоторых упрощенных теоретических моделях для характеристики ориентации используется средний угол наклона $\bar{\theta}_{\Phi}$ [84,

107]. Для теоретических типов ориентации (рис. 2.8) $\bar{\theta}_{\Phi}$ равен: для сферической — $57,5^\circ$, планофильной — $26,8^\circ$, эректофильной — $63,2^\circ$, экстремофильной и плагиофильной — 45° , горизонтальной — 0° и вертикальной — 90° .

При расчете суммарной $\bar{G}$ -функции, учитывающей ориентацию всех фитоэлементов (листьев, стеблей, репродуктивных наземных органов), вводятся весовые коэффициенты β_i (см. 2.3.2.1):

$$\bar{G} = \beta_l G_l + \beta_{ст} G_{ст} + \beta_p G_p. \quad (2.14)$$

Однако на сегодня вся информация по рассматриваемому вопросу практически ограничена данными о пространственной ориентации только листьев.

2.4.2.2. Измерения характеристик пространственной ориентации

Как уже отмечалось, методика полевых измерений пространственной ориентации очень трудоемка. Причем простота измерений угловых координат в поле с помощью модифицированного транспортира с отвесом и компасом сочетается с большим объемом камеральных работ. Несколько сократить трудозатраты можно, предположив, что все листовые пластинки (и/или фитоэлементы) имеют равную площадь поверхности, т. е. допустив, что распределение числа фитоэлементов с координатами θ_{ϕ_i} и φ_{ϕ_i} практически совпадает с распределением площади поверхности фитоэлементов с теми же координатами. Такой прием, например, был использован в [2]. Но при работе по упрощенной методике существенно возрастают объемы выборок, за исключением случаев, когда θ_{ϕ} в пределах фитоэлемента есть величина постоянная.

Сравнение разных методик, проведенное нами, показало, что сопоставимые результаты получаются, если соблюдаются следующие объемы выборок числа листьев (при заданной максимальной ошибке определения среднего 0,05 и $P=0,95$): для озимой и яровой пшеницы на ранних фенофазах — около 200 измерений, на поздних — не менее 400; для кукурузы и райграса — не менее 450; для сои — не менее 670 и для картофеля — не менее 300—900 измерений (причем для картофеля объем выборки увеличивается для сортов с более горизонтальными листьями).

Одним из экспериментальных методов определения g^* -функции является метод наклонной иглы или точечных квадратов.¹ При этом методе полог «прокалывается» тонкой длинной иглой в различных направлениях $r=r(\theta, \varphi)$. Число контактов конца иглы с фитоэлементами (v_{ϕ}) зависит от плотности заполнения поверхностью фитоэлементов объема РП (u_{ϕ}) и ориентации фитоэлементов:

$$v_{\phi} = \int_0^{\pi/2} A g^* d\theta_{\phi}, \quad (2.15)$$

где значения A находятся по таблицам Рива (например, в [57]), как $A = (\cos \hat{r}_{\phi} r)$.

¹ См. работы I. R. Philip (1965 г.) и I. Warren Wilson (1960 и 1963 гг.).

Метод наклонной иглы, несмотря на явные преимущества перед прямыми методами в плане точности определения g^* -функции, тоже трудоемок. Число контактов должно быть не менее 1000 [13 и др.], к тому же велик объем дальнейших расчетов. Кроме того, метод имеет и технические ограничения. Во-первых, необходимо соблюсти соизмеримость толщины иглы с размерами фитоэлементов, и это ограничение особенно значимо для узколистных трав. Во-вторых, увеличивается громоздкость конструкции при $H > 100 \div 150$ см. Но в целом метод наклонной иглы является наиболее точным из всех существующих методов измерения ориентации.

Предложены также косвенные методы определения g^* -функции на основе подсчета частоты просветов по фотографиям полога, сделанным вверх с поверхности земли, или по измерениям с помощью различных реек пропускания радиации в РП. Однако эти способы не нашли широкого применения, так как их нельзя использовать в густых РП без нарушения структуры растительности.

2.4.3. Закономерности изменения пространственной ориентации фитоэлементов в посевах сельскохозяйственных культур

2.4.3.1. Факторы, определяющие ориентацию фитоэлементов

Азимутальное расположение листьев на растении в первую очередь определяется видовой генетической спиралью, которая есть эволюционно закрепленный признак приспособления листьев к минимальному взаимному затенению. Угол наклона листовой пластинки зависит от светолюбия и анатомических свойств вида, а также есть результат приспособления к максимально возможному поглощению солнечной радиации всем растением в конкретных условиях произрастания. Водный режим дополнительно регулирует угол наклона фитоэлементов, причем наглядно действие этого фактора проявляется при изменении θ_f при завядании в результате снижения тургора [109, 140]. На фоне видовой специфики параметрами, определяющими пространственную ориентацию, является N и соотношение площади поверхности различных фракций растений. Отсюда следует, что ориентация должна изменяться в результате действия всех факторов, влияющих на N и β_i . Отдельную группу составляют факторы, связанные с аномальными и стрессовыми явлениями (например, полегание, отдельные виды заболеваний и поражения растений и т. п.), а также с метеорологическими явлениями (то же полегание, но вследствие засухи, сильного ветра, града).

Опубликованные к настоящему времени данные не охватывают весь возможный диапазон изменения ориентации от перечисленных выше факторов даже на примере одной культуры. В ряде случаев можно говорить о тенденциях и ориентировочно — о масштабах изменения характеристик ориентации.

2.4.3.2. Видовые и сортовые различия в ориентации

На основе опубликованных количественных оценок [1, 2, 23, 35, 46, 49, 50, 71, 121, 148 и др.] и результатов собственных наблюдений, *виды сельскохозяйственных растений* можно классифицировать по следующим типам ориентации: а) *планофильный* (преобладают горизонтальные листья) — конские бобы, клевер, картофель, подсолнечник, в отдельные часы дня — соя и фасоль; б) *эректофильный* (преобладают вертикально расположенные листья) — на определенных стадиях развития ячмень, рожь, пшеница, райграс; в) *плагнофильный* (листья расположены преимущественно под углом 45°) — люцерна, гибридная брюква; г) *сферический* (площадь листьев, имеющих одинаковый угол наклона, растет при увеличении угла пропорционально его синусу) — зерновые культуры и травы (ячмень, рожь, кукуруза, пшеница, сорго, райграс, тимopheевка и т. п.).

Очевидно, что эта классификация является самой общей и дает представление о среднем для вегетационного периода типе ориентации листьев нормально развитых растений. Устойчивость типа ориентации как видовой характеристики подтверждается данными Е. В. Абашиной [1—3], полученными на примере ячменя для вегетационных периодов с различными погодными условиями, а также нашими данными для озимой пшеницы (табл. 2.27).

Таблица 2.27

Изменение характеристик пространственной ориентации листьев озимой пшеницы Безостая 1 в различные годы. Херсонская область (объем выборки n для каждого варианта более 250)

Фенофаза	Год	Густота, взк/м ²	$\bar{e}_L^*(\theta_L)$			$\bar{\theta}_L^*$	χ_L	λ_K
			0—30°	31—60°	61—90°			
Цветение	1978	250—360	0,236	0,357	0,407	49	0,10	0,33
	1981	250—360	0,252	0,380	0,368	48		
	1978	500—600	0,089	0,439	0,472	55	0,07	0,76
	1981	500—600	0,150	0,257	0,593	58	0,14	
Молочно-восковая спелость	1978	250—360	0,290	0,240	0,470	51	0,16	0,40
	1980	250—360	0,247	0,283	0,469	52	0,12	
	1979	400—500	0,277	0,265	0,458	51	0,15	0,89
	1980	400—500	0,230	0,303	0,447	52	0,10	

Примечание. λ_K — критерий Колмогорова для сравниваемых пар распределений (различия статистически недостоверны).

Сортовые различия в пространственной ориентации листьев одного вида зависят от селекции сортов. Наиболее полные данные по этому вопросу в литературе относятся к кукурузе. Для районированных в СССР сортов кукурузы характеристики ориентации близки между собой [23, 46] и совпадают с таковыми для сортов, исследованных во Франции [121] и в Голландии [148]. Но у американских сортов при однотипной густоте посевов отмечается

резкое увеличение доли горизонтально ориентированных листьев.¹ Для ячменя сортовые различия были выявлены при анализе сезонной динамики углов наклона листьев. Сорт Домен, районированный в Эстонии [35], Винер и Московский 121 в Калужской области [3] обнаружили относительную стабильность $g_{\text{л}}^*$ -функции в течение вегетационного периода. Московский 121 в условиях Новгородской области характеризуется явно выраженной сезонной динамикой ориентации листьев: в период 7—8-го листа увеличивается доля вертикально ориентированных листьев по сравнению с ранней фенофазой 3—5-го листа [2]. Для сои также были выявлены некоторые сортовые различия в ориентации листьев [71], которые подтвердились результатами наших измерений (см. ниже). Среди 11 районированных в СССР сортов картофеля [25] при доминировании на фенофазе начало клубнеобразования планофильной ориентации отклонения $\bar{\theta}_{\text{лс}}$ отдельных сортов от

среднего для культуры значения $\bar{\theta}_{\text{л}}$ варьируют от —41 до 56 %, отклонения $G_{\text{с}}$ -функции — от —13 до 17 %. Также существенно выражены сортовые различия в ориентации листьев у некоторых сортов пшеницы (табл. 2.28), причем при близких значениях

Таблица 2.28

Характеристики пространственной ориентации листьев озимой (Одесская и Безостая 1) и яровой (Саратовская 42) пшеницы. Херсонская область

Пшеница	Фенофаза	Густота, экз/м ²	$g_{\text{лс}}^*$			$\theta_{\text{лс}}^*$	$G_{\text{лс}}$	$\lambda_{\text{К}}$
			0—15°	16—30°	31—45°			
Одесская	Цветение	500	0,158	0,068	0,075			
Безостая 1		500	0,192	0,026	0,136			
Саратовская 42		382	0,117	0,202	0,240			
Безостая 1	Молочная спелость	363	0,115	0,120	0,139			
Саратовская 42		382	0,154	0,124	0,216			
Безостая 1		200—480	0,136	0,040	0,093			
Пшеница	Фенофаза	Густота, экз/м ²	$g_{\text{лс}}^*$			$\theta_{\text{лс}}^*$	$G_{\text{лс}}$	$\lambda_{\text{К}}$
			46—60°	61—75°	76—90°			
Одесская	Цветение	500	0,147	0,247	0,305	55	0,50	1,35
Безостая 1		500	0,204	0,130	0,312	52	0,54	
Саратовская 42		382	0,258	0,144	0,038	41	0,71	
Безостая 1	Молочная спелость	363	0,223	0,351	0,056	49	0,61	2,13
Саратовская 42		382	0,199	0,094	0,213	46	0,62	
Безостая 1		200—480	0,281	0,280	0,170	53	0,54	

¹ По данным R. S. Loomis, W. A. Williams (1968, 1969 гг.).

$\theta_{\text{лс}}$ за счет особенностей $q_{\text{л}}^*$ -функции формируются достоверные различия между распределениями $\theta_{\text{л}}$.

В целом рассмотренный материал позволяет предполагать, что характеристики пространственной ориентации являются устойчивым видовым и сортовым признаком. Между сельскохозяйственными культурами различия проявляются не столько в значениях средних углов наклона листьев или их дисперсий, сколько в типе дифференциальных функций распределения $\theta_{\text{л}}$.

2.4.3.3. Временная изменчивость пространственной ориентации

Как уже отмечалось выше, *межгодовая изменчивость* ориентации для одного сорта выражена незначительно (см., например, табл. 2.27).

Сезонная динамика для одного сорта при фиксированной N и однотипных условиях произрастания определяется изменением как ориентации листьев, так и значений $\beta_{\text{л}}$. Экспериментально доказано, что максимальное варьирование ориентации листьев в течение вегетации характерно для узколистных злаков [23, 24, 46, 148 и др.], хотя в работе Т. Horie, T. Udagawa (1970 г.) на примере одного посева подсолнечника было выявлено увеличение

на поздних фенофазах $\bar{\theta}_{\text{л}}$ на 20° по сравнению с периодом листообразования. В то же время для ячменя в [3] было установлено сохранение сферической ориентации листьев в течение всей вегетации. Однако за счет снижения $\beta_{\text{л}}$ от 95—100 % на фенофазе 3-й лист до 35—80 % при восковой спелости на поздних фенофазах формировались отклонения от сферической ориентации в сторону большей вертикальности. При этом значения $\beta_{\text{л}} = L_{\text{л}}/L$ мало зависели от погодных условий и N (при нормах высева 3—8 млн/га). Следовательно, сезонную динамику ориентации ячменя можно рассматривать как устойчивый видовой (сортовой) показатель структуры посева.

В посевах озимой пшеницы при максимальной разнице в $\bar{\theta}_{\text{л}}$ за период от выхода в трубку до восковой спелости $11—15^\circ$ (табл. 2.29) между $g_{\text{л}}^*$ -функциями формируются статистически достоверные различия, за исключением завершающих фенофаз (табл. 2.29 и 2.30). Из сравнения $\sigma_{\theta_{\text{л}}}$, полученных при различном осреднении (табл. 2.29), следует важный методический вывод о том, что эмпирические функции распределения $\theta_{\text{л}}$, оцененные по данным измерений на одном поле (при достаточной выборке), можно распространять на совокупность полей, посевы на которых находятся в одной фенофазе.

Характерной чертой для озимой пшеницы является доминирование вертикально ориентированных листьев в весенние фенофазы. На более поздних стадиях развития ориентация листьев приближается к сферической, а отклонения от этого типа связаны в основном с увеличением вероятности горизонтальных листьев

Таблица 2.29

Средние характеристики пространственной ориентации фитоэлементов в посевах озимой пшеницы Безостая 1 в различные фенофазы. Херсонская область (средние данные за 1978—1983 гг.)

Фенофаза	Совокупность полей			Одно поле				
	$\theta_{\text{л}}^{\circ}$	$\pm \sigma_{\theta_{\text{л}}}^{\circ}$	$\theta_{\text{ф}}^{\circ}$	$\theta_{\text{л}}^{\circ}$	$\pm \sigma_{\theta_{\text{л}}}^{\circ}$	$\theta_{\text{л}}^{\circ}$	$\pm \sigma_{\theta_{\text{л}}}^{\circ}$	$\lambda_{\text{к}}$
	$N = 200 \div 500 \text{ экз/м}^2$			$N = 360 \text{ экз/м}^2$		$N = 480 \text{ экз/м}^2$		
Выход в трубку	65	25	70	68	21	75	15}	7,0
Колошение	57	26	70	57	28	57	22}	
Цветение	59	21	71	48	20	55	17}	7,0
Молочная спелость	52	26	72	—	—	—	—}	
Молочно-восковая спелость	52	26	76	51	28	—	—}	0,9
Восковая спелость	53	26	83	—	—	45	27}	

Примечание. $\lambda_{\text{к}}$ — критерий Колмогорова для сравниваемых распределений углов наклона листьев $\theta_{\text{л}}^{\circ}$ по совокупности полей.

Таблица 2.30

Характеристики распределения углов наклона листьев $g^*(\theta_{\text{л}})$ озимой пшеницы Безостая 1 в различные фенофазы. Херсонская область (средние данные за 1978—1983 гг.)

Фенофаза	0—15°	16—30°	31—45°	46—60°	61—75°	76—90°
Выход в трубку	0,120	0,030	0,050	0,080	0,160	0,560
Колошение	0,100	0,130	0,050	0,100	0,300	0,320
Цветение	0,110	0,040	0,080	0,230	0,290	0,270
Молочная спелость	0,180	0,040	0,090	0,260	0,190	0,240
Восковая спелость	0,150	0,060	0,120	0,190	0,220	0,260
Средние за период ВТ—ВС	0,170	0,050	0,090	0,190	0,220	0,280

(табл. 2.29). Если в целом $\bar{\theta}_{\text{л}}$ снижается к поздним фенофазам, то $\bar{\theta}_{\text{ф}}$ достигают в этот период максимума (табл. 2.29). Понятно, что специфика изменения $\theta_{\text{ф}}$ обусловлена сезонной динамикой $\beta_{\text{л}}$, которая определяет также итоговое значение суммарной G -функции (табл. 2.31).

Из сравнения данных, приведенных в табл. 2.27 и 2.29—2.31, следует, что в посевах пшеницы при фиксированной N сезонная динамика ориентации превышает ее межгодовую изменчивость. В целом сезонная динамика характеристик ориентации в сочетании с динамикой L является общим признаком структуры РП. Поэтому сопоставление этих параметров в одни календарные сроки

Таблица 2.31

Доля площади листьев в суммарной фито площади $\bar{L}_л/\bar{L}$, интегральные функции пространственной ориентации листьев ($\bar{G}_л$) и всех фитоэлементов ($\bar{G}$) в посевах озимой пшеницы (сорт Безостая 1) на различных этапах вегетации ($\theta=0^\circ$). Херсонская область (средние данные за 1978—1983 гг.)

Фенофаза	$\bar{L}_л/\bar{L}$	$\bar{G}_л$	$\Delta\bar{G}_л \%$	$\bar{G}$	$\Delta\bar{G} \%$
Выход в трубку	0,9	0,360	—28	0,337	—33
Колошение—цветение	0,6	0,476	—4	0,338	—32
Молочная спелость	0,5	0,553	+11	0,341	—32
Молочно-восковая спелость	0,2	0,534	+7	0,212	—58

Примечание. $\Delta\bar{G}$ — отклонения от $\bar{G}$ при сферической ориентации.

может дать ценную информацию для распознавания посевов разных культур при доминировании зеленого цвета растительности (табл. 2.32).

Таблица 2.32

Характеристики распределения углов наклона листьев (g^*) в посевах различных культур в одни календарные сроки. Херсонская область

0—15°	16—30°	31—45°	46—60°	61—75°	76—90°	$\bar{\theta}_л^\circ$
-------	--------	--------	--------	--------	--------	------------------------

27—30 мая

Кукуруза, фенофаза 3-й лист, $N=6+8 \text{ р/м}^2$

0,210 | 0,090 | 0,220 | 0,260 | 0,150 | 0,070 | 43

Озимая пшеница, фенофаза колошение, $N=360+500 \text{ экз/м}^2$

0,100 | 0,130 | 0,060 | 0,100 | 0,290 | 0,320 | 57

7—9 июня

Кукуруза, фенофаза 5-й лист, $N=6+8 \text{ р/м}^2$

0,170 | 0,090 | 0,110 | 0,360 | 0,170 | 0,100 | 45

Озимая пшеница, фенофаза цветение, $N=360+500 \text{ экз/м}^2$

0,120 | 0,120 | 0,130 | 0,220 | 0,350 | 0,060 | 49

18—24 июня

Кукуруза, фенофаза 8—9-й лист, $N=7+9 \text{ р/м}^2$

0,190 | 0,080 | 0,170 | 0,360 | 0,080 | 0,120 | 44

Соя, фенофаза конец листообразования, $N=27+36 \text{ раст/м}$ (10—12 ч)

0,300 | 0,060 | 0,080 | 0,090 | 0,080 | 0,390 | 49

Суточные изменения пространственной ориентации в основном необходимо учитывать для культур с выраженным гелиотропизмом (подсолнечник, соя, хлопчатник, фасоль), для которых также типична зависимость g -функции от Φ_{ϕ} (см. табл. 2.32, а также [46, 51, 71, 106, 115 и др.]). Например, в посевах типичного представителя таких растений — подсолнечника ориентация листьев в середине дня близка к горизонтальной, а в утренние и вечерние часы — к вертикальной. Из-за выраженной адаптации гелиотропов опубликованные по ним данные, полученные при разных условиях освещения и на различных широтах, обычно плохо сопоставимы.

Наряду с вариациями g -функции, обусловленными адаптацией к условиям освещения, возможны еще более высокочастотные колебания, связанные с усилением ветра и сменой его направления, с изменением тургора растений. Выделение высокочастотных составляющих суточных колебаний g -функции требует особо тщательного проведения опытов при соблюдении необходимых объемов выборок. Обширные исследования дневной динамики ориентации листьев выполнены Е. А. Денисенко [24], но результаты пока не доведены до оценки статистической значимости различий в характеристиках ориентации. Помимо этого автора, практически ни у кого нет данных об изменении в течение дня ориентации у видов, не являющихся гелиотропами. Результаты, приведенные в [13], косвенно характеризуют изменение ориентации в посевах кукурузы через изменение B при разных скоростях ветра. Согласно этим данным, только при скорости ветра более 6—7 м/с при фиксированных L значение B отклоняется на 13—17 %.

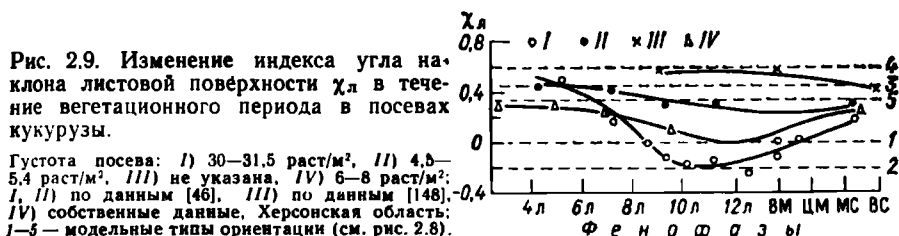
В целом слабая изученность временной изменчивости ориентации ограничивает область приложения результатов численных экспериментов к посевам конкретных культур и одновременно затрудняет интерпретацию измеренных b_{λ} . Особо стоит обратить внимание на полное отсутствие данных об изменениях ориентации адаксиальной и абаксиальной сторон листа, которые в определенных ситуациях могут оказать существенное воздействие на яркостные характеристики и поляризационные свойства растительности.

2.4.3.4. Влияние условий произрастания

Прежде всего условия произрастания могут влиять на ориентацию опосредованно через *густоту посева*, хотя воздействие N может рассматриваться и в фенологическом аспекте. По данным [1—3] не было установлено значимых различий в ориентации листьев для посевов ячменя при разных нормах высева. Также не было выявлено нами влияние собственно N на примере озимой пшеницы при изменении N от 200 до 800 экз/м². В посевах кукурузы реакция ориентации листьев проявляется только при сравнении экстремальных по N вариантов на фенофазах 8—12-го листа (рис. 2.9).

При оценке *погодных условий* (для нормальных по увлажнению, избыточно и умеренно влажных лет) в посевах ячменя [1] и озимой пшеницы (см. 2.4.3.3) не было выявлено достоверных

различий в ориентации листьев. Однако в последних при аномально ранней и устойчивой засухе в период молочная — полная спелость наблюдалось сохранение такой же ориентации, как и на фенофазах колошение — цветение. При полегании пшеницы от избыточной влажности или по какой-либо другой причине отмечалось изменение ориентации стеблей и колосьев в сторону планофильной. Но средние характеристики ориентации при полегании зависят от его интенсивности и плотности полога. Если $\bar{L} > 4 \div 5$, то листья практически наклонены под тем же углом, что и стебли с колосьями. Если $\bar{L} < 3$, то листья сохраняют ориентацию, ха-



рактерную для текущей фенофазы, но как бы развернутую в плоскости полегших стеблей и колосьев.

При разных дозах и видах удобрений различия в ориентации листьев в случае одинаковой N при фиксированной фенофазе оказались статистически недостоверными в посевах ячменя [35] и райграса (табл. 2.33). Но так как в посевах с усиленной подкорм-

Таблица 2.33

Характеристики пространственной ориентации листьев в посевах райграса итальянского при различных дозах минеральных удобрений на фенофазе колошение

Доза удобрений	ϵ_l^*						χ_l	$\bar{\theta}_l$	$\bar{G}(0)$
	0—15°	16—30°	31—45°	46—60°	61—75°	76—90°			
1	0,150	0,136	0,146	0,178	0,188	0,202	+0,16	48,4	0,644
2	0,126	0,191	0,131	0,231	0,226	0,095	+0,19	45,4	0,597

Примечание. 1 — $N_{120}P_{60}K_{45}+N_{60}$; 2 — $N_{90}P_{60}K_{30}+N_{30}$; критерий Колмогорова для двух сравниваемых распределений равен 1,07; значение $\bar{G}(0)$ дано для надира.

кой увеличивается доля стеблей и колосьев в суммарной L , то очевидным результатом этого является отклонение ориентации в сторону вертикальности (табл. 2.34).

Таблица 2.34

Характеристика структуры посевов райграса итальянского при различных дозах минеральных удобрений на фенофазе колошение

Доза удобрений	L_d	$\bar{L}$	$L_d/\bar{L}$	$\bar{\theta}_\phi$	$\bar{\sigma}(0)$
$N_{180}P_{120}K_{80} + N_{90}$	1,77	6,52	0,27	78,3	0,259
$N_{120}P_{60}K_{45} + N_{30}$	1,97	5,18	0,38	73,0	0,325
$N_{90}P_{60}K_{30} + N_{30}$	1,18	2,61	0,45	71,3	0,340

2.4.4. Влияние пространственной ориентации на связь между относительной поверхностью фитоэлементов и проективным покрытием

Пространственная ориентация совместно с типом размещения фитоэлементов в пространстве определяет вид зависимости между L и B (см. 2.3.2.2). В общем виде B находится из формулы для доли просветов как

$$B = 1 - \exp\left[-\frac{1}{D} \frac{G}{\cos \theta} L\right], \quad (2.16)$$

где D — относительная дисперсия — параметр, характеризующий тип размещения фитоэлементов в пространстве. При случайном типе $D=1$, при регулярном, когда наблюдается упорядоченность в размещении (например, рядковый посев), $D < 1$, при групповом (или контагиозном), когда фитоэлементы формируют «пятнистую» структуру, $D > 1$. При случайном типе размещения, довольно широко распространенном в природных РП [12] и принимаемом в качестве основного приближения во многих моделях отражения, для надира ($\theta=0^\circ$)

$$B = 1 - \exp(-GL), \quad (2.17a)$$

или с учетом только среднего угла наклона фитоэлементов

$$B = 1 - \exp(1 - L \cos \bar{\theta}_\phi). \quad (2.17b)$$

Из (2.10) и (2.16) очевидно, что B при прочих равных условиях зависит от угла визирования, и эта зависимость должна учитываться при интерпретации данных сканера. Насколько существенно отклонение B от значений, полученных по стандартной методике (т. е. для $\theta=0^\circ$), зависит от конкретной структуры РП и угла визирования. Например, для посевов кукурузы в период от 9-го листа до выметывания метелки по измерениям с помощью наклонной иглы было установлено, что пренебрежение зависимостью B от θ в интервале $\theta=0 \div 40^\circ$ возможно только при B более 85 %, а при меньшей сомкнутости полога допустимые 10 %-ные ошибки в оценках B реальны при отклонении θ от надира не более чем на 10° [13]. Из (2.16)—(2.17) также следует, что B увеличивается при больших L и при отклонениях ориентации в сторону горизонтальности (табл. 2.35).

Таблица 2.35

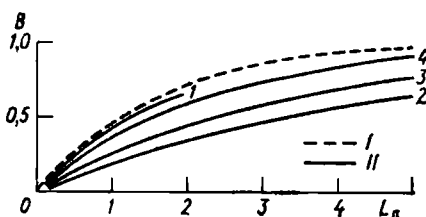
Расчетные значения проективного покрытия (%) в зависимости от пространственной ориентации и относительной поверхности фитоэлементов L при случайном типе их размещения (надир)

Ориентация	L			
	1	2	3	5
Горизонтальная	63	86	95	100
Сферическая	39	63	78	92
Вертикальная	12	23	32	48

Теоретически для фиксированного значения L максимальное B может наблюдаться в РП с горизонтальными фитоэлементами при регулярном их размещении в пространстве, минимальное — в случае вертикальной ориентации и групповом типе размещения. Значимость типа размещения и ориентации в определении вида эмпирических зависимостей B от L подтверждается рис. 2.10. Измеренные с помощью наклонной иглы в посевах кукурузы значения B оказались ниже, чем рассчитанные по (2.17) в предположении сферической ориентации и случайного типа размещения.¹ При этом наибольшие отклонения (кривая 2 на рис. 2.10) были выяв-

Рис. 2.10. Зависимость между относительной поверхностью листьев L_d и проективным покрытием B в посевах кукурузы (среднеспелые сорта) в период фенофаз 9-й лист—выметывание метелки. Херсонская область.

I — теоретически возможная зависимость при $D=1$ и $G=0.6$; II — экспериментальные данные: 1) $N=3+4$ п/м², $D=1.07$, $\theta_\phi=57^\circ$, 2) $N=5+8$ п/м², $D=2.20$, $\theta_\phi=64^\circ$, 3) $N=5+8$ п/м², $D=2.37$, $\theta_\phi=47^\circ$, 4) $N=8+10$ п/м², $D=1.15$, $\theta_\phi=59^\circ$.



лены на участке с групповым размещением ($D=2.2$) и большим θ_ϕ (64°). Для отрезка экспоненты, описывающей связь B и L , при значениях B менее 50 % можно пользоваться линейными зависимостями (табл. 2.36).

Несколько отвлекаясь от рассмотрения непосредственно входных параметров модели, отметим, что обследованные посевы кукурузы были с выраженным рядковым размещением растений, а результирующим типом пространственного размещения фитоэлементов в редком и густом посевах оказался случайный тип,

¹ Всего было проведено 36 серий измерений на площадках 2×2 м при направлении иглы параллельно рядам, L определялась независимо от B весовым методом [13].

Таблица 2.36

Зависимость между относительной поверхностью листьев L_d и проективным покрытием B (%) в посевах озимой пшеницы Безостая 1

Фенофаза	Состояние посева	r^1	η^1	Вид зависимости $L_d = f(B)$
Кушение	Плохое—хорошее	0,93		$-0,0544 + 0,0405 B$ при $B < 50 \%$
Выход в трубку— начало стеблеобра- зования	То же	0,83		$0,323 + 0,0354 B$ при $B < 30 \%$
Молочная—молоч- но-восковая спе- лость	Плохое—удовлет- ворительное	0,45	0,61	$-0,433 + 0,417 B$ при $B < 50 \%$

¹ При уровне значимости 0,05.

в средних по густоте—групповой. В посевах пшеницы (независимо от рядкового или смешанного способа сева) с помощью иглы был выявлен случайный тип размещения фитоэлементов. Однако этот результат требует дополнительной проверки на большем материале. В целом оценка статистического закона размещения фитоэлементов сопряжена с наибольшими трудностями в комплексе фитометрических наблюдений. Отсюда и очевидная ограниченность экспериментальных данных по этому вопросу. Опираясь на имеющиеся данные и учитывая известное свойство растений максимально заполнять объем воздуха в РП, можно принять справедливым допущение о пуассоновском размещении фитоэлементов в теоретических моделях отражения на этапе исследования последних. Но при проверке адекватности моделей для конкретных агроценозов или естественных травостоев вполне возможно, что несоответствие типа размещения пуассоновскому закону вызовет существенные расхождения между рассчитанными и измеренными значениями.

*
* *

Подводя итог рассмотренным в этом разделе материалам, следует подчеркнуть, что пространственная ориентация является достаточно устойчивым видовым и сортовым признаком. Это определяет целесообразность создания банка данных по пространственной ориентации, который может использоваться не только при интерпретации результатов дистанционных измерений, но и в прогнозных моделях урожайности. Для формирования банка необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала и прежде всего включение измерений характеристик ориентации в программы наземных фитометрических и агрометеорологических обследований. Целесообразно также развитие экспериментальных

работ по изучению типа пространственного размещения фитоэлементов, так как эти данные необходимы для определения адекватности теоретических моделей различным природным ценозам.

2.5. Условия освещения

В модели отражения Гудриана условия освещения задаются высотой Солнца $h_{\odot}$, долей прямой S_{λ} или рассеянной D_{λ} радиации в суммарном потоке Q_{λ} , поступающем на верхнюю границу РП, угловым распределением яркости небосвода при допущении об азимутальной симметрии.

Оценка изменчивости значений D_{λ}/Q_{λ} и угловой структуры нисходящего потока радиации является сложной самостоятельной задачей оптики атмосферы. Ее всестороннее рассмотрение выходит за рамки настоящей работы, поэтому ниже подчеркиваются лишь те положения, которые необходимы для обоснования выбора значений входных параметров модели.

Так как расчеты b_{λ} РП выполнялись для вегетационного периода, значения *высоты Солнца* в численных экспериментах задавались в интервале $15-67,5^{\circ}$ с переменным шагом от 5 до 30° . Значения $h_{\odot} = 65 \div 67,5^{\circ}$ выбраны как соответствующие максимальным $h_{\odot}$ для южных степных районов страны. Использование $h_{\odot} = 15^{\circ}$ в качестве нижнего предела обусловлено значительными погрешностями измерений b_{λ} при низких $h_{\odot}$, которые являются следствием как малых абсолютных значений яркости объектов, так и анизотропии отражательных свойств эталонных поверхностей [114].

Отношение D_{λ}/Q_{λ} определяется $h_{\odot}$, спектральным диапазоном, прозрачностью атмосферы и A_{λ} . При облачности это отношение зависит от количества облаков, их форм и распределения по небосводу.

Зависимость между $h_{\odot}$ и D_{λ}/Q_{λ} обратная, так как с увеличением $h_{\odot}$ уменьшается длина оптического пути солнечных лучей. В соответствии с закономерностями рассеяния радиации в атмосфере основной максимум в спектральном распределении D_{λ} для случая сухого и чистого воздуха находится в диапазоне $340-360$ нм. По мере увеличения мутности атмосферы этот максимум смещается в синюю часть спектра и в среднем центрирован около 450 нм. В силу того что спектр D_{λ} по сравнению со спектром S_{λ} характеризуется смещением максимума в коротковолновую область, значение D_{λ}/Q_{λ} в диапазоне $400-1000$ нм снижается по мере увеличения λ .

Как видно из рис. 2.11, построенного на основе расчетов по радиационной модели атмосферы О. Авасте, при больших $h_{\odot}$ в красной области спектра D_{λ}/Q_{λ} изменяется в пределах $0,2-0,4$, в БИК-диапазоне от $0,1$ до $0,3$ в зависимости от мутности атмосферы. При низких $h_{\odot}$ (около 15°) D_{λ}/Q_{λ} возрастает до $0,25-0,7$ для $500-700$ нм и до $0,2-0,45$ для $700-1000$ нм. Эти оценки

D_λ/Q_λ при разных $h_\odot$ строго справедливы для радиационных потоков над морем, когда $A_\lambda=0,065$. Однако опубликованных экспериментальных данных, характеризующих изменчивость D_λ/Q_λ при различном оптическом состоянии атмосферы и разных A_λ , недостаточно для систематизации значений D_λ/Q_λ . Можно ожидать, что за счет увеличения A_λ D_λ/Q_λ будет несколько выше значений, указанных на рис. 2.11 (например, при сильно замутненной атмосфере и $h_\odot=30 \div 55^\circ$ для зеленой области спектра D_λ/Q_λ возрастает до 0,3—0,6).

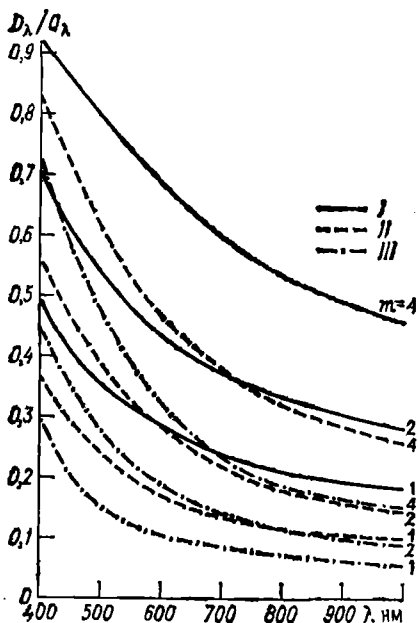


Рис. 2.11. Изменение доли рассеянной радиации в суммарном облучающем потоке D_λ/Q_λ в зависимости от длины волны λ .

I — сильнозамутненная атмосфера, II — среднезамутненная, III — слабозамутненная; цифры у кривых — значения m (оптическая масса атмосферы): $m=1$ ($h_\odot=90^\circ$), $m=2$ ($h_\odot=33^\circ$), $m=4$ ($h_\odot=15,5^\circ$). Составлено по данным О. А. Авасте (1967 г.).

Наличие облачности вызывает увеличение D_λ/Q_λ , которое варьирует в зависимости от форм и количества облаков. В условиях пасмурного неба D_λ/Q_λ достигает максимального значения, равного 1.

Угловое распределение рассеянной радиации зависит от формы индикатрисы рассеяния и оптической толщины атмосферы. При ясном небе максимум интенсивности находится в околосолнечной зоне и у горизонта, минимум — в плоскости вертикала Солнца на угловом расстоянии $85-90^\circ$ от Солнца. Причем в большинстве случаев наблюдается симметрия углового распределения рассеянной радиации относительно плоскости солнечного вертикала. При пасмурной погоде интенсивность рассеянной радиации закономерно убывает от зенита к горизонту.

При моделировании радиационного режима РП обычно рассматривают зональную диффузную радиацию, т. е. радиацию, поступающую от кольцевых зон неба, ограниченных двумя альму-

кантаратами. Вклад каждой зоны в облучение горизонтальной поверхности определяется площадью зоны и углом падения радиации. При равномерно ярком небе (UOC) зональное распределение радиации описывается соотношением (1.6) и максимум зональной радиации приходится на интервал $\theta_z = 40 \div 50^\circ$. На основе анализа экспериментальных данных введено понятие стандартного пасмурного неба (SOC), для которого яркость в зените в 3 раза превышает яркость у горизонта (P. Moon, D. E. Spenser, 1942). В последнем случае весовая функция B_θ при делении небосвода на девять зон принимает следующие значения: 0,015; 0,057; 0,106; 0,150; 0,180; 0,184; 0,160; 0,110 и 0,038.

В целом опубликованные экспериментальные данные свидетельствуют о существенной изменчивости зональной радиации. Поэтому на этапе исследования модели отражения использование конкретных угловых распределений нисходящего потока радиации возможно (см. разд. 1.2), но не целесообразно.

3.1. Общие замечания

Следуя логике изложения материала в главе 2, рассмотрим ниже в той же последовательности роль каждого входного параметра модели Гоудриана в формировании спектрального образа РП. Набор этих параметров (за исключением условий освещения) характеризует состояние системы растительность—почва. Каждый из них в зависимости от конкретной задачи может рассматриваться как диагностируемый параметр или как побочный, вносящий некоторый «шум» при индикации состояния по другому ведущему признаку. Поэтому воздействие отдельного параметра на b_λ системы растительность—почва оценивается для фиксированных значений других параметров с учетом условий освещения и с точки зрения чувствительности к нему конечной величины b_λ . Целесообразность подобного анализа на основе теоретического подхода очевидна, так как, по данным спектрофотометрических измерений, значения b_λ есть комплексный отклик на совокупность параметров, из которого трудно выделить влияние какого-либо параметра.

Для упорядоченности представлений об изменении b_λ под влиянием различных входных параметров модели используется относительная величина Δb_λ :

$$\Delta b_\lambda = (b_{\lambda_1} - b_{\lambda_2}) / b_{\lambda_{\max}}, \quad (3.1)$$

где b_{λ_1} — СКЯ при максимальном значении варьируемого параметра; b_{λ_2} — СКЯ при минимальном значении варьируемого параметра; $b_{\lambda_{\max}}$ — максимальное значение из двух сравниваемых значений b_λ . Нормирование разности по $b_{\lambda_{\max}}$ выполнено с целью выявления минимально возможных относительных изменений b_λ , т. е. чувствительности к исследуемому параметру.

Закономерности отражения радиации РП рассматриваются для условий визирования в надир ($\theta_0 = 0^\circ$). Это сделано из следующих соображений. Во-первых, визирование в надир является в настоящее время наиболее распространенным в практике дистанционных измерений. Во-вторых, при $\theta_0 = 0^\circ$ минимизируется влияние одного из существенных ограничений модели Гоудриана — допущения об азимутальной симметрии радиационных потоков.

Материалом для выполненного анализа послужили результаты расчетов b_λ системы растительность—почва на ЭВМ БЭСМ-6 и

ЕС-1060 общим объемом около 5400 вариантов. Программы на ЭВМ были составлены при участии И. М. Вагиной и А. С. Уханова, ими же выполнялись расчеты для заданных вариантов.

3.2. Влияние оптических свойств отдельных фитоэлементов

3.2.1. Постановка задачи

Как было показано в разд. 2.1, оптическим свойствам фитоэлементов свойственна ярко выраженная селективность. Следовательно, разные значения ρ и τ можно рассматривать как соответствующие различным длинам волн. В то же время, варьируя ρ и τ при проведении численных экспериментов, можно охарактеризовать изменчивость, связанную с видовыми особенностями растений, условиями произрастания, фенологическим развитием и т. п. в фиксированном спектральном диапазоне.

Анализ зависимости b_λ системы растительность—почва от ρ и τ выполнен для следующих условий: доминирует прямая радиация в облучающем потоке $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot > 55^\circ$, $L = 0,5 \div 5,0$, $\rho_s = 0,06 \div 0,25$ при трех типах ориентации (сферической, как наиболее распространенной для травяных сообществ; горизонтальной и вертикальной, как экстремальных вариантов распределения угла наклона фитоэлементов) [23].

Результаты численных экспериментов сгруппированы по способу задания τ . Первоначально рассматривается вариант, когда полог сформирован непрозрачными фитоэлементами. При этом расчеты b_λ выполнены для ρ от 0 до 0,6. Далее вводится величина τ и соответственно рассеивающие свойства фитоэлементов описываются тремя переменными: ρ , τ и $\sigma = \rho + \tau$. Расчеты b_λ для этого варианта выполнены при изменении ρ и τ от 0 до 0,45.

Для всех вариантов проанализировано соотношение между носительными изменениями $\rho - \Delta\rho$ и $\Delta b_\lambda(\rho)$. При чем $\Delta\rho$ рассчитывались по формуле (3.1) с соответствующей подстановкой ρ вместо b_λ .

3.2.2. Основные результаты

3.2.2.1. Непрозрачные фитоэлементы

Изменение b_λ в зависимости от ρ при фиксированных значениях других параметров. При постоянстве прочих параметров b_λ системы растительность—почва находится в прямой зависимости от ρ как параметра, полностью определяющего интенсивность радиации, рассеянной компонентами полога. Вследствие этого, а также из-за ограниченного воздействия многократного рассеяния при $\tau=0$ функция $b_\lambda(\rho)$ в диапазоне $\rho=0 \div 0,60$ является монотонно возрастающей и практически линейной (рис. 3.1). Отсюда для большинства природных ситуаций (настолько возможных, насколько возможно условие $\tau=0$) справедливо уравнение вида

$$b_\lambda = b'_\lambda + k\rho, \quad (3.2)$$

где b' — СКЯ РП, состоящего из абсолютно черных фитоэлементов; k — коэффициент, характеризующий угол наклона графика функции $b_\lambda(\rho)$. Причем, точность линейной аппроксимации понижается при высоких ρ под влиянием процесса многократного рассеяния.

Согласно данным, приведенным в табл. 3.1, значения постоянных в уравнении (3.2) зависят от структуры РП и яркости почвы. Поэтому относительные изменения b_λ , связанные с изменениями ρ , т. е. $\Delta b_\lambda(\rho)$, дифференцированы по L , $\bar{\theta}_\phi$ и ρ_s .

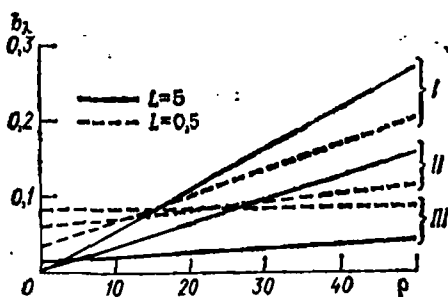


Рис. 3.1. Зависимость b_λ РП от спектральных коэффициентов отражения отдельных фитоэлементов ρ . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_c = 65^\circ$, $\tau/\rho = 0$.

Ориентация фитоэлементов: I — горизонтальная, II — сферическая, III — вертикальная.

Влияние относительной поверхности фитоэлементов и их пространственной ориентации на $\Delta b_\lambda(\rho)$. Как было показано в разд. 2.4, относительная поверхность фитоэлементов L и пространственная ориентация определяют проективное покрытие растительности V .

Таблица 3.1

Значения b'_λ и k в уравнении (3.2) при различной ориентации и относительной поверхности фитоэлементов L
Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $\tau = 0$

ρ_s	L	b'_λ	k	ρ_s	L	b'_λ	k
Горизонтальная ориентация				0,25	0,5	0,146	0,14
0,06	1	0,021	0,35		1	0,085	0,21
	5	0,007	0,48		5	0,001	0,32
	5	0,000	0,55		Вертикальная ориентация		
0,25	0,5	0,088	0,36		0,5	0,049	0,015
	1	0,031	0,48		1	0,040	0,025
	5	0,000	0,55		5	0,008	0,06
Сферическая ориентация				0,25	0,5	0,205	0,04
0,06	1	0,036	0,13		1	0,169	0,05
	5	0,020	0,20		5	0,035	0,07
	5	0,000	0,32				

Чем больше B , тем больше значимость оптических свойств отдельных фитоэлементов в формировании b_λ . В соответствии с зависи-

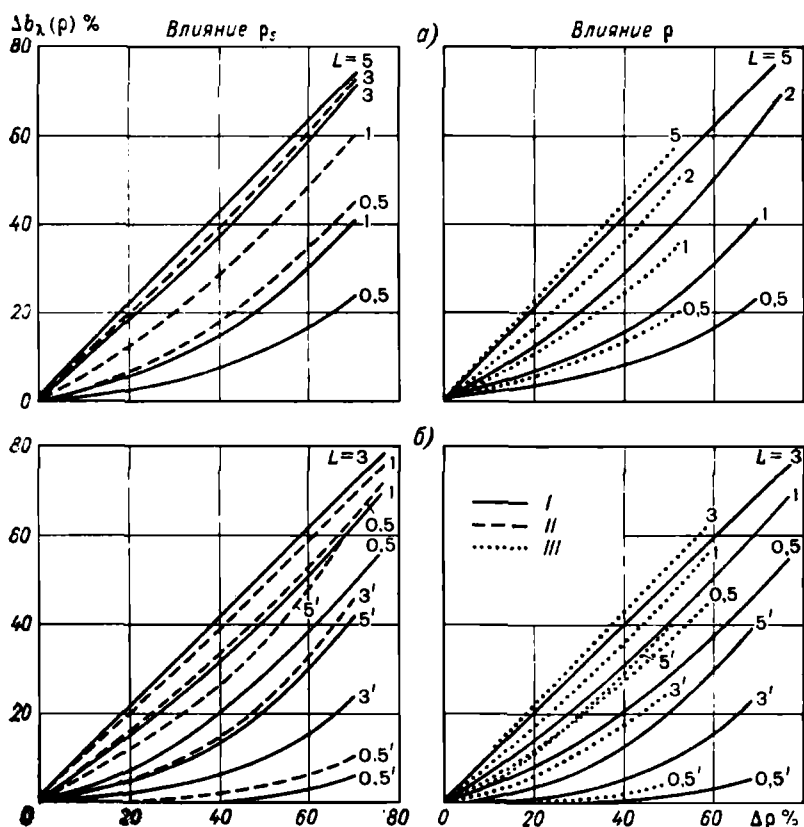


Рис. 3.2. Графики связи относительных изменений СКЯ РП, обусловленных изменением спектральных коэффициентов отражения отдельных фитоэлементов $\Delta b_\lambda(\rho)$, с относительными изменениями спектральных коэффициентов отражения отдельных фитоэлементов $\Delta \rho$. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 > 55^\circ$, $\tau/\rho = 0$.

а — сферическая ориентация фитоэлементов; б — вертикальная и горизонтальная ориентации; I) $\rho = 0,075 \pm 0,35$, $\rho_s = 0,25$; II) $\rho = 0,075 \pm 0,35$; $\rho_s = 0,06$; III) $\rho = 0,20 \pm 0,60$, $\rho_s = 0,25$; цифры у кривых — относительная поверхность фитоэлементов L (на графиках б цифры без штрихов относятся к горизонтальной ориентации, цифры со штрихами — к вертикальной).

мостью B от L и $\bar{\theta}_\phi$ (см. формулы (2.16), (2.17)) при увеличении L и/или отклонении ориентации в сторону горизонтальности возрастает коэффициент k , характеризующий соотношение абсолютных приращений ρ и b_λ . Одновременно происходит убывание b'_λ , который характеризует вклад почвы в b_λ РП. Следствием поведения

k является повышение чувствительности b_λ РП к цвету фитоэлементов по мере увеличения L и горизонтальности фитоэлементов (рис. 3.2).

Из рис. 3.3 видно, что комбинация L и $\bar{\theta}_\phi$, обеспечивающая равенство B , приводит к формированию близких значений $\Delta b_\lambda(\rho)$. Таким образом, яркостные характеристики РП, имеющих разную структурную организацию, но равную сомкнутость полога, одинаково реагируют на изменения цвета фитоэлементов. Так как при B около 100% b'_λ стремится к 0, зависимость между $\Delta\rho$ и $\Delta b_\lambda(\rho)$ для сомкнутых РП становится близкой к прямо пропорциональной:

$$\Delta b_\lambda(\rho) = c \Delta\rho. \quad (3.3)$$

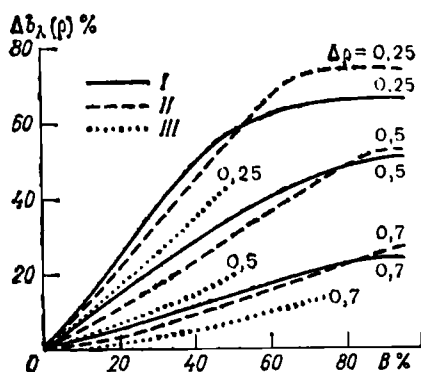


Рис. 3.3. Зависимость $\Delta b_\lambda(\rho)$ от проективного покрытия растительности B при различных типах ориентации фитоэлементов. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 = 65^\circ$, $\tau/\rho = 0$.

Ориентация фитоэлементов: I — горизонтальная, II — сферическая, III — вертикальная; цифры у кривых — $\Delta\rho$.

При этом значения c близки к 1, т. е. вариации отражательных характеристик отдельных компонентов системы растительность—почва вызывают полностью адекватные изменения b_λ всей системы. В этой ситуации роль структуры РП не проявляется и весь полог работает как единая пластина с некоторым показателем рассеивающих свойств.

Влияние отражательных характеристик почвы на $\Delta b_\lambda(\rho)$. Из табл. 3.1 видно, что коэффициент k устойчив по отношению к ρ_s . В результате прямой зависимости между b'_λ и ρ_s (табл. 3.1 и рис. 3.1) при фиксированных значениях L и $\Delta\rho$ относительные изменения $\Delta b_\lambda(\rho)$ возрастают по мере потемнения почвы. Полученная закономерность вполне логична, так как вклад потока радиации, отраженного от почвы, в суммарный диффузный поток, распространяющийся в верхнюю полусферу, уменьшается с понижением ρ_s . Соответственно уменьшается и роль оптических свойств почвы в формировании отражательных характеристик всей системы растительность—почва.

Различия в $\Delta b_\lambda(\rho)$, связанные с состоянием почвенного покрова, нивелируются при смыкании растительного полога (рис. 3.2). Например, при сферической ориентации:

L	$B \%$	$\Delta \rho \%$	ρ_s	$\Delta b_\lambda(\rho) \%$
1	Около 40	60	0,06	50
			0,25	30
3	Около 80	60	0,06	62
			0,25	59

Дифференциация значений $\Delta b_\lambda(\rho)$ по ρ_s наиболее выражена при высоких значениях спектральных контрастов между фитоэлементами, образующими полог РП. Следовательно, чем больше $\Delta \rho$, тем важнее учет пространственно-временной изменчивости почвенного фона при оценке возможных вариаций b_λ , вызванных различиями в ρ .

Влияние изменчивости ρ на $\Delta b_\lambda(\rho)$. Наличие в уравнении (3.2) свободного члена $b'_\lambda \neq 0$ определяет зависимость $\Delta b_\lambda(\rho)$ от диапазона значений ρ , причем отклонение функции $b_\lambda(\rho)$ от линейной при высоких ρ усиливает этот эффект. Отсюда следует, что при равенстве $\Delta \rho$ реакция b_λ на колебания цвета растительности в пределах зеленых оттенков не будет адекватна реакции на изменение оттенков желтого цвета. По этой же причине в случае одинаковых $\Delta \rho$ значения $\Delta b_\lambda(\rho)$ в БИК-диапазоне превышают значения $\Delta b_\lambda(\rho)$ в видимой области спектра.

Сравнительная оценка чувствительности относительных изменений $\Delta b_\lambda(\rho)$ к колебаниям различных входных параметров. Оценки, представленные в табл. 3.2, позволяют сравнить чувстви-

Таблица 3.2

Разность между значениями $\Delta b_\lambda(\rho)$ при изменении параметров системы растительность—почва и в зависимости от ориентации.

Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 = 65^\circ$, $\tau/\rho = 0$, $\Delta \rho = 50 \%$

Переменные параметры	Фиксированные параметры	Ориентация		
		гориз.	сфер.	вертик.
$L = 1 \div 5$	$\rho_s = 0,06$; $\rho = 0,15 \div 0,60$	3	14	29
	$\rho_s = 0,25$; $\rho = 0,15 \div 0,60$	8	30	15
$\rho_s = 0,06 \div 0,25$	$L = 5$; $\rho = 0,15 \div 0,60$	0	0	16
	$L = 1$; $\rho = 0,15 \div 0,60$	6	16	2
$\rho = 0,15 \div 0,60$ $\rho = 0,30 \div 0,60$	$L = 5$; $\rho_s = 0,25$	4	5	21
	$L = 1$; $\rho_s = 0,25$	6	12	6

тельность $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ к изменениям относительной поверхности фитоэлементов, их ориентации, яркости почвы и к диапазону ρ . Видно, что максимальная изменчивость $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ связана с изменением плотности полога РП. Причем относительные изменения $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ в зависимости от L увеличиваются на светлых почвах. Чем больше выражена горизонтальность фитоэлементов при прочих равных условиях, тем стабильнее становятся значения $\Delta b_{\lambda}(\rho)$. Эта тенденция объясняется тем, что в случае горизонтальной ориентации смыкание полога происходит уже при $L \geq 2$. Отклонения ориентации в сторону вертикальной сопровождаются повышением чувствительности $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ к L на темных почвах. Очевидно, что при полном смыкании полога в случае вертикальной ориентации тенденции изменения $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ будут приближаться к таковым при горизонтальной ориентации.

3.2.2.2. Прозрачные фитоэлементы

Оценим устойчивость полученных для непрозрачных фитоэлементов закономерностей изменения $b_{\lambda}(\rho)$ и $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ к изменению прозрачности фитоэлементов.

Как указывалось в разд. 2.1, отношение τ/ρ варьирует преимущественно в пределах от 0 до 1, при этом внутривидовая изменчивость τ/ρ невелика. Нижнее предельное значение $\tau/\rho=0$ типично для стеблей, колосьев и других непрозрачных репродуктивных органов во всем оптическом диапазоне. Верхнее — $\tau/\rho=1$ является характерным в БИК-диапазоне и в видимой области спектра для листьев большинства видов растений, развивающихся в условиях достаточного увлажнения, т. е. мезофитов. Промежуточные значения τ/ρ свойственны в видимом диапазоне листьям растений, которые относятся к другим экологическим группам. Причем напомним, что величина τ/ρ на $\lambda=550$ нм рассматривается как показатель ксероморфности вида [62].

Диффузный поток радиации, образовавшийся за счет отражения падающей радиации от поверхности фитоэлемента, является результатом первого акта рассеяния на элементах мутности растительной среды. При фиксированном ρ наличие пропускания увеличивает кратность рассеяния в толще РП и тем приводит к образованию дополнительных радиационных потоков, распространяющихся во всех направлениях, в том числе и в верхнюю полусферу. В результате при равных значениях ρ полог, сформированный прозрачными фитоэлементами, отражает больше, чем полог, сформированный непрозрачными фитоэлементами (рис. 3.4).

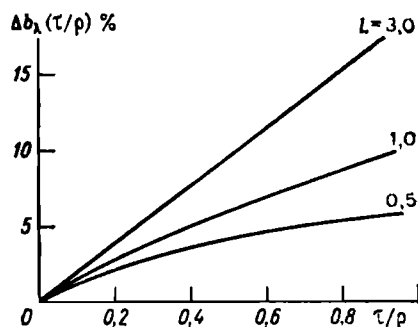
Влияние прозрачности фитоэлементов на b_{λ} в видимом диапазоне. При зеленой окраске растительности наличие пропускания практически не влияет на яркостные характеристики системы растительность—почва (табл. 3.3). Даже в интервале 530—560 нм, в котором τ достигает максимальных значений, различия в b_{λ} для двух предельных ситуаций $\tau/\rho=0$ и $\tau/\rho=1$ не превышают 20 %. Следовательно, для видимого диапазона в период активной вегетации растений характерно доминирование однократного рассея-

ния в процессе формирования b_λ РП. Отсюда следует, что ρ является параметром рассеяния отдельных фитоэлементов, который определяет отражательные свойства растительного объекта в целом. Этот вывод подтверждают также материалы табл. 3.4, из которых видно, что в видимом диапазоне равенство ρ обеспечивает формирование более близких значений b_λ РП по сравнению с равенством σ .

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что различия в b_λ агроценозов и естественных травостоев должны

Рис. 3.4. Приращение значений b_λ РП за счет изменения прозрачности фитоэлементов (τ/ρ) при сферической ориентации. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, $\rho = 0,15$.

Цифры у кривых — L .



мало зависеть от видовых особенностей отношения τ/ρ в период активной вегетации.

При пожелтении растений влияние прозрачности фитоэлементов на b_λ РП возрастает (табл. 3.3, 3.4). Для многих видов растений (особенно злаков) на заключительных этапах вегетации при доминировании желтого цвета среднее значение τ компонен-

Таблица 3.3

Относительные изменения b_λ (%) РП за счет вариаций прозрачности фитоэлементов ($\Delta b_\lambda(\tau/\rho)$).

Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, сферическая ориентация

λ нм	Цвет растительности	ρ	ρ_s	L			
				0,5	1	3	5
640—680	Зеленый	0,075	0,06	2	6	8	12
		0,075	0,25	3	6	8	8
530—560	Зеленый	0,15	0,06	5	11	19	19
		0,15	0,25	7	11	19	19
640—680	Желтый	0,30	0,06	12	22	35	35
		0,30	0,25	13	23	37	38
530—560	Зеленый	0,40	0,09	—	27	48	52
		0,40	0,25	—	31	50	54

Примечание. $\Delta b_\lambda(\tau/\rho) = b_\lambda(\tau/\rho=1) - b_\lambda(\tau/\rho=0) / b_\lambda(\tau/\rho=1)$.

Таблица 3.4

Значения b_λ РП при различных оптических характеристиках отдельных фитоэлементов

Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 = 65^\circ$, $\rho_s = 0,06$, $L = 3$, сферическая ориентация

ρ	τ	σ	b_λ	$\Delta b_\lambda(\rho)$	$\Delta b_\lambda(\sigma)$
0,15	0,0	0,15	0,043	0,17	0,40
0,15	0,15	0,30	0,052		
0,30	0,0	0,30	0,087		
0,25	0,0	0,25	0,072	0,28	0,35
0,25	0,25	0,50	0,110		
0,50	0,0	0,50	0,155		

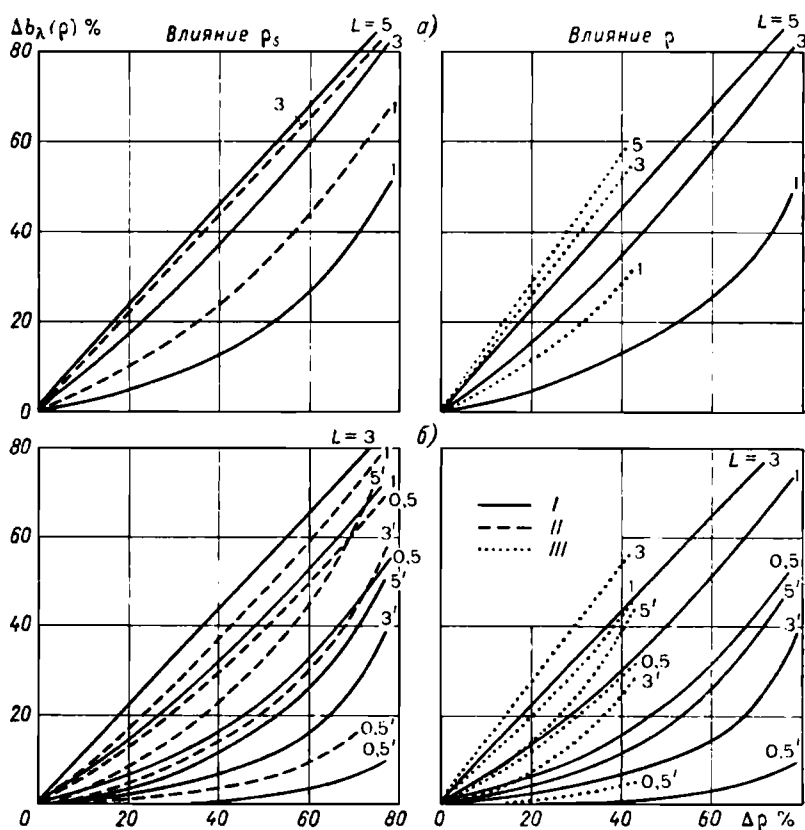


Рис. 3.5. Графики связи $\Delta b_\lambda(\rho)$ с $\Delta \rho$. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 > 55^\circ$, $\tau/\rho = 1$.

Усл. обозначения см. рис. 3.2.

Таблица 3.5

Абсолютные приращения b_{λ} РП в различных диапазонах ρ при горизонтальной и вертикальной ориентации фитоэлементов

Надир, $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$, $h_{\odot} = 65^{\circ}$, $L = 3$, $\tau/\rho = 1$

ρ	Горизонтальная ориентация		Вертикальная ориентация	
	$\rho_s = 0,10$	$\rho_s = 0,25$	$\rho_s = 0,10$	$\rho_s = 0,25$
0,05—0,10	0,012	0,012	0,004	0,006
0,10—0,15	0,035	0,035	0,005	0,006
0,15—0,20	0,039	0,039	0,005	0,008
0,20—0,25	0,045	0,046	0,007	0,010
0,25—0,30	0,054	0,055	0,009	0,013
0,30—0,35	0,064	0,066	0,011	0,017
0,35—0,40	0,080	0,083	0,016	0,023
0,40—0,45	0,104	0,112	0,023	0,036

тов растительного полога зависит в первую очередь от доли поверхности непрозрачных фитоэлементов в суммарной относительной поверхности. В этом случае варьирование ρ и τ будет определяться фракционным составом растительности, который является как видовым признаком, так и показателем состояния РП.

Влияние прозрачности фитоэлементов на b_{λ} в БИК-диапазоне. Из данных табл. 3.3 следует, что различия в b_{λ} РП, являющиеся следствием изменения прозрачности фитоэлементов, могут превышать 50 %. Это означает, что более половины потока диффузной радиации, распространяющегося вертикально вверх, есть результат многократного рассеяния падающего солнечного излучения. Полученные количественные оценки указывают на необходимость учета и ρ и τ в БИК-диапазоне. Причем, как и в видимом диапазоне при пожелтении фитоэлементов, из-за незначительной меж- и внутривидовой изменчивости величин τ/ρ для листьев особое значение приобретает учет фракционного состава РП.

Относительные изменения b_{λ} при прозрачных фитоэлементах. Проведенный анализ зависимости b_{λ} РП от прозрачности фитоэлементов показал, что при оценке чувствительности b_{λ} к оптическим свойствам фитоэлементов в первом приближении можно ограничиться двумя предельными вариантами: $\tau/\rho = 0$ (при доминировании в пологе стеблей, колосьев и т. п.) и $\tau/\rho = 1$ (при доминировании листьев). Первый вариант был рассмотрен в разд. 3.2.2.1, второй рассматривается ниже.

Установлено, что для РП, сформированного прозрачными листьями, сохраняется линейная зависимость между b_{λ} и ρ в интервале $\rho = 0 \div 0,20$. Этот интервал соответствует видимому диапазону при преобладании зеленой окраски фитоэлементов. За счет влияния многократного рассеяния в случае $\rho > 0,20$ линейная

зависимость между b_λ и ρ нарушается, особенно для РП на светлых почвах (табл. 3.5).

Для обоих вариантов τ/ρ основные тенденции в поведении $\Delta b_\lambda(\rho)$ совпадают, а именно: соотношения между $\Delta\rho$ и $\Delta b_\lambda(\rho)$ зависят от L , ρ_* и диапазона ρ (рис. 3.2, 3.5). В случае редких РП связь между $\Delta\rho$ и $\Delta b_\lambda(\rho)$ нелинейна, причем значения относительных изменений $\Delta b_\lambda(\rho)$ меньше, чем $\Delta\rho$. В случае сомкнутых РП справедливо уравнение (3.3), но значения коэффициента c при $\tau/\rho=1$ могут быть выше 1. Практический смысл полученных результатов численных экспериментов состоит в том, что спектральные контрасты между растительными объектами при высокой сомкнутости полога могут превышать спектральные контрасты между отдельными фитоэлементами, а при низкой сомкнутости может быть обратная ситуация.

3.2.3. Выводы

1. Из параметров, характеризующих оптические свойства отдельных фитоэлементов, ведущую роль в формировании отражательных характеристик системы растительность—почва имеет спектральный коэффициент отражения ρ . Отсюда следует, что:

а) в видимом диапазоне максимальные спектральные контрасты складываются между растительными объектами, различающимися по отражению отдельных фитоэлементов, а не по суммарной рассеивающей способности σ последних;

б) видовые особенности растений, которые выражаются через изменение соотношения ρ и τ , не должны существенно проявляться в яркостных характеристиках фитоценозов и соответственно различия в b_λ должны быть преимущественно связаны с фракционным составом растительности.

2. СКЯ РП находится в прямой зависимости от ρ . Однако вид функции $b_\lambda(\rho)$ определяется отношением τ/ρ :

а) в случае $\tau/\rho=0$ (непрозрачные фитоэлементы — стебли, колосья, черешки и т. п.) функция $b_\lambda(\rho)$ является линейной;

б) в случае $\tau/\rho \neq 0$ (прозрачные фитоэлементы — листья, лепестки цветов) функция $b_\lambda(\rho)$ отклоняется от линейной за счет эффекта многократного рассеяния.

3. Значения параметров в уравнении, связывающем b_λ и ρ , при фиксированных условиях освещения и визирования зависят от структуры РП и отражательных свойств почвы. Эта зависимость обуславливает дифференциацию относительных изменений b_λ при равных $\Delta\rho$ по L , $\bar{\theta}_\phi$, ρ_* и ρ .

4. Основные закономерности в соотношении между $\Delta b_\lambda(\rho)$ и $\Delta\rho$ не зависят от величины τ/ρ ; при этом:

а) чувствительность b_λ к вариациям ρ возрастает по мере смыкания полога РП; в сомкнутых РП колебания плотности полога не сказываются на значениях $\Delta b_\lambda(\rho)$ и независимо от типа пространственной ориентации относительные изменения $\Delta b_\lambda(\rho)$ при-

мерно равны относительным изменениям $\Delta\rho$; практическое значение полученного результата заключается в том, что в случае значимых различий в ρ для сомкнутого РП при визировании в надир возможна индикация видового состава и состояния растительного сообщества;

б) максимальная дифференциация $\Delta b_\lambda(\rho)$ по L свойственна РП на темных почвах с преимущественно вертикальной ориентацией фитоэлементов, минимальная — при их горизонтальной ориентации независимо от L ; практическое значение полученного результата состоит в том, что оценку возможных последствий изменения цвета стеблей и колосьев для злаковых культур, особенно на заключительных этапах вегетации, необходимо проводить с учетом плотности полога (L , B или N), а при полегании растений цвет можно индизировать, не имея априорной информации о плотности полога и/или густоте посева;

в) при фиксированных значениях L , ρ_λ и ρ значения $\Delta b_\lambda(\rho)$ уменьшаются с ростом углов наклона фитоэлементов, поэтому влияние неоднородности окраски вертикально ориентированных стеблей и колосьев в посевах злаковых культур должно проявляться в меньшей степени, чем влияние неоднородной окраски листьев;

г) спектральные контрасты между растительными объектами, различающимися по отражательным свойствам фитоэлементов, усиливаются на темных почвах, т. е. почвах с высоким содержанием органических веществ, окиси железа или увлажненных; практическое значение полученного результата состоит в том, что наиболее благоприятные условия для индикации состояния и/или типа РП на основе особенностей оптических характеристик фитоэлементов складываются в черноземной зоне, а в остальных районах — после выпадения осадков; с позиций методики дистанционных измерений зависимость спектральных контрастов при разных ρ от отражательных свойств почвы вызывает необходимость учета пространственно-временной изменчивости состояния почвенного покрова, особенно для несомкнутых РП при доминировании желтого цвета растений;

д) из-за повышения чувствительности b_λ к изменениям ρ при увеличении значений самих ρ можно полагать, что различия в оттенках желтого цвета окажут большее влияние на спектральные контрасты между растительными объектами, чем различия в оттенках зеленого цвета фитоэлементов.

3.3. Влияние отражательных свойств почвы

3.3.1. Постановка задачи

Как следует из материалов, рассмотренных в разд. 2.2, для спектрального отражения почвы характерна значительная пространственно-временная изменчивость. В результате этой

изменчивости возможно, с одной стороны, формирование существенных различий в b_λ одного и того же растительного объекта по территории и во времени, с другой — наоборот, нивелирование спектральных контрастов между разными растительными объектами. Отсюда вытекает, что для индикации по суммарному отраженному сигналу собственно растительности необходимо выделить вклад почвенного фона в формирование спектрального образа фитоценоза.

Наиболее детально этот вопрос исследован в [39, 44]. В [39] на основе численных экспериментов по теоретической модели отражения [36, 46] выявлена линейная зависимость между спектральным альбедо РП A_λ и ρ_s , а также получены аналитические выражения, аппроксимирующие связь производной $dA_\lambda/d\rho_s$ с L и σ при горизонтальной и сферической ориентации фитоэлементов и $h_\odot$ около 30° . Полученные в [39] результаты свидетельствуют об увеличении чувствительности отражательных характеристик растительных сообществ к ρ_s по мере уменьшения сомкнутости полога РП и повышения σ . В [44] на базе полуэмпирической модели отражения (см. сноску 2 в примечании к табл. 1.1) также установлена линейная зависимость между b_λ и ρ_s для трех культур: пшеницы (фаза колошения), кукурузы (фаза выметывания метелки) и картофеля (фаза цветения). Полученный вывод подтвержден материалами натурных экспериментов на примере посевов пшеницы. Из анализа результатов численных экспериментов следует, что влияние отражательных свойств почвы на b_λ РП возрастает с увеличением спектрального контраста между почвой и растительностью в тех случаях, когда почва светлее предельно плотного РП. Авторами рассчитаны значения постоянных в уравнении, связывающем b_λ и ρ_s . Однако применимость приведенных количественных данных ограничена набором перечисленных выше культур и их фазами развития. Кроме того, использованный в [44] подход не позволяет до конца вскрыть механизмы, которые опосредуют воздействие ρ_s на b_λ РП. Отсюда очевидна целесообразность дополнительного исследования рассматриваемой проблемы в более общей ее постановке.

Ниже в рамках модели Гоудриана анализируется роль отражательных свойств почвы в формировании спектрального образа растительных объектов для трех типов пространственной ориентации фитоэлементов при следующих условиях: в облучающем потоке доминирует прямая радиация $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, плотность РП изменяется в пределах $L = 0,5 \div 5,0$; $\rho = 0,0 \div 0,60$ для непрозрачных фитоэлементов; $\rho = 0,0 \div 0,45$ для прозрачных фитоэлементов; $\rho_s = 0,0 \div 0,40$.

3.3.2. Основные результаты

Проведенные численные эксперименты подтвердили полученный в [39, 44] вывод о наличии линейной связи между b_λ и ρ_s во всем оптическом диапазоне независимо от плотности РП, цвета

и ориентации фитоэлементов. Таким образом, функция $b_{\lambda}(\rho_s)$ может быть аппроксимирована уравнением вида:

$$b_{\lambda} = b_{\lambda}'' + a\rho_s, \quad (3.4)$$

где b_{λ}'' — СКЯ РП при абсолютно черной почве; a — коэффициент, характеризующий угол наклона графика функции $b_{\lambda}(\rho_s)$ [21].

Из материалов табл. 3.6 следует, что чувствительность b_{λ} фитоценозов к отражательным свойствам почвы зависит от плотно-

Таблица 3.6

Значения постоянных b_{λ}'' и a в формуле (3.4) для РП различной плотности L в зависимости от ориентации и оптических свойств фитоэлементов

Надир, $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$, $h_0 = 65^\circ$

ρ	L	$\tau/\rho = 0$		$\tau/\rho \approx 1$		ρ	L	$\tau/\rho = 0$		$\tau/\rho \approx 1$	
		b_{λ}''	a	b_{λ}''	a			b_{λ}''	a	b_{λ}''	a
Горизонтальная ориентация						0,30	1	0,056	0,367	0,072	0,472
0,075	3	0,035	0,120	0,036	0,147	0,40	3	0,085	0,044	0,128	0,092
	5	0,039	0,004	0,042	0,000		5	0,088	0,005	0,140	0,016
	5	0,039	0,000	0,042	0,000		1	0,076	0,382	0,108	0,552
0,15	1	0,069	0,126	0,077	0,179	0,50	3	0,117	0,050	0,222	0,154
	3	0,079	0,005	0,092	0,005		5	0,122	0,005	0,256	0,036
0,20	5	0,079	0,000	0,093	0,000	0,60	1			0,130	0,604
	1	0,092	0,131	0,108	0,200		3			0,294	0,212
	3	0,106	0,005	0,134	0,005		5			0,360	0,068
0,30	5	0,106	0,000	0,135	0,000	0,60	1	0,121	0,415		
	1	0,140	0,133	0,174	0,252		3	0,194	0,063		
	3	0,161	0,005	0,234	0,021		5	0,206	0,005		
0,40	5	0,161	0,000	0,239	0,005	Вертикальная ориентация					
	1	0,188	0,140	0,252	0,353	0,075	1	0,001	0,678	0,002	0,694
	3	0,218	0,005	0,381	0,053		3	0,002	0,310	0,004	0,323
0,45	5	0,218	0,000	0,405	0,005		5	0,003	0,147	0,007	0,147
	1			0,295	0,405	0,15	1	0,002	0,694	0,004	0,717
	3			0,471	0,094		3	0,005	0,320	0,009	0,341
0,60	5			0,511	0,021		5	0,006	0,147	0,012	0,158
	1	0,270	0,240			0,20	1	0,003	0,700	0,006	0,738
	3	0,340	0,005				3	0,007	0,329	0,014	0,358
5	0,347	0,000			5		0,009	0,150	0,018	0,167	
Сферическая ориентация						0,30	1	0,005	0,717	0,009	0,787
0,075	1	0,013	0,342	0,014	0,364	0,40	3	0,011	0,341	0,026	0,409
	3	0,020	0,042	0,022	0,044		5	0,014	0,158	0,036	0,200
	5	0,020	0,005	0,022	0,008		1	0,007	0,735	0,015	0,854
0,15	1	0,027	0,352	0,031	0,390	0,50	3	0,016	0,355	0,049	0,506
	3	0,040	0,041	0,048	0,056		5	0,021	0,170	0,075	0,277
	5	0,042	0,005	0,051	0,008		1			0,018	0,896
0,20	1	0,037	0,356	0,043	0,416	0,60	3			0,064	0,596
	3	0,055	0,041	0,070	0,064		5			0,101	0,361
	5	0,057	0,005	0,074	0,008		1	0,010	0,768		
						3	0,029	0,394			
						5	0,040	0,194			

сти полого, оптических свойств отдельных фитоэлементов и их ориентации. Выявленные различия в чувствительности b_λ к ρ , связаны с действием следующих факторов:

1) с изменением доли просвечивающих участков почвы в общей видимой площади $\mathcal{P}$;

2) с соотношением площадей освещенных $\mathcal{P}_\odot$ и затененных $\mathcal{P}^*$ участков видимой почвы;

3) с яркостью затененных участков почвы.

Влияние первых двух факторов $\mathcal{P}$, $\mathcal{P}_\odot$ и $\mathcal{P}^*$ количественно можно оценить исходя из следующих соотношений.

Доля просвечивающих участков почвы для надира равна

$$\mathcal{P} = 1 - B \text{ или } \mathcal{P} = \exp[-LG(0)]. \quad (3.5)$$

Доля освещенной почвы $\mathcal{P}_\odot$ равна совместной вероятности наблюдения оголенной почвы и ее освещения прямыми солнечными лучами, т. е. с учетом (3.5) для надира:

$$\mathcal{P}_\odot = \exp[-LG(0)] \exp[-LG(h_\odot)/\sin h_\odot]. \quad (3.6)$$

Отсюда

$$\mathcal{P}^* = (1 - \mathcal{P}_\odot) \exp[-LG(0)]. \quad (3.7)$$

Согласно данным табл. 3.7, при заданном типе ориентации фитоэлементов увеличение плотности РП влечет за собой не только

Таблица 3.7

Доля освещенных $\mathcal{P}_\odot$ и затененных $\mathcal{P}^*$ участков почвы в общей видимой площади $\mathcal{P}$ в зависимости от относительной поверхности фитоэлементов L и их ориентации

Надир, $h_\odot = 65^\circ$

Ориентация	L	$\mathcal{P}$	$\mathcal{P}_\odot$	$\mathcal{P}^*$	$\mathcal{P}_\odot/\mathcal{P}^*$
Горизонтальная	1	0,37	0,14	0,23	0,61
	3	0,05	0,00	0,05	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00
Сферическая	1	0,51	0,35	0,26	1,35
	3	0,22	0,04	0,18	0,22
	5	0,08	0,00	0,08	0,00
Вертикальная	1	0,88	0,65	0,23	2,83
	3	0,68	0,28	0,40	0,70
	5	0,52	0,11	0,40	0,28

снижение доли видимой почвы $\mathcal{P}$ (что является очевидным фактом), но и существенно изменяет условия ее освещения. Если в редких РП подавляющую часть почвы, попадающей в поле зрения прибора, составляют участки, освещенные прямой солнечной радиацией, то в более плотных РП резко возрастает доля затененных участков. При фиксированном L значения $\mathcal{P}$, $\mathcal{P}_\odot$ и $\mathcal{P}^*$ изменяются в зависимости от ориентации фитоэлементов. Причем

по мере увеличения среднего угла наклона $\bar{\theta}_\Phi$ вероятность наблюдения и освещения почвы повышается. Следствием указанных эффектов является ослабление потока диффузной радиации, отраженной от почвы, по мере смыкания полога РП. Соответственно возрастает инвариантность b_λ РП к оптическим свойствам почвы, которая характеризуется коэффициентом a в уравнении (3.4). (см. табл. 3.6).

Влияние третьего фактора — яркости затененных участков почвы — определяется прозрачностью фитоэлементов. Очевидно, что увеличение пропускания фитоэлементов будет сопровождаться увеличением количества радиации, достигающей поверхности почвы. Коэффициент спектрального отражения почвы, затененной единичным слоем фитоэлементов, ρ_s^* равен

$$\rho_s^* = \rho_s \tau. \quad (3.8)$$

Следовательно, яркости затененных участков почвы при равных ρ_s и различных значениях τ соотносятся как τ_1/τ_2 . Это означает, что в случае $\rho = \tau$ пожелтение фитоэлементов (листьев) приводит к увеличению яркости теней на почве. По той же причине тени в БИК-диапазоне светлее, чем тени в видимой области спектра. В результате влияния яркости затененных участков почвы отмечается повышение чувствительности b_λ РП к изменению ρ_s по мере увеличения значений ρ при $\tau/\rho = 1$ (см. табл. 3.6).

Таким образом, выводы о роли плотности РП и оптических свойств фитоэлементов, полученные в [39] для A_λ и $h_\odot$ около 30° , сохраняются для b_λ РП произвольной структуры и $h_\odot$ более 30° .

Поскольку диагностика состояния почвы не является самостоятельной задачей при анализе данных дистанционного обследования растительных объектов, мы не рассматриваем детально относительные изменения b_λ РП, обусловленные варьированием ρ_s — $\Delta b_\lambda(\rho_s)$. Отметим, что основные закономерности поведения $\Delta b_\lambda(\rho_s)$ определяются уравнением (3.4), а количественные оценки можно получить, пользуясь материалами табл. 3.6. Очевидно, что $\Delta b_\lambda(\rho_s)$ достигают максимальных значений при $L \rightarrow 0$, когда $\Delta b_\lambda(\rho_s)$ равно относительному приращению ρ_s — $\Delta \rho_s$. С учетом значений $\Delta \rho_s$, приведенных в разд. 2.2, максимальные значения $\Delta b_\lambda(\rho_s)$ не превышают 85 %. Минимальные значения $\Delta b_\lambda(\rho_s)$, равные 0, отмечаются для сомкнутых РП.

3.3.3. Выводы

1. В общем виде связь b_λ растительных объектов со спектральным коэффициентом отражения почвы ρ_s аппроксимируется линейным уравнением.

2. Параметры уравнения зависят от сомкнутости полога РП и оптических свойств фитоэлементов, при этом:

а) увеличение сомкнутости влечет за собой нивелирование влияния пространственно-временной неоднородности почвенного

фона на b_λ РП не только из-за снижения вероятности наблюдения оголенной почвы, но и за счет увеличения ее затененности;

б) максимальная чувствительность b_λ РП к изменениям ρ_s отмечается в БИК-диапазоне, а в видимом диапазоне — при пожелтении растений.

Методическое значение полученных результатов состоит в том, что при тематической интерпретации данных дистанционного обследования растительных объектов особенно важен учет пространственно-временной изменчивости отражательных свойств почвы как на ранних, так и на заключительных этапах вегетации. В первом случае повышенная чувствительность b_λ к ρ_s обусловлена разреженностью полога, а во втором — разреженностью полога в сочетании с пожелтением фитоэлементов. В целом полученные соотношения позволяют приводить яркостные характеристики растительных объектов к однотипным условиям почвенного фона. Несмотря на то что эти соотношения нами рассмотрены для конкретной $h_\odot$ и для условий визирования в надир, очевидна принципиальная возможность использования аналогичного подхода как для случаев с иной $h_\odot$, так и для наклонных углов визирования.

3.4. Влияние относительной поверхности фитоэлементов

3.4.1. Постановка задачи

Относительная поверхность фитоэлементов L характеризует плотность растительного полога и является индикатором состояния РП. В разд. 2.3 было подчеркнуто, что видовые особенности растений определяют не столько конечное значение L , сколько динамику L в течение вегетационного периода. Согласно (2.16), (2.17), L экспоненциально связана с проективным покрытием и при равных значениях L максимальное B формируется в случае горизонтальной ориентации фитоэлементов (см. табл. 2.35). До фенофаз накопления ассимилятов в репродуктивных органах (налив зерна, образование початков, корнеплодов и т. п.) L тесно и прямо связана с запасом надземной фитомассы m . В результате высокой корреляции L и m на фенофазах вегетативного роста растений при измерениях установлены зависимости b_λ от m для сельскохозяйственных посевов и естественных травостоев [10, 32, 44, 64, 65, 123, 143 и др.]. Данные многочисленных натурных экспериментов подтверждают также наличие связи между b_λ и L для различных вариантов растительных сообществ [44, 64, 73, 82, 87, 118, 123, 128, 147 и др.]. Причем характер этой связи в случае зеленой растительности определяется спектральным диапазоном. Для БИК-диапазона, как правило, отмечается прямая связь, для красной области видимого диапазона — обратная, для зеленой области видимого диапазона — неоднозначная. Однако указанные тенденции сильно варьируют в зависимости от почвенных условий, сомкнутости полога, ориентации и цвета фитоэлементов. Напри-

мер, в литературе приводятся экспериментальные результаты о формировании нейтральной и даже убывающей функции $b_\lambda(L)$ на засоленных почвах для БИК-диапазона, о формировании нейтральной функции на темных почвах в красной области спектра и возрастающей функции при смене аспекта растительности от зеленого к желтому [44, 87, 118].

Разнообразие и зачастую противоречивость результатов натуральных экспериментов затрудняет их систематизацию. А это, в свою очередь, усложняет решение задачи индикации плотности полога, которая является одной из главных задач дистанционного исследования подстилающей поверхности в интересах сельского хозяйства и агрометеорологии.

Численные эксперименты позволяют в рамках допущений используемой математической модели выявить общие тенденции изменения b_λ в зависимости от L . На основе расчетов также можно дать количественные оценки соотношений ρ и ρ_s , при которых формируется различный тип связи между b_λ и L . В частности, можно конкретизировать используемые в литературе понятия «темная» и «светлая» почва для отдельных спектральных диапазонов.

Ниже дается анализ результатов расчетов функций $b_\lambda(L)$ для трех типов ориентации при следующих условиях: в облучающем потоке доминирует прямая радиация $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, $\rho = 0,0 \div 0,60$, $\rho_s = 0,0 \div 0,40$.

3.4.2. Основные результаты

Зависимость b_λ от L в рамках модели Гоудриана была рассмотрена нами ранее в [15]. В дальнейшем при расчетах диапазон значений ρ и ρ_s был расширен. Это позволило получить более общие представления об изменении b_λ в зависимости от плотности полога РП.

3.4.2.1. Факторы, определяющие зависимость b_λ от L

В рамках принятой модели факторами, определяющими характер зависимости b_λ РП от L , являются:

- 1) изменение соотношения между затененными и освещенными площадями почвы и растительности;
- 2) изменение доли видимых участков почвы;
- 3) многократное рассеяние.

Два первых фактора определяют зависимость b_λ в случае непрозрачных фитоэлементов, в случае прозрачных фитоэлементов дополнительно действует и третий фактор.

Влияние соотношения затененной и освещенной площади почвы и растительности обусловлено особенностями процесса рассеяния солнечной радиации в РП. Как было отмечено в разд. 3.2, поток диффузной радиации видимого диапазона, распространяющийся вертикально вверх, является в основном результатом первого акта рассеяния на освещенных компонентах РП. Отсюда очевидно, что увеличение видимой доли освещенной площади почвы $\mathcal{P}_\odot$

и растительности $B_{\odot} - (\mathcal{P}_{\odot} + B_{\odot})$ должно способствовать росту b_{λ} системы растительность—почва. Доля освещенной и затененной почвы для заданного направления визирования оценивается по формулам (3.6), (3.7). Используя аналогичные выражения для вероятностей наблюдения освещенных и затененных фитоэлементов, расположенных на различной глубине РП, и проводя интегрирование по всей толще полога растительности, можно получить соот-

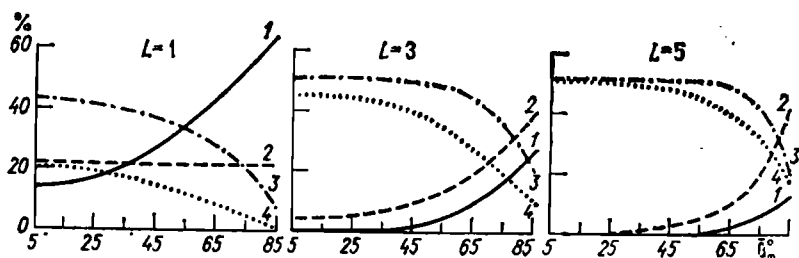


Рис. 3.6. Зависимость доли видимых освещенных (1, 3) и затененных (2, 4) участков почвы и растительности (%) от среднего угла наклона фитоэлементов θ_{ϕ} . Надир, $h_{\odot} = 65^{\circ}$.

1, 2 — почва, 3, 4 — растительность.

ношения, определяющие долю видимых освещенных $B_{\odot}$ и затененных B^* фитоэлементов для надира в зависимости от L и $h_{\odot}$:¹

$$B_{\odot} = \frac{G(0)}{G(0) + G(h_{\odot})/\sin h_{\odot}} \{1 - \exp(-L[G(0) + G(h_{\odot})/\sin h_{\odot}])\}, \quad (3.9)$$

$$B^* = B - B_{\odot} = \{1 - \exp[-LG(0)]\} - B_{\odot}. \quad (3.10)$$

Результаты расчета $\mathcal{P}_{\odot}$, $\mathcal{P}^*$, $B_{\odot}$, B^* по формулам (3.6), (3.7), (3.9) и (3.10) приведены в табл. 3.8 и на рис. 3.6. Видно, что по мере возрастания плотности РП независимо от пространственной ориентации происходит увеличение затененности. Отсюда следует, что действие рассмотренного первого фактора способствует формированию однонаправленной тенденции к убыванию b_{λ} при росте L .

Доля просвечивающей почвы при визировании в надир определяется как $(1 - B)$. Влияние этого фактора на вид функции $b_{\lambda}(L)$ зависит от соотношения спектральных коэффициентов отражения почвы и отдельных фитоэлементов:

— при $\rho > \rho_s$ смыкание полога РП ведет к увеличению восходящих потоков радиации и соответственно формируется монотонно возрастающая функция $b_{\lambda}(L)$;

— при $\rho < \rho_s$ смыкание полога РП ведет к уменьшению восходящих потоков радиации и соответственно формируется монотонно убывающая функция $b_{\lambda}(L)$.

¹ Полный вывод формул (3.9) и (3.10) сделан Т. А. Нильсоном.

Таблица 3.8

Доля видимой освещенной площади почвы и растительности $\mathcal{P}_{\odot} + B_{\odot}(\%)$ при визировании в надир для РП различной плотности L
Надир, $h_{\odot} = 65^{\circ}$

Ориентация	L		
	1	3	5
Горизонтальная	57	50	50
Сферическая	66	50	48
Вертикальная	74	47	33

Таблица 3.9

Относительные изменения $b_{\lambda}(\%)$ РП в различных диапазонах L
Надир, $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$, $h_{\odot} = 65^{\circ}$, $\rho_s = 0,10$,
 $\rho = 0,50$, $\tau/\rho = 0$

Ориентация	L				
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
Сферическая	90	5	5		
Вертикальная	60	25	10	5	
Горизонтальная	33	28	15	14	5

Примечание. За 100 % принято изменение b_{λ} в интервале L от 0 до 5.

Влияние многократного рассеяния на функцию $b_{\lambda}(L)$ однопавленное: рост L способствует увеличению диффузных потоков внутри РП, в том числе и потоков, рассеянных в верхнюю полусферу. В итоге многократное рассеяние способствует нивелированию убывающей функции $b_{\lambda}(L)$ и усилению возрастающей функции $b_{\lambda}(L)$.

3.4.2.2. Закономерности изменения b_{λ} РП в зависимости от L

Согласно результатам численных экспериментов, как и по данным измерений, зависимость b_{λ} от плотности полога РП может быть самой разнообразной (рис. 3.7). Задача состоит в том, чтобы упорядочить это разнообразие на основе изложенных выше представлений о факторах, влияющих в рамках модели на вид функции $b_{\lambda}(L)$. С этой целью нами была сделана попытка первоначально выделить ситуации, когда значения b_{λ} не зависят от L . Поиск подобных ситуаций осуществлялся путем выбора комбинаций значений ρ и ρ_s . В работе [15] были даны количественные оценки «пороговых» комбинаций ρ и ρ_s , при которых функция $b_{\lambda}(L)$ является нейтральной в некотором диапазоне ρ и ρ_s . Расширение этого диапазона в дальнейшем позволило упорядочить в целом характер зависимостей b_{λ} от L .

Рассмотрим сначала наиболее простой случай *непрозрачных фитоэлементов*.

Для «пороговых» комбинаций ρ и ρ_s было получено, что значения b_{λ} бесконечно плотного РП численно равны ρ_s (или b_s при допущении, что почва является матовой поверхностью). Используя это численное равенство и обозначив $b_{\lambda \rightarrow \infty} = \rho_s$ как ρ_s^n , можно найти значение ρ_s^n на основе уравнения (3.2) для $\tau/\rho = 0$:

$$\rho_s^n = k\rho. \quad (3.11)$$

Из табл. 3.1 следует, что для плотного РП k примерно равно 0,55 в случае горизонтальной ориентации, 0,32 — сферической и 0,07 — вертикальной. Таким образом, «пороговые» значения ρ_s^* прямо пропорциональны ρ и коэффициент пропорциональности зависит от пространственной ориентации фитоэлементов.

Схема, представленная на рис. 3.8, дает общий вариант решения задачи определения типа функции при известных ρ и ρ_s .

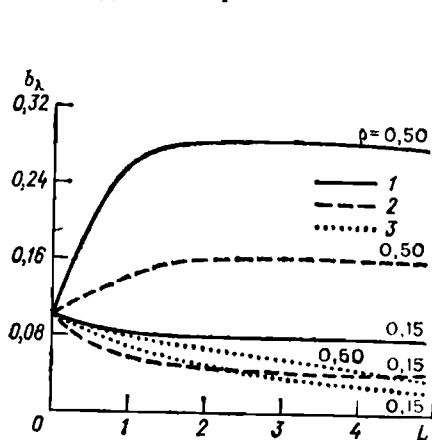


Рис. 3.7. Зависимость b_λ РП от относительной поверхности фитоэлементов L при различных типах ориентации. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, $\rho_s = 0,10$, $\tau/\rho = 0$.

Ориентация фитоэлементов: 1 — горизонтальная, 2 — сферическая, 3 — вертикальная; цифры у кривых — ρ .

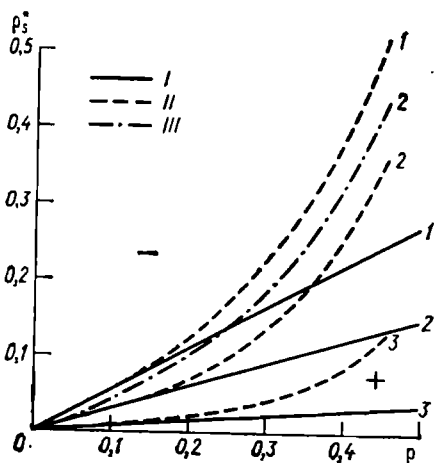


Рис. 3.8. График для определения типа связи b_λ с L в зависимости от ρ и ρ_s при различных типах ориентации. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

I) $\tau/\rho = 0$, $h_\odot = 65^\circ$; II) $\tau/\rho = 1$, $h_\odot = 65^\circ$; III) $\tau/\rho = 1$, $h_\odot = 15^\circ$; 1—3 — ориентация фитоэлементов (см. рис. 3.7).

Сплошной линией на этой схеме даны «пороговые» комбинации ρ и ρ_s для непрозрачных фитоэлементов. Из схемы следует, что если точка с координатами ρ_i и ρ_{si} лежит ниже «пороговой» линии (на графике область обозначена знаком +), то между b_λ и L существует прямая зависимость; если выше «пороговой» линии (на графике область обозначена знаком —), то между b_λ и L существует обратная зависимость; соответственно для «пороговых» комбинаций ρ и ρ_s b_λ не зависит от L .

Из рис. 3.8 видно, что при вертикальной ориентации фитоэлементов преобладают убывающие функции $b_\lambda(L)$ независимо от спектрального диапазона. Этот тип ориентации, так же как и условие $\tau/\rho = 0$, соответствует стеблям и колосьям. Следовательно, результаты, представленные на схеме для вертикальной ориентации, имеют и практическое значение. Из них очевидно, что в посевах злаковых культур на завершающих вегетацию фенофазах по мере увеличения доли стеблей и колосьев должно происходить

ослабление возрастающих зависимостей $b_\lambda(L)$ в определенных спектральных диапазонах.

На основе формулы (3.11) можно также количественно оценить максимально возможные изменения b_λ системы растительность—почва, обусловленные смыканием полога — $\Delta b(L)_{\max}$:

$$\Delta b_\lambda(L)_{\max} = \frac{b_{\lambda L \rightarrow \infty} - \rho_s}{b_{\lambda Z \rightarrow \infty}} = \frac{\rho_s^n - \rho_s}{\rho_s^n} = 1 - \frac{\rho_s}{k\rho} \quad (3.12a)$$

при $\rho_s^n > \rho$ (соответственно функция $b_\lambda(L)$ возрастающая) и

$$\Delta b_\lambda(L)_{\max} = \frac{b_{\lambda L \rightarrow \infty} - \rho_s}{\rho_s} = \frac{\rho_s^n - \rho_s}{\rho_s} = \frac{k\rho}{\rho_s} - 1 \quad (3.12б)$$

при $\rho_s^n < \rho$ (соответственно функция $b_\lambda(L)$ убывающая).

Так как в (3.12) входит коэффициент k , очевидно, что значения $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$ будут существенно зависеть от пространственной ориентации фитоэлементов. Для разных ориентаций на основе (3.12) можно решить и обратную задачу, задавая определенные значения $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$: найти сочетания ρ и ρ_s , при которых изменчивость яркостных характеристик РП, обусловленная колебаниями L , лежит в различных пределах.

Как видно из рис. 3.7, функция $b_\lambda(L)$ имеет плато насыщения. Плато формируется при тех значениях L , при которых B приближается к 100 %, т. е. когда почва полностью экранируется растительностью. Следовательно, чувствительность b_λ РП к изменению плотности полога при фиксированных значениях других входных параметров модели различна в зависимости от диапазона L (табл. 3.9). Чем больше выражена вертикальная ориентация фитоэлементов, тем шире диапазон L , в пределах которого b_λ реагирует на изменения L (табл. 3.9). В случае горизонтальной ориентации 90 % всех изменений b_λ за счет L в диапазоне $L=0 \div 5$ формируются при увеличении L от 0 до 1 (рис. 3.8, табл. 3.9).

Вывявленные особенности создают благоприятные предпосылки для индикации плотности полога по данным спектрометрических измерений, выполненных в надир, при ориентации фитоэлементов, отличной от горизонтальной. В то же время инвариантность b_λ РП к L в случае горизонтальной ориентации фитоэлементов при $L > 2$ определяет возможность индикации полегания посевов, когда отражающий слой растительности образован преимущественно непрозрачными стеблями и колосьями.

Теперь рассмотрим другой общий случай, когда РП сформирован прозрачными фитоэлементами.

Наличие пропускания у фитоэлементов приводит к следующим эффектам. Во-первых, нивелируется воздействие на b_λ РП характера затенения почвы и растительности (т. е. действие первого фактора), так как понижаются спектральные контрасты между

затененными и освещенными участками. Тем самым ослабевает тенденция к убыванию b_λ при увеличении L . Во-вторых, появляется дополнительный фактор, регулирующий радиационный режим РП — многократное рассеяние.

Таким образом, общим результатом воздействия τ является уменьшение чувствительности b_λ к изменению плотности полога по сравнению с рассмотренным выше случаем непрозрачных фитоэлементов.

Анализ, проведенный в разд. 3.2, показал, что роль многократного рассеяния особенно значима при высоких значениях ρ и τ , которые характерны для зеленой растительности в БИК-диапазоне и для желтой во всем оптическом диапазоне. Соответственно при $\rho < 0,20$ как «пороговые» значения ρ и ρ_s (рис. 3.8), так и относительные изменения b_λ РП, обусловленные изменениями L (табл. 3.10), инвариантны к соотношению τ/ρ . При $\rho > 0,20$ «поро-

Таблица 3.10

Относительные изменения b_λ (%) РП в диапазоне $L=0 \div 5$ при различной прозрачности фитоэлементов.

Надир, сферическая ориентация, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0=65^\circ$,
 $\rho=0,15$

ρ_s	τ/ρ				
	0,67	0,50	0,33	0,17	0,0
0,06	2	2	3	3	3
0,15	68	69	70	71	72
0,25	80	81	82	82	83

говые» значения ρ_s увеличиваются для прозрачных фитоэлементов по сравнению с непрозрачными (рис. 3.8). Причем, как видно из рис. 3.8, максимальная чувствительность «пороговых» сочетаний ρ и ρ_s к отношению τ/ρ отмечается в БИК-диапазоне (при $\rho > 0,35$).

Из соотношения значений ρ_s^n для РП, сформированного прозрачными и непрозрачными фитоэлементами, следует, что в период активной вегетации при доминировании зеленой растительности чувствительность b_λ к плотности полога в видимой области спектра можно оценивать по формуле (3.11). Соответственно можно пользоваться и схемой, представленной на рис. 3.8, для экспертных оценок вида функции $b_\lambda(L)$ без существенных поправок на различия в прозрачности фитоэлементов. Для желтой растительности в видимом диапазоне и независимо от ее цвета в БИК-диапазоне экспертные оценки вида функции $b_\lambda(L)$ следует проводить с учетом фракционного состава растительности для коррекции результатов по средневзвешенному значению τ для РП.

3.4.3. Выводы

Таким образом, теоретический подход позволяет систематизировать возможное разнообразие зависимостей b_λ от L с учетом изменения соотношений между отражательными характеристиками почвы и отдельных фитоэлементов. Причем эти соотношения в рамках принятой модели влияют на b_λ РП опосредованно через изменения доли видимых участков почвы, доли затененной и освещенной площади почвы и растительности, многократное рассеяние.

1. На основе предложенного подхода с использованием «пороговых» комбинаций ρ и ρ_* выявлены ситуации, при которых возможно формирование убывающей и возрастающей зависимостей b_λ от плотности полога. Эти ситуации суммированы в табл. 3.11, данные которой можно использовать для экспертных оценок.

2. Помимо вариантов, приведенных в табл. 3.11, существуют и нейтральные ситуации, когда значения b_λ инвариантны к L . Эти ситуации формируются при комбинации «пороговых» значений ρ и ρ_* , которые, в свою очередь, зависят от типа пространственной ориентации фитоэлементов. Определение характера зависимости b_λ от L с целью экспертных оценок можно проводить, используя схему, приведенную на рис. 3.8.

3. В видимом диапазоне при доминировании зеленого цвета растений «пороговые» значения ρ_* прямо пропорциональны ρ при любой прозрачности фитоэлементов. В БИК-диапазоне, а также во всем оптическом диапазоне при желтой окраске растительности значения ρ_* при фиксированном ρ возрастают по мере увеличения прозрачности фитоэлементов.

4. При фиксированном цвете растительности снижение ρ_* (темные сухие или влажные почвы) способствует усилению возрастающей зависимости b_λ от L и нивелированию убывающей зависимости.

5. При фиксированной яркости почвы повышение ρ (пожелтение при аномальном и нормальном развитии растений) способствует усилению возрастающей зависимости b_λ от L и нивелированию убывающей зависимости.

6. Влияние пространственной ориентации фитоэлементов на зависимость b_λ от L заключается в смещении «пороговых» ρ_* при фиксированных ρ в область более низких значений по мере увеличения углов наклона фитоэлементов. В результате расширяется диапазон ρ_* , в котором функция $b_\lambda(L)$ является убывающей. Этот вид зависимости наиболее характерен при вертикальной ориентации фитоэлементов. В итоге отклонение ориентации в сторону вертикальной способствует усилению связи b_λ с L в тех случаях, когда функция $b_\lambda(L)$ является убывающей (например, в красной области спектра). Те же отклонения приводят к уменьшению чувствительности b_λ к изменению L в случае возрастающей функции $b_\lambda(L)$ (например, в БИК-диапазоне).

Таблица 3.11

Общий характер зависимости между b_λ от L при условии визирования в надир.
 $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot > 55^\circ$

Цвет растительности	ρ_s	Видимый диапазон		БИК-диапазон
		зеленая область	красная область	
Горизонтальная ориентация				
Зеленый	$<0,06$	+	+	+
	$0,06-0,12$	+	+	+
	$>0,12$	—	—	+
Желтый	$<0,18$	+	+	+
	$0,18-0,30$	—	+	+
	$>0,30$	—	—	+
Сферическая ориентация				
Зеленый	$<0,04$	+	+	+
	$0,04-0,07$	+	—	+
	$0,07-0,25$	—	—	+
Желтый	$<0,10$	+	+	+
	$0,10-0,20$	—	+	+
	$0,20-0,25$	—	—	+
	$>0,25$	—	—	—
Вертикальная ориентация				
Зеленый	$<0,10$	—	—	+
	$>0,10$	—	—	—
Желтый	$<0,06$	+	+	+
	$0,06-0,10$	—	—	+
	$>0,10$	—	—	—
Примечание. b_λ возрастают с увеличением L (+) и уменьшаются с увеличением L (—).				

3.5. Влияние пространственной ориентации фитоэлементов

3.5.1. Постановка задачи

Пространственная ориентация фитоэлементов совместно с L является параметром, характеризующим структуру РП. Как было показано в разд. 2.4, пространственная ориентация изменяется в широких пределах в зависимости от вида растений, стадии их онтогенеза, условий произрастания и состояния РП (в том числе, густоты, характера увлажнения, наличия полегания и пр.). Наряду с низкочастотными колебаниями ориентации, вызванными

перечисленными выше причинами, существуют и высокочастотные, связанные, например, с изменением направления и скорости ветра.

Так как пространственная ориентация меняется взаимосвязанно с другими характеристиками состояния РП, трудно выделить собственно влияние ориентации на яркостные свойства РП. Для этого должны быть поставлены специальные натурные эксперименты, в ходе которых изменялась бы только ориентация фитоэлементов на фоне постоянных значений других параметров. Очевидно, что провести такие эксперименты сложно. Но даже при описании спектрометрируемого растительного объекта пространственная ориентация чаще всего игнорируется. С одной стороны, это связано с трудоемкостью измерений характеристик ориентации, с другой — с непониманием роли этого параметра в формировании спектрального образа РП. Редко, когда при интерпретации данных спектрометрических наблюдений отмечается изменение углов наклона фитоэлементов как одна из возможных причин колебания b_λ . Например, в работах [70, 82, 87, 102] авторы указывают на увеличение b_λ в красной области видимого диапазона и уменьшение в БИК-диапазоне при изменении ориентации от преимущественно вертикальной к горизонтальной в посевах пастбищных трав и некоторых сельскохозяйственных культур и объясняют выявленные тенденции уменьшением количества теней, а также доли видимой почвы. Но подобных работ единицы, поэтому не представляется возможным систематизировать тенденции изменения яркостных характеристик РП, связанных с изменением ориентации, на основе опубликованных данных измерений b_λ .

Особенности пространственной ориентации могут внести определенный «шум» при индикации состояния растительности по таким ведущим параметрам, как цвет и плотность РП. В то же время ориентация может быть самостоятельным индикатором состояния (например, полегания или изменений, вызванных дефолиацией хлопчатника и т. п.). При явной недостаточности экспериментальных исследований очевидна необходимость расчетных оценок роли ориентации отдельных фитоэлементов в формировании спектрального образа растительных объектов.

В модели Гоудриана предполагается симметрия распределений угла наклона фитоэлементов $g^*(\theta_\phi)$ по азимуту, что отвечает многим природным ситуациям (см. разд. 2.4). По этой причине далее анализируется зависимость b_λ РП только от углов наклона фитоэлементов θ_ϕ без учета их азимута. В расчетную схему введены

следующие значения входных параметров модели: $\bar{\theta}_\phi = 5 \div 85^\circ$, $L = 0,5 \div 5,0$, $\rho_s = 0,0 \div 0,35$, $\rho = 0,0 \div 0,5$, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$. Из-за незначительной роли вариаций пропускания фитоэлементов в формировании отражательных характеристик РП в видимом диапазоне (см. разд. 3.2) основное внимание уделяется анализу ситуаций, при которых $\tau/\rho = 1$. При выбранном угле падения солнечных лучей и при визировании в надир (как условий, максимально приближенных к вертикали) в сочетании с преобладанием

направленной составляющей S_λ в облучающем потоке влияние ориентации фитоэлементов на радиационный режим РП должно проявляться в наибольшей степени (см. разд. 2.4).

3.5.2. Основные результаты

3.5.2.1. Влияние типа распределения углов наклона фитоэлементов на b_λ РП

Как указывалось в разд. 2.4, пространственная ориентация фитоэлементов в случае отсутствия азимутальных различий может быть описана через: 1) средний угол наклона фитоэлементов $\bar{\theta}_\phi$, 2) дифференциальную функцию распределения угла наклона фитоэлементов $g^*(\bar{\theta}_\phi)$, 3) интегральную функцию распределения G , которая рассчитывается на основе $g^*(\bar{\theta}_\phi)$.

Для выяснения значения способа задания ориентации фитоэлементов при расчете b_λ РП по модели Гоудриана и соответственно для определения критерия сравнения различных типов ориентации были рассчитаны b_λ при трех модельных типах ориентации: плагиофильной, экстремофильной и равномерной [148]. Этим типам

ориентации соответствуют равные значения $\bar{\theta}_\phi$ (см. рис. 2.8). При плагиофильной ориентации совпадают модальные и средние значения $\bar{\theta}_\phi$. При экстремофильной ориентации распределение θ_ϕ бимодально, причем моды расположены в области наименьших и

Таблица 3.12

Относительные изменения b_λ (%) РП при равномерной, экстремофильной и плагиофильной ориентациях фитоэлементов

Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 = 65^\circ$, $\tau/\rho = 1$

ρ_s	ρ	L		
		1	3	5
0,06	0,075	3	7	9
	0,15	6	8	9
	0,45	11	8	6
0,15	0,075	3	3	7
	0,15	1	7	8
	0,45	8	7	5
0,25	0,075	5	3	7
	0,15	2	4	8
	0,45	6	6	5

Примечание. Относительные изменения Δb_λ рассчитаны как максимальная разность b_λ между двумя из трех значений b_λ для рассмотренных типов ориентации, нормированная к максимальному из сравниваемых значений b_λ .

наибольших значений θ_{ϕ} . В случае равномерной ориентации все значения θ_{ϕ} равновероятны. Таким образом, при расчетах b_{λ} менялась только функция $g^*(\theta_{\phi})$ при фиксированных значениях других входных параметров модели.

Результаты расчетов в виде относительных различий в оценках b_{λ} для сравниваемых распределений θ_{ϕ} приведены в табл. 3.12.

Как следует из этих данных, при постоянстве $\bar{\theta}_{\phi}$ изменение b_{λ} за счет типа распределения θ_{ϕ} в большинстве случаев не превышает 10 %. При этом соотношение ρ и ρ_s , а также плотность полога РП не влияют на конечный результат. Следовательно, полученный вывод справедлив для различных спектральных диапазонов и для РП с различными оптическими свойствами. Отсюда вытекает, что при исследовании закономерностей формирования спектрального образа растительных объектов на основе модели Гоудриана достаточно в первом приближении учитывать лишь те изменения

ориентации фитоэлементов, которые выражаются в изменении $\bar{\theta}_{\phi}$. Исходя из этого при оценке воздействия особенностей ориентации на отражательные свойства РП ниже рассматривается только зависимость b_{λ} от $\bar{\theta}_{\phi}$.

3.5.2.2. Факторы, определяющие зависимость b_{λ} РП от ориентации фитоэлементов

Влияние пространственной ориентации фитоэлементов на b_{λ} системы растительность—почва при фиксированных значениях других входных параметров модели обусловлено суммарным действием следующих факторов:

- 1) соотношением между видимыми площадями растительности V и почвы $\mathcal{P}$;
- 2) соотношением между освещенными и затененными участками почвы $\mathcal{P}_{\odot}$, $\mathcal{P}^*$ и растительности $B_{\odot}$, B^* ;
- 3) особенностями углового распределения радиации, рассеянной слоем растительности при различной ориентации фитоэлементов.

Рассмотрим, к каким тенденциям в поведении b_{λ} РП может привести каждый фактор в отдельности.

Проективное покрытие V определяется из (2.16), (2.17). Доля видимой почвы $\mathcal{P}$ равна $(1 - V)$. Как было показано в разд. 2.4, при равенстве всех прочих условий экранирование почвы растительностью убывает с ростом $\bar{\theta}_{\phi}$. Следовательно, если почва темнее растительности ($\rho > \rho_s$), формируется убывающая функция $b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\phi})$, если ярче ($\rho < \rho_s$), — возрастающая функция $b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\phi})$. Доля освещенных и затененных участков почвы и растительности тесно связана с ориентацией фитоэлементов (см. формулы (3.6), (3.7), (3.9) и (3.10)).

В разд. 3.4.2 указывалось, что общей тенденцией является повышение b_{λ} при увеличении доли освещенных компонентов РП.

Зависимости $\mathcal{P}_\odot$, $\mathcal{P}^*$, $B_\odot$ и B^* от $\bar{\theta}_\Phi$ представлены на рис. 3.6. Из этого рисунка видно, что, чем больше выражена вертикальность фитоэлементов, тем больше доля поверхности, освещенной прямыми солнечными лучами. Это является причиной возможного

формирования возрастающей функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$. Однако указанный эффект проявляется только в несомкнутых РП при $L < 3$. В случае $L > 3$ характер затенения растительности и почвы практически не зависит от $\bar{\theta}_\Phi$ за исключением интервала $\bar{\theta}_\Phi = 75 \div 90^\circ$. Очевидно, что степень воздействия на b_λ приведенных на рис. 3.6 вероятностных значений будет зависеть от ρ , τ и ρ_s .

Угловое распределение радиации, рассеянной слоем растительности в модели Гоудриана описывается с помощью весовой функции $B_e(\theta_0)$ (1.5). Знаменатель дроби в выражении (1.5) практически постоянен и приближенно равен L_s — толщине элементарного слоя. Следовательно, для B_e можно принять:

$$B_e \approx \frac{B_u(\theta_0) L_s G(\theta_0)}{L_s \sin \theta_0} \approx [B_u(\theta_0) G(\theta_0)] / \sin \theta_0, \quad (3.13)$$

если θ_0 отсчитывается от горизонта.

Для условий визирования в надир функция B_e принимает следующие значения при различных $\bar{\theta}_\Phi$:

$\bar{\theta}_\Phi, ^\circ$	0—15	16—30	31—45	46—60	61—75	76—90
B_e	0,067	0,062	0,054	0,041	0,026	0,008

Отсюда следует, что с увеличением вертикальности фитоэлементов яркость слоя растительности в направлении надир монотонно понижается. Таким образом, особенности углового распределения яркости слоя с различно ориентированными фитоэлементами способствуют формированию убывающей тенденции в изменении функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$.

3.5.2.3. Закономерности изменения b_λ РП в зависимости от $\bar{\theta}_\Phi$

Характер взаимодействия рассмотренных факторов зависит от плотности РП, поэтому и закономерности изменения функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ зависят от L .

Несомкнутый РП. В редких несомкнутых РП вид функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ определяется преимущественно действием первого фактора — соотношением B и $\mathcal{P}$, так как остальные два фактора компенсируют друг друга. В итоге, если фитоэлементы ярче почвы, формируется убывающая функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$; если почва ярче фитоэлементов, значения b_λ РП увеличиваются по мере роста $\bar{\theta}_\Phi$. Первое условие обычно выполняется в БИК-диапазоне. Соотношение $\rho < \rho_s$ является типичным для большинства растительных сооб-

ществ в красной области видимого диапазона при доминировании зеленого цвета растений. В случае близких значений ρ и ρ_s влияние $\bar{\theta}_\Phi$ на b_λ проявляется слабо.

Сомкнутый РП. Независимо от спектрального диапазона значения b_λ убывают по мере увеличения $\bar{\theta}_\Phi$ (рис. 3.9). Эта тенденция обусловлена преобладающим действием третьего фактора (угловым распределением радиации, рассеянной слоем), который приводит к уменьшению яркости при отклонении ориентации в сторону вертикальной.

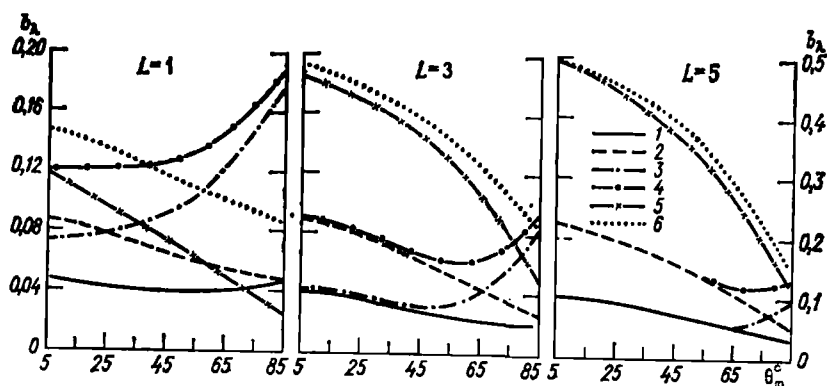


Рис. 3.9. Зависимость b_λ РП от среднего угла наклона фитоэлементов $\bar{\theta}_\Phi$. Наadir, $S_\lambda > D_\lambda$, $h_\Phi = 65^\circ$, $\tau/\rho = 1$.

1, 3, 5 — темные почвы ($\rho_s = 0,06$), 2, 4, 6 — светлые почвы ($\rho_s = 0,25$); 1—4 — видимый диапазон (левая ордината), 5, 6 — БИК-диапазон (правая ордината).

Среднесомкнутый РП. Как следует из рис. 3.9, функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ в интервале $L = 1 \div 3$ имеет наиболее сложный вид. Если почва ярче фитоэлементов, то при $\bar{\theta}_\Phi$ более 60° возникает точка перегиба, в которой убывающий характер зависимости $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$, типичный для сомкнутых РП, сменяется возрастающим, т. е. свойственным редким РП при данном соотношении ρ и ρ_s . Скорее всего нарушение монотонности функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ при больших $\bar{\theta}_\Phi$ обусловлено увеличением доли видимых освещенных участков почвы (см. рис. 3.6).
Оценка возможных изменений b_λ при отклонении ориентации фитоэлементов от сферической. В разд. 2.4 указывалось, что при моделировании радиационного режима РП ориентацию фитоэлементов часто аппроксимируют как сферическую. Поэтому есть смысл оценить ошибки, возникающие за счет отклонения ориентации от сферической в рамках рассматриваемой модели.

Сложность функций $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ затрудняет их описание в аналитическом виде и систематизацию. Из анализа, проведенного выше,

очевидно, что зависимость между b_λ и $\bar{\theta}_\Phi$, как и между b_λ и L , во многом определяется соотношением ρ и ρ_s . Опираясь на это свойство, мы попытались выявить «пороговые» комбинации ρ и ρ_s , при которых b_λ не зависит от $\bar{\theta}_\Phi$. Для этого были рассмотрены отдельно две ветви функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$: при $\bar{\theta}_\Phi < 57,5^\circ$ и $\bar{\theta}_\Phi > 57,5^\circ$. В первом случае можно проследить общие тенденции изменения b_λ за счет $\bar{\theta}_\Phi$ при отклонении ориентации от сферической в сторону горизонтальности, а во втором — в сторону вертикальности. Так

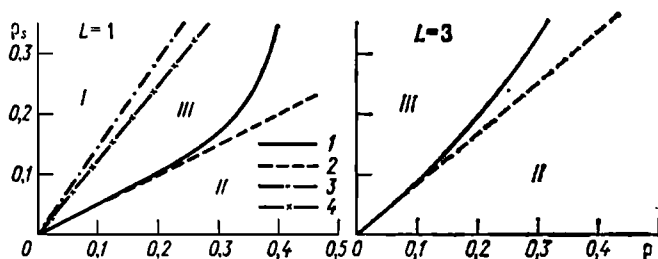


Рис. 3.10. График для определения типа связи b_λ РП со средним углом наклона фитоэлементов $\bar{\theta}_\Phi$. Надир, $S_\lambda > D_\lambda$, $h_0 = 65^\circ$.

Функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ нейтральная: 1, 2) при $\bar{\theta}_\Phi < 57,5^\circ$, 3, 4) при $\bar{\theta}_\Phi > 57,5^\circ$; 1, 3) $\tau/\rho = 1$, 2, 4) $\tau/\rho = 0$; области значений ρ и ρ_s , при которых: I) функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ возрастающая, II) функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ убывающая, III) функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ возрастающая для $\bar{\theta}_\Phi > 57,5^\circ$ и для $\bar{\theta}_\Phi < 57,5^\circ$.

как в ряде случаев функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ не является монотонной, следует иметь в виду, что в каждом из выделенных диапазонов $\bar{\theta}_\Phi$ (более или менее $57,5^\circ$) возможны отклонения для узких интервалов $\bar{\theta}_\Phi$ на фоне общих закономерностей изменения b_λ в зависимости от $\bar{\theta}_\Phi$.

На рис. 3.10 представлены схемы, позволяющие определить характер зависимости между b_λ и $\bar{\theta}_\Phi$ для двух наиболее сложных вариантов: несомкнутых РП ($L=1$) и среднесомкнутых ($L=3$). Согласно рис. 3.10, для редких РП выделяются три группы сочетаний ρ и ρ_s , для которых характерны следующие тенденции. В первой группе отклонение ориентации от сферической к горизонтальной сопровождается убыванием b_λ , отклонение к вертикальной — возрастанием b_λ . В целом функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ в интервале $\bar{\theta}_\Phi = 5 \div 85^\circ$ преимущественно возрастающая; возможна для b_λ РП в красной области видимого диапазона, а также в случае светлых почв в зеленой области.

Во второй группе отклонение ориентации от сферической к горизонтальной сопровождается увеличением b_λ , к вертикальной — убыванием b_λ . В целом функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ в интервале $\bar{\theta}_\Phi = 5 \div 85^\circ$ преимущественно убывающая; возможна для b_λ РП в БИК-диапазоне, в видимом диапазоне — при желтом цвете растительности и темных почвах.

В третьей группе отклонение ориентации от сферической как в сторону горизонтальности, так и в сторону вертикальности сопровождается увеличением b_λ . В целом функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ немонотонная и имеет точку перегиба в интервале $\bar{\theta}_\Phi = 57 \div 80^\circ$; возможна для b_λ РП в видимом диапазоне при малых спектральных контрастах между фитоэлементами и почвой.

Для среднесомкнутых РП тенденции, отмеченные выше для первой группы сочетаний ρ и ρ_s , практически отсутствуют (рис. 3.10). Причину этого можно понять, обратившись к рис. 3.9. Видно, что в среднесомкнутых РП отклонение ориентации в сторону горизонтальности, как правило, сопровождается увеличением b_λ . Тенденции во второй и третьей группах сочетаний ρ и ρ_s сохраняются для среднесомкнутых РП, причем область сочетаний этих величин, в которой формируется преимущественно убывающая функция $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$, несколько расширяется.

В природных РП отклонение ориентации в сторону вертикальности за счет увеличения доли стеблей, колосьев происходит совместно с изменением среднего значения τ . При оценке влияния τ на зависимость между b_λ и $\bar{\theta}_\Phi$ следует учесть два момента. Во-первых, роль τ в определении «пороговых» значений ρ и ρ_s существенна лишь при высоких значениях этих параметров. Во-вторых, τ минимизирует влияние условий затенения растительности и/или почвы на b_λ РП. Как видно из рис. 3.9, при высоких значениях ρ и ρ_s преобладают убывающие функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$. В то же время из рис. 3.6 следует, что изменение соотношения между освещенными и затененными участками при росте $\bar{\theta}_\Phi$ в редких РП обуславливает увеличение b_λ при больших $\bar{\theta}_\Phi$. Прозрачность фитоэлементов подавляет последний эффект. Следствием этого является усиление убывающего характера функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$. В итоге при фиксированном ρ «пороговые» значения ρ_s , при которых b_λ не зависит от $\bar{\theta}_\Phi$, увеличиваются по мере увеличения прозрачности фитоэлементов.

Более детальную количественную оценку возможных изменений b_λ в зависимости от $\bar{\theta}_\Phi$ при доминировании зеленого цвета растительности дает рис. 3.11. На этом рисунке представлены относительные изменения b_λ — $\Delta b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$, возникающие за счет отклонения

ориентации от сферической, для красной и зеленой областей видимого диапазона и для БИК-диапазона.

В видимом диапазоне b_λ наиболее чувствительны к изменению ориентации фитоэлементов в случае сомкнутых РП. Причем для красной области спектра чувствительность b_λ особенно выражена

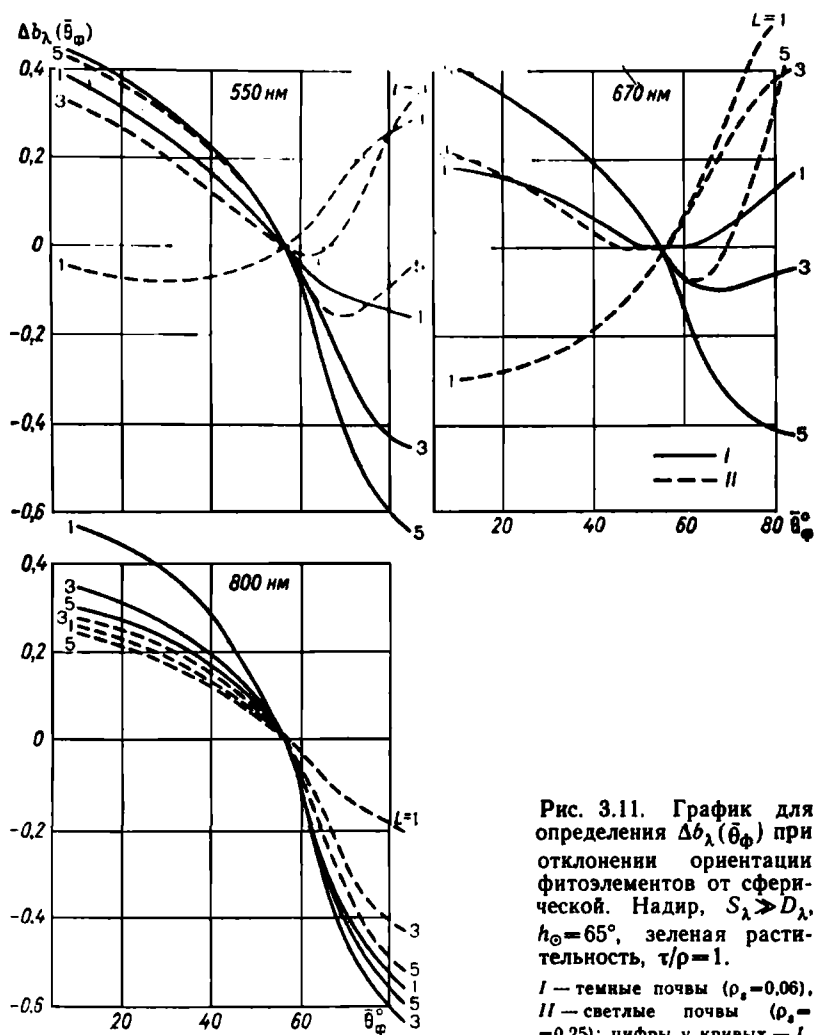


Рис. 3.11. График для определения $\Delta b_\lambda(\bar{\theta}_\phi)$ при отклонении ориентации фитоэлементов от сферической. Надир, $S_\lambda > D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, зеленая растительность, $\tau/\rho = 1$.

I — темные почвы ($\rho_s = 0.06$),
II — светлые почвы ($\rho_s = 0.25$); цифры у кривых — L .

при светлых почвах, т. е. в вариантах, наиболее контрастных по оптическим свойствам растительности и почвы. Также на светлых

почвах возможны значительные изменения b_λ за счет $\bar{\theta}_\phi$ во всем видимом диапазоне в случае очень редких РП. При равенстве всех прочих параметров отклонения ориентации в сторону вертикаль-

ности вызывают преимущественно более существенные изменения b_λ , чем отклонения в сторону горизонтальности. Отсюда следует, что при наличии вертикально ориентированных фитоэлементов (стеблей, колосьев) для характеристики пространственной ориентации необходимо вводить средневзвешенное для РП значение $\bar{\theta}_\Phi$ с учетом фракционного состава растительности.

Из рис. 3.11 также видно, что при интерпретации b_λ в БИК-диапазоне необходимо учитывать особенности ориентации фитоэлементов практически во всех природных ситуациях.

3.5.3. Выводы

Зависимость между яркостными характеристиками РП и ориентацией фитоэлементов является наиболее сложной по сравнению с зависимостями между b_λ и другими параметрами модели и в то же время наименее изученной.

1. В рамках модели Гоудриана b_λ РП практически инвариантны к типу распределения угла наклона фитоэлементов при постоянстве значений среднего угла наклона $\bar{\theta}_\Phi$.

2. В БИК-диапазоне значения b_λ убывают по мере роста $\bar{\theta}_\Phi$; в видимом диапазоне вид функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ существенно зависит от плотности РП, а также от соотношения между отражательными характеристиками почвы и отдельных фитоэлементов. Максимальная чувствительность b_λ РП к изменению $\bar{\theta}_\Phi$ отмечается при высокой плотности РП и/или при больших спектральных контрастах между почвой и фитоэлементами. Выявленная закономерность создает благоприятные предпосылки для индикации полегания, которому особенно подвержены густые посевы.

3. Наиболее значительные изменения b_λ РП происходят при отклонении ориентации от сферической в сторону вертикальности. В природе подобные изменения ориентации могут быть связаны с резким дефицитом влаги, а также с особенностями фракционного состава растительности. Следовательно, после стеблеобразования или при засухе для индикации плотности РП или цвета растительности необходим детальный учет пространственной ориентации фитоэлементов.

3.6. Влияние высоты Солнца

3.6.1. Постановка задачи

На основе опубликованных экспериментальных данных в период активной вегетации при доминировании зеленого цвета растений можно выделить следующие основные тенденции дневного хода b_λ .

Для несомкнутых РП вид функции $b_\lambda(h_\odot)$ различен в видимом и БИК-диапазонах. В красной области видимого диапазона преимущественно наблюдается увеличение b_λ с ростом $h_\odot$ или дневной ход b_λ не выражен [44, 90, 110, 116, 117, 127]. Максимальная дневная амплитуда характерна для РП на светлых почвах [44, 127]. В БИК-диапазоне отмечаются обратные тенденции дневного хода b_λ . Но в целом не выявлено каких-либо закономерных изменений амплитуды дневного хода b_λ в зависимости от спектрального диапазона.

Для сомкнутых РП возможен любой характер дневного хода в красной области видимого диапазона [32, 44, 110, 117, 127]. В БИК-диапазоне дневной ход выражен слабо с некоторой тенденцией к убыванию b_λ при высоких $h_\odot$.

Имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные не позволяют систематизировать особенности дневного хода b_λ для различных вариантов РП и почвенных условий и соответственно определить функции приведения b_λ к одной $h_\odot$. В то же время, используя математические модели для выявления закономерностей дневного хода b_λ , следует отчетливо представлять возможности модели и понимать, что полученные закономерности соотносятся с реальными в той степени, в какой модель соответствует исследуемому природному процессу.

Принятые в модели Гоудриана ограничения (неучет азимутов Солнца и направления визирования, а также эффектов обратного и зеркального блеска) приводят к искажению индикатрис отражения и заведомо предопределяют возможное несоответствие теоретических функций $b_\lambda(h_\odot)$ реально наблюдаемым в природе. Оценка этого несоответствия может быть проведена на базе как детальных полевых измерений дневной динамики индикатрис, так и с привлечением результатов численных экспериментов по моделям, в которых более корректно описана угловая структура b_λ (см. табл. 1.1).

В [78, 99] доказано свойство «взаимности», согласно которому

$$b_\lambda(h_\odot, \theta_0) = b_\lambda(\theta_0, h_\odot). \quad (3.14)$$

Следовательно, функция $b_\lambda(h_\odot)$ для $\theta_0 = 0^\circ$ описывает также изменения b_λ в зависимости от θ_0 при положении Солнца в зените.

Исследование зависимостей b_λ от $h_\odot$ в рамках модели Гоудриана выполнено для трех типов ориентации фитоэлементов при следующих условиях: $S_\lambda \gg D_\lambda$, $\rho = 0,0 \div 0,6$, $\rho_s = 0,0 \div 0,40$, $L = 0,5 \div 5,0$ [16].

В качестве параметра, характеризующего функцию $b_\lambda(h_\odot)$, рассматривалась амплитуда дневного хода $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ в интервале $h_\odot = 15 \div 65^\circ$.

Для возрастающей функции

$$\Delta b_\lambda(h_\odot)^+ = [b_\lambda(65^\circ) - b_\lambda(15^\circ)]/b_\lambda(65^\circ). \quad (3.15a)$$

для убывающей функции

$$\Delta b_\lambda(h_\odot)^- = [b_\lambda(65^\circ) - b_\lambda(15^\circ)]/b_\lambda(15^\circ) \quad (3.15b)$$

и для нейтральной функции

$$\Delta b_{\lambda}(h_{\odot}) \rightarrow 0. \quad (3.15в)$$

3.6.2. Основные результаты

3.6.2.1. Факторы, определяющие дневной ход

В рамках модели Гудриана основными факторами, определяющими характер зависимости b_{λ} от $h_{\odot}$ являются изменения:

1) соотношения между освещенными и затененными участками почвы и растительности;

2) оптической толщины РП.

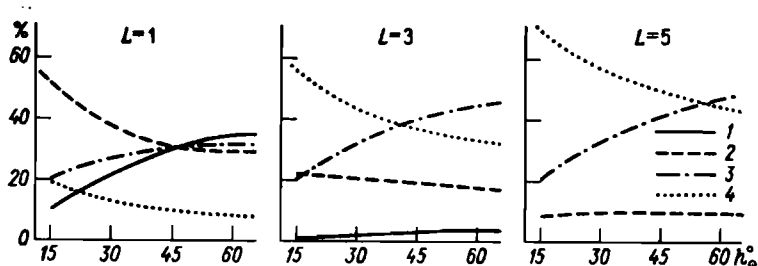


Рис. 3.12. Зависимость доли видимых освещенных и затененных участков почвы и растительности (%) от высоты Солнца $h_{\odot}$. Надир, сферическая ориентация фитоэлементов.

Усл. обозначения см. рис. 3.6.

С действием первого фактора связано уменьшение b_{λ} при низких $h_{\odot}$ как следствие увеличения доли затененных площадей в РП (рис. 3.12). Причем усиление этой тенденции возможно в случае малых ρ и τ , при которых образуются практически черные тени, резко контрастирующие с освещенными участками.

Действие второго фактора приводит к обратной тенденции: увеличению b_{λ} при низких $h_{\odot}$. Однако при анализе воздействия изменений оптической толщины РП на дневной ход b_{λ} следует учитывать два возможных аспекта. Первый — собственно влияние общей оптической толщины РП, определяемой длиной оптического пути солнечных лучей в толще полога, и второй — влияние части полога, составляющей «активный» слой РП.

С уменьшением $h_{\odot}$ и соответственно увеличением длины оптического пути возрастает вероятность взаимодействия радиации с фитоэлементами, что приводит к росту дополнительных диффузных потоков. В случае несомкнутого полога эти потоки без поглощения фитоэлементами распространяются в верхнюю полусферу. Поэтому при больших ρ и малых L могут формироваться значения b_{λ} , более высокие, чем при низких $h_{\odot}$.

В сомкнутых РП преобладающее воздействие на вид функции $b_{\lambda}(h_{\odot})$ может оказать толщина «активного» слоя полога. При высоких значениях L и низких $h_{\odot}$ лучи, поглощаясь в верхних слоях,

практически не доходят до нижних слоев РП. Из-за низкой освещенности последних b_λ всей системы растительность—почва формируется преимущественно за счет беспрепятственно распространяющихся в верхнюю полусферу потоков, отраженных от верхних слоев РП. При больших h_0 возрастает глубина проникновения солнечных лучей в РП и соответственно толщина «активного» слоя. В результате усиливается ослабление рассеянных вверх радиационных потоков. Указанные причины могут способствовать формированию убывающей функции $b_\lambda(h_0)$.

В итоге дневной ход b_λ в рамках модели Гоудриана для различных РП определяется действием фактора, который оказывается доминирующим в конкретной ситуации.

3.6.2.2. Закономерности дневного хода b_λ при сферической ориентации фитоэлементов

Рассмотрим сначала особенности дневного хода b_λ при *непрозрачных фитоэлементах*.

Несомкнутый РП. Дневной ход b_λ в редких несомкнутых РП формируется под воздействием изменения характера затенения, особенно почвы (рис. 3.12), и длины оптического пути солнечных лучей. Результирующая тенденция функции $b_\lambda(h_0)$ зависит от соотношения ρ и ρ_s . Как следует из рис. 3.13, выделяются «пороговые» значения ρ и ρ_s , при которых дневной ход b_λ отсутствует. Абсолютные значения амплитуды $|\Delta b_\lambda(h_0)|$ возрастают по мере удаления точки с координатами ρ , ρ_s от «пороговой» кривой.

С увеличением яркости почвы усиливается влияние затенения почвы—фактора, который способствует формированию возрастающей функции $b_\lambda(h_0)$. Поэтому максимальные значения $\Delta b_\lambda(h_0)^+$ возможны для РП на светлых почвах.

При высоких ρ , особенно в сочетании с низкими ρ_s , преобладают механизмы, связанные с изменением оптической толщины РП, в результате чего формируется убывающая функция $b_\lambda(h_0)$.

Сомкнутый РП. Как следует из рис. 3.14, дневной ход при смыкании полога выражен слабо, особенно при низких значениях ρ (т. е. в красной области видимого диапазона). За счет взаимной компенсации разнонаправленного воздействия на b_λ изменений толщины «активного» слоя РП и соотношения освещенных и затененных участков растительности формируются малые отрицательные ($<13\%$) амплитуды дневного хода b_λ .

Среднесомкнутый РП. В этом случае, как промежуточном между редким и сомкнутым РП, возможно формирование самых разнообразных тенденций дневного хода b_λ . При этом «пороговые» комбинации ρ и ρ_s , для которых $\Delta b_\lambda(h_0)$ близко к нулю, определяются простым соотношением: $\rho \approx \rho_s$ (см. рис. 3.13).

Теоретические тенденции дневного хода b_λ при *прозрачных фитоэлементах* зависят еще от одного переменного параметра— τ . При $\tau \neq 0$, во-первых, увеличивается кратность рассеяния радиации на фитоэлементах, что способствует усилению влияния изменений оптической толщины растительности. Во-вторых, уменьша-

ются спектральные контрасты между освещенными и затененными участками почвы и растительности, что приводит к ослаблению воздействия условий затенения компонентов системы растительность—почва. Таким образом, наличие пропускания у фитоэлементов увеличивает вероятность формирования убывающей функции $b_\lambda(h_\odot)$.

Несомкнутый РП. Для этих РП следствием перечисленных выше эффектов является смещение «пороговых» ρ_s при фиксированных ρ в область более высоких значений (см. рис. 3.13). При этом в видимом диапазоне только в случае сочетания очень свет-

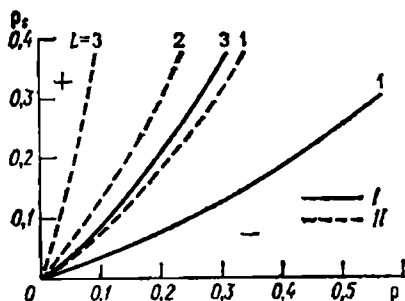


Рис. 3.13. График для определения типа дневного хода b_λ несомкнутых РП. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, сферическая ориентация фитоэлементов. I) $\tau/\rho=0$, II) $\tau/\rho=1$; цифры у кривых — L ; функция $b_\lambda(h_\odot)$ возрастающая (+) и убывающая (—).

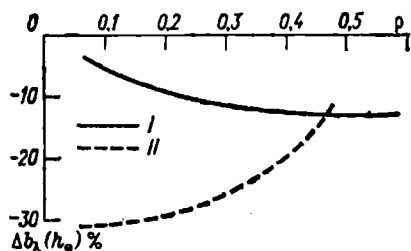


Рис. 3.14. Зависимость амплитуды дневного хода $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ сомкнутых РП от ρ . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, сферическая ориентация фитоэлементов. I) $\tau/\rho=0$, II) $\tau/\rho=1$.

лых почв и зеленой растительности ($\rho_s \gg \rho$) создаются условия для формирования возрастающей функции $b_\lambda(h_\odot)$.

Сомкнутый РП. Как следует из рис. 3.14, при прозрачных фитоэлементах сохраняется преобладание убывающей функции $b_\lambda(h_\odot)$ независимо от ρ_s . В отличие от варианта непрозрачных фитоэлементов $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ достигает максимальных значений (27—32 %) при $\rho=0,075 \div 0,20$, которые соответствуют различным оттенкам зеленого цвета в видимом диапазоне. По мере увеличения ρ (пожелтение растений и/или БИК-диапазон) дневной ход b_λ выражается слабее. Но при сокращении абсолютных значений амплитуд $|\Delta b_\lambda(h_\odot)|$ происходит одновременное усиление чувствительности $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ к изменению ρ . Из рис. 3.14 также видно, что дневная амплитуда b_λ достигает минимальных значений в БИК-диапазоне, причем значения $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ инвариантны к τ .

Из изложенных выше результатов анализа следует, что дневная динамика b_λ существенно зависит от плотности РП и эта зависимость должна учитываться при построении функций приведения значений b_λ к одной $h_\odot$. Примеры функций, полученные в рамках модели Гюдриана для зеленой растительности и различных

вариантов ρ_s , показаны на рис. 3.15. Видно, что при сферической ориентации фитоэлементов значения амплитуд дневного хода b_λ наиболее чувствительны к изменению плотности РП при больших спектральных контрастах между фитоэлементами и почвой.

3.6.2.3. Влияние пространственной ориентации фитоэлементов на дневной ход b_λ

В силу принятых в модели Гоудриана допущений о том, что компоненты системы растительность—почва являются ламбертов-

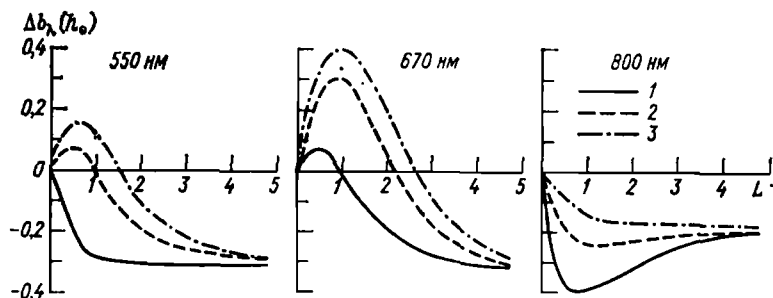


Рис. 3.15. Функции приведения амплитуды дневного хода b_λ к одной плотности полога L . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, сферическая ориентация фитоэлементов, зеленая растительность, $\tau/\rho=1$.

ρ ρ_s	550 нм			670 нм			800 нм		
	0,17			0,10			0,40		
	0,06 (1)	0,15 (2)	0,20 (3)	0,08 (1)	0,18 (2)	0,26 (3)	0,09 (1)	0,21 (2)	0,30 (3)

скими рассеивателями, зависимость отражательных свойств РП от угловых координат Солнца при горизонтальной ориентации фитоэлементов отсутствует. Следовательно, отклонение функции распределения θ_ϕ в сторону горизонтальности должно способствовать сглаживанию дневного хода b_λ .

При вертикальной ориентации фитоэлементов независимо от τ , L и ρ_s значения b_λ преимущественно увеличиваются при больших $h_\odot$ (рис. 3.16). В рамках общей тенденции дневные амплитуды увеличиваются при фиксированном ρ по мере роста ρ_s , а при фиксированном ρ_s — по мере снижения ρ . Прямая зависимость между b_λ и $h_\odot$ нарушается, если очень темные почвы сочетаются с высокими ρ . Подобная ситуация характерна для БИК-диапазона. Если почва много ярче фитоэлементов, то такое сочетание ρ и ρ_s способствует формированию нейтральной или даже слабо выраженной убывающей функции $b_\lambda(h_\odot)$.

Изменение $\bar{\theta}_\phi$ влияет не только на общие тенденции дневного хода b_λ . Как видно из данных, приведенных в табл. 3.13, с ориентацией фитоэлементов связаны относительные приращения b_λ

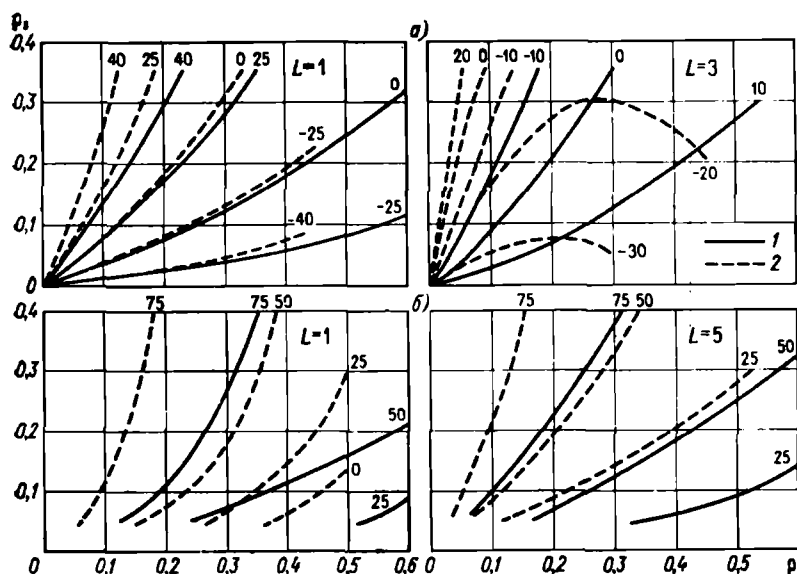


Рис. 3.16. Номограмма для определения амплитуды дневного хода b_λ . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

а — сферическая ориентация фитоэлементов, б — вертикальная; 1) $\tau/\rho=0$, 2) $\tau/\rho=1$; цифры у кривых — амплитуды b_λ (%).

Таблица 3.13

Относительные изменения b_λ (%) за счет изменений $h_\odot$ при различной относительной поверхности и пространственной ориентации фитоэлементов.

Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$ $\tau/\rho=1$

p	ρ_s	L	Сферическая ориентация			Вертикальная ориентация		
			$h_{\odot}^{\circ}$					
			15—30	30—45	45—60	15—30	30—45	45—60
0,075	0,10	1	+11	+6	+4	+34	+33	+16
		3	-12	-10	-4	+13	+25	+31
0,10	0,25	1	+22	+16	+6	+59	+37	+23
		3	-6	-4	0	+43	+44	+46
0,40	0,09	1	-20	-14	-8	+4	+2	0
		3	-13	-10	-8	+6	+2	-2
0,40	0,25	1	-9	-5	-3	+21	+13	+9
		3	-7	-7	-5	+14	+13	+15

Примечание. $\Delta b_\lambda(h_\odot)$ определено как разность между b_λ в рассмотренном интервале $h_\odot$, нормированная к максимальному из двух сравниваемых значений b_λ . Значение b_λ возрастает (+) и убывает (-) с увеличением $h_\odot$ в рассмотренном интервале $h_\odot$.

Теоретические оценки влияния высоты Солнца на зависимость $b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\phi})$ по модели Гоудранна Надир, $S_{\lambda} \gg L_{\lambda}$, $\tau/\rho = 1$, зеленая растительность

Спектральная область		Общие сведения				Количественные характеристики						
		Функция		Изменение $b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\Phi})$ при отклонениях ориентации от сферической		ρ	ρ_s	$ \Delta\lambda(\bar{\theta}_{\Phi}) $ (%) при отклонениях ориентации от сферической				
		L	$b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\Phi})$	$b_{\lambda}(h_{\odot})$		к гориз.	к вертикал.	$h_{\odot}^{\circ}$	к гориз.	к вертикал.	$h_{\odot}^{\circ}$	
сфер. ориент.	вертик. ориент.			45	65							45
K	1	Возр.	Возр.	Нивелируется с пониж. $h_{\odot}$		0,10	0,25	15	21	21	37	
БИК	1	Убыв.	Возр., нейтр.	Нивелируется		0,40 0,40	0,09 0,25	38 24	44 27	51 25	45 11	
				с пониж. $h_{\odot}$	с ростом $h_{\odot}$, особенно на светлых почвах							

К, З	1	Немоно- тонная	Близка к нейтр.	Возр.	$h_{\odot}$ не влияет	Нивелир. с пониж. $h_{\odot}$	0,10	0,10	14	14	7	22
К	5	Убыв.	Убыв.	Возр.	Нивелируется		0,10	0,25	38	43	56	25
					с пониж. $h_{\odot}$	с ростом $h_{\odot}$						
БИК	5	Убыв.	Убыв.	Слабо возр.	Нивелируется		0,40	0,25	27	32	60	50
					с пониж. $h_{\odot}$	с ростом $h_{\odot}$						
				Слабо убыв.	То же	$h_{\odot}$ не влияет	0,40	0,09	28	33	66	65

Примечание. $|\Delta b_{\lambda}(\bar{\theta}_{\Phi})|$ — разность b_{λ} для сферической и горизонтальной (или вертикальной) ориентаций, нормированная к максимальному из сравниваемых значений b_{λ} .

в различных интервалах $h_{\odot}$. При сферической ориентации чем больше $h_{\odot}$, тем в меньшей степени изменяются b_{λ} РП. Причем в интервале $h_{\odot}=45 \div 60^{\circ}$ амплитуда колебаний b_{λ} независимо от ρ и ρ_s не превышает $\pm 10\%$. При вертикальной ориентации в случае редких РП сохраняются особенности дневного хода b_{λ} , указанные для сферической ориентации. Однако при $L \geq 3$ максимальная чувствительность b_{λ} к изменению $h_{\odot}$ отмечается в интервале $45 \div 60^{\circ}$. Согласно этому результату, при наличии отклонений $\bar{\theta}_{\phi}$ в сторону вертикальности необходимо учитывать зависимость b_{λ} от $h_{\odot}$ даже в околополуденные часы.

В целом тенденции, обусловленные влиянием $h_{\odot}$ на зависимость b_{λ} от типа ориентации, которые вытекают из анализа модели Гудриана, систематизированы в табл. 3.14. Эти оценки могут быть полезны при сравнении результатов, полученных с помощью других ММРР.

3.6.3. Выводы

В рамках модели Гудриана основные закономерности дневного хода b_{λ} состоят в следующем:

1. Характер дневного хода b_{λ} РП определяется соотношением оптических свойств отдельных фитоэлементов и почвы, плотностью полога, прозрачностью фитоэлементов, а также их пространственной ориентацией.

2. В сомкнутых РП в видимом диапазоне при сферической ориентации фитоэлементов в период активной вегетации растений значения b_{λ} РП преимущественно увеличиваются по мере роста $h_{\odot}$. Для этих условий дневной ход b_{λ} наиболее выражен в случае светлых почв. Пожелтение растений способствует сглаживанию дневного хода b_{λ} при возможной смене его типа на обратный. В БИК-диапазоне преобладает уменьшение значений b_{λ} при увеличении $h_{\odot}$.

Различные тенденции дневного хода b_{λ} РП в красной области видимого диапазона и в БИК-диапазоне позволяют использовать линейные комбинации b_{λ} в этих двух спектральных областях в качестве характеристик, инвариантных к условиям освещения, при индикации состояния сомкнутых РП.

3. Для сомкнутых РП во всем оптическом диапазоне характерен дневной ход b_{λ} с минимумом в околополуденные часы.

4. Из всех рассмотренных вариантов РП влияние плотности полога на амплитуду дневного хода b_{λ} особенно выражено в видимом диапазоне в случае светлых почв.

5. Повышение прозрачности фитоэлементов при прочих равных условиях способствует усилению дневной динамики b_{λ} РП в видимой области спектра, а также в БИК-диапазоне для РП на темных почвах.

6. Отклонение ориентации фитоэлементов в сторону горизонтальности всегда способствует сглаживанию дневного хода b_{λ} .

7. Отклонение ориентации фитоэлементов в сторону вертикальности приводит к более сложным последствиям. Для несомкнутых РП наиболее вероятным является увеличение амплитуд дневного хода b_λ в видимом диапазоне, а в БИК-диапазоне, наоборот, уменьшение амплитуд. В случае плотного полога отмечается сглаживание дневного хода b_λ РП во всем оптическом диапазоне.

3.7. Влияние соотношения прямой и рассеянной радиации в облучающем потоке

3.7.1. Постановка задачи

Все ранее рассмотренные в разд. 3.2—3.6 зависимости b_λ от входных параметров модели были проанализированы для ситуации, когда на верхнюю границу РП поступает только прямая радиация. В реальных условиях даже при ясном небе доля прямой радиации значительно варьирует в зависимости от состояния атмосферы (см. разд. 2.5).

Вопрос о влиянии соотношения прямой S_λ и рассеянной D_λ составляющих облучающего потока на яркостные характеристики РП мало исследован. В [32] отмечается повышение b_λ клевера и разнотравно-злакового луга при увеличении D_λ . Причиной этого явления авторы считают различия индикатрис отражения объекта при облучении его прямой и рассеянной радиацией. Если доминирует прямая радиация в облучающем потоке, то индикатриса имеет вытянутую форму в направлении обратного или зеркального отражения, в результате чего в приемную часть прибора, визирующего в надир, попадает далеко не основная доля потока радиации, отраженной РП. Соответственно b_λ РП невелик. Если доминирует рассеянная радиация в облучающем потоке, то индикатриса имеет форму, близкую к сферической, что приводит к увеличению b_λ по сравнению с условиями ясной погоды. Также влиянием изменяющегося в течение дня соотношения D_λ и S_λ объясняется асимметрия дневного хода b_λ . По мнению авторов работы [32], дневной ход b_λ РП формируется в основном за счет индикатрисного эффекта, который является следствием изменения угловой структуры облучающего потока, характеризуемой отношением D_λ/S_λ . В то же время, согласно результатам, рассмотренным в разд. 3.6, дневной ход теоретически возможен и тогда, когда в облучающем потоке доля прямой радиации постоянна.

В целом данных о влиянии D_λ/S_λ на b_λ РП явно недостаточно для их систематизации.

В этом разделе рассматривается воздействие D_λ/S_λ на b_λ РП в рамках модели Гюдриана. Модель позволяет задавать произвольное угловое распределение яркости небосвода в предположении об азимутальной симметрии (см. разд. 1.2). Расчеты, выполненные Гюдрианом, показали, что расхождения в b_λ для двух теоретических типов угловой структуры D_λ (UOC и SOC) не

превышают 5—6 % [99]. Учитывая эти оценки, а также результаты натурных экспериментов, свидетельствующие о доминирующей роли размеров и размещения просветов в пологе РП в формировании радиационного режима растительных сообществ [12 и др.], при расчетах b_λ в качестве первого приближения яркость неба свода задавалась согласно УОС. Оценка влияния доли рассеянной радиации в суммарном облучающем потоке на b_λ РП проводилась для следующих вариантов: $D_\lambda/Q_\lambda = 0; 0,2; 0,4; 1,0$; $L = 0,5 \div 5,0$; $\rho = \tau = 0,075; 0,15; 0,40$; $\rho_s = 0,06 \div 0,25$; $h_\odot = 15 \div 65^\circ$ при сферической и вертикальной ориентации фитоэлементов.

3.7.2. Основные результаты

3.7.2.1. Зависимость b_λ РП от соотношения S_λ и D_λ в облучающем потоке при сферической ориентации фитоэлементов

В случае когда в облучающем потоке доминирует рассеянная радиация $D_\lambda \gg S_\lambda$, дневной ход b_λ системы растительность—почва отсутствует. Поэтому любое увеличение доли D_λ будет способствовать уменьшению зависимости b_λ от $h_\odot$. Очевидно, что чем больше возможная амплитуда дневного хода b_λ РП при прямой радиации $|\Delta b_\lambda^s(h_\odot)|$, тем чувствительнее b_λ к структуре падающего потока. Следовательно, максимальным влияние D_λ/Q_λ на b_λ может быть для несомкнутых РП при больших значениях спектральных контрастов между почвой и фитоэлементами, а также для всех сомкнутых РП при низких значениях ρ (т. е. в видимом диапазоне при зеленом цвете растительности).

Анализ результатов численного моделирования показал, что при сферической ориентации фитоэлементов b_λ РП в случае $D_\lambda \gg S_\lambda$ (b_λ^D) численно равны b_λ при прямой радиации (b_λ^s) для некоторой эффективной $h_\odot$, лежащей в пределах $35—45^\circ$ (табл. 3.15). Полученный вывод имеет важное методическое значение. Так как структура облучающего потока при эффективной $h_\odot$ ($h_{\odot \text{эф}}$) не влияет на b_λ , очевидно, что зависимость b_λ^D от прочих входных параметров модели будет такая же, как и при $h_{\odot \text{эф}}$ для b_λ^s . Используя это свойство, можно находить значения b_λ для суммарной радиации как взвешенную сумму b_λ^s для заданной $h_\odot$ и b_λ^s для $h_{\odot \text{эф}}$. Аналогичный прием используется и в расчетных схемах для спектрального альбеда [39, 46].

В случае $h_\odot \neq h_{\odot \text{эф}}$ соотношение между b_λ^s и b_λ^D определяется видом функции $b_\lambda^s(h_\odot)$ (рис. 3.17).

Если значения b_λ^s увеличиваются по мере роста $h_\odot$, то

$$b_\lambda^D > b_\lambda^s \text{ при } h_\odot < 40^\circ; \quad b_\lambda^D < b_\lambda^s \text{ при } h_\odot > 40^\circ. \quad (3.16a)$$

Если значения b_λ^s уменьшаются по мере роста $h_\odot$, то

$$b_\lambda^D > b_\lambda^s \text{ при } h_\odot > 40^\circ; \quad b_\lambda^D < b_\lambda^s \text{ при } h_\odot < 40^\circ. \quad (3.16b)$$

Очевидно, что указанные соотношения будут определять и изменения b_λ , обусловленные варьированием D_λ .¹

Учитывая инвариантность значений b_λ РП к D_λ/S_λ (и/или D_λ/Q_λ) при $h_\odot$ около 40° , целесообразно приводить данные измерений, полученные при других $h_\odot$, к b_λ при $h_\odot = 40 \div 45^\circ$. Этим приемом можно обеспечить сопоставимость результатов, полученных при различных условиях освещения. Как видно из

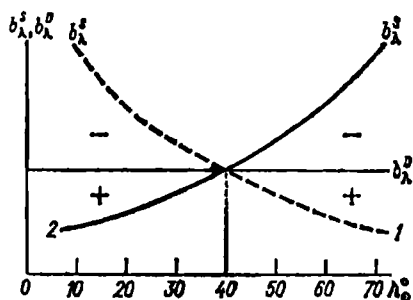


Рис. 3.17. Соотношение СКЯ при прямой (b_λ^s) и рассеянной (b_λ^p) радиации.

Функция $b_\lambda^s(h_\odot)$: 1 — убывающая, 2 — возрастающая.

Таблица 3.15

Отношение b_λ РП при прямой радиации к b_λ РП при рассеянной радиации в зависимости от высоты Солнца и пространственной ориентации фитоэлементов. Набир, $\tau/\rho=1$

ρ	ρ_s	L	$h_{\odot}^{\circ}$					
			15	25	35	45	55	65
Сферическая ориентация								
0,075	0,10	1	0,85	0,94	0,98	1,02	1,06	0,06
		3	1,21	1,11	1,04	0,96	0,93	0,93
0,15	0,06	1	1,22	1,08	1,00	0,95	0,92	0,90
		3	1,27	1,08	1,03	1,02	0,90	0,88
0,40	0,09	1	1,37	1,17	1,03	0,94	0,86	0,84
		3	1,19	1,11	1,04	0,98	0,93	0,89
Вертикальная ориентация								
0,15	0,06	1	0,57	0,76	0,89	1,03	1,14	1,24
		3	0,74	0,74	0,83	0,91	1,09	1,26
		5	0,94	0,94	0,94	1,00	1,06	1,24
0,25	0,25	1	0,48	0,67	0,86	1,04	1,19	1,30
		3	0,52	0,69	0,88	1,09	1,32	1,61
		5	0,67	0,71	0,75	0,83	1,00	1,33
0,40	0,09	1	0,95	0,99	1,00	1,01	1,01	1,02
		3	0,95	1,00	1,03	1,03	1,02	1,00
		5	0,93	1,00	1,03	1,04	1,03	1,01
0,40	0,25	1	0,70	0,84	0,94	1,03	1,10	1,16
		3	0,73	0,81	0,89	0,98	1,09	1,20
		5	0,79	0,85	0,91	0,97	1,04	1,15

¹ Аналогичные соотношения для спектрального альбеда были получены Х. Г. Тоомингом (1960 г.).

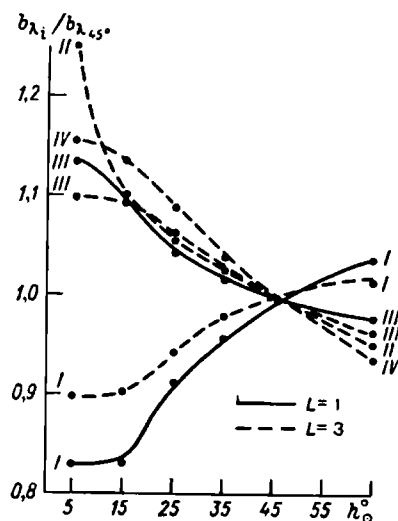


Рис. 3.18. Функции приведения b_{λ_i} , измеренных при некоторой высоте Солнца (b_{λ_i}), к b_{λ} при $h_\odot=45^\circ$ ($b_{\lambda_{45^\circ}}$). Надир, $S_\lambda=0,6$, $D_\lambda=0,4$, сферическая ориентация фитоэлементов, $\tau/\rho=1$.

I) $\rho=0,075$, $\rho_s=0,10$; II) $\rho=0,15$, $\rho_s=0,06$;
III) $\rho=0,40$, $\rho_s=0,25$; IV) $\rho=0,40$, $\rho_s=0,09$.

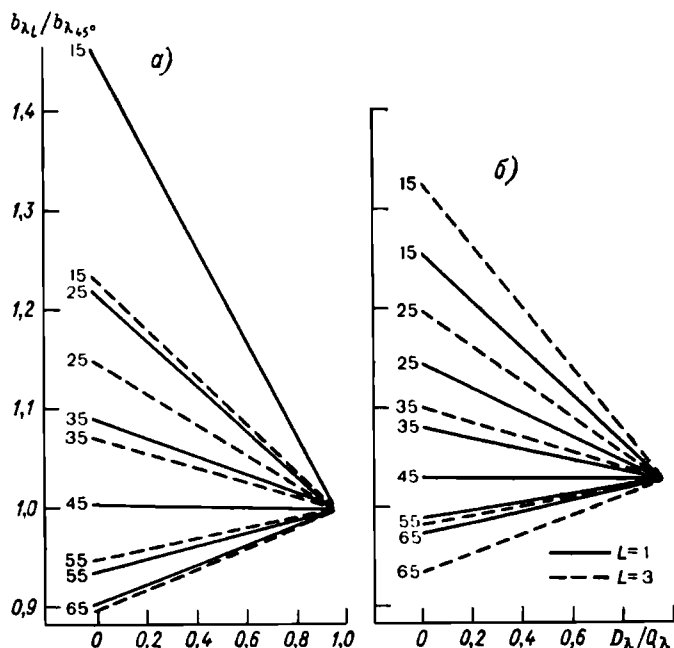


Рис. 3.19. Изменение функций приведения b_{λ} РП, измеренных при некоторой высоте Солнца (b_{λ_i}), к b_{λ} при $h_\odot=45^\circ$ ($b_{\lambda_{45^\circ}}$) в зависимости от соотношения прямой и рассеянной радиации в облучающем потоке. Надир, сферическая ориентация фитоэлементов, $\tau/\rho=1$.

а) $\rho=0,40$, $\rho_s=0,09$; б) $\rho=0,15$, $\rho_s=0,06$; цифры у кривых — высота Солнца.

рис. 3.18 и 3.19, функции приведения будут зависеть от плотности полога, а также оптических свойств почвы и фитоэлементов.

3.7.2.2. Зависимость b_λ РП от соотношения S_λ и D_λ в облучающем потоке при вертикальной ориентации фитоэлементов

Для оценки влияния D_λ/S_λ на b_λ РП при вертикальной ориентации фитоэлементов был проведен анализ, аналогичный выполненному для варианта сферической ориентации. Сначала был рассмотрен дневной ход b_λ РП при доминировании рассеянной радиации и выявлены условия, при которых соблюдается равенство $b_\lambda^s = b_\lambda^D$. Так как для вертикальной ориентации фитоэлементов формируется более сложная зависимость b_λ от $h_\odot$, то значения $h_{\odot \text{эф}}$ существенно зависят от плотности полога и спектральных контрастов между фитоэлементами и почвой. Из данных табл. 3.15, следует, что при $L \geq 3$ значение $h_{\odot \text{эф}}$ смещается в интервал $h_\odot = 45^\circ \div 55^\circ$. Исключение составляют ситуации, когда функция $b_\lambda^s(h_\odot)$ является немонотонной (БИК-диапазон, темные почвы). Однако этим эффектом можно пренебречь, так как различия между b_λ при прямой и рассеянной радиации не превышают 7 %.

3.7.3. Выводы

1. Проведенный анализ результатов численного моделирования показал, что зависимость b_λ от D_λ/S_λ определяется не только индикатрисным эффектом, но и различиями в рассеянии компонентами РП диффузного и направленного радиационных потоков.

2. Знак изменений b_λ , связанных с увеличением доли D_λ в облучающем потоке при фиксированной $h_\odot$, определяется характером дневного хода b_λ для данного РП при доминировании прямой радиации.

3. Существуют интервалы $h_\odot$, в которых яркостные характеристики системы растительность—почва не зависят от D_λ/S_λ : для сферической ориентации $35^\circ\text{—}45^\circ$, для вертикальной $40^\circ\text{—}55^\circ$. Этот результат для b_λ согласуется с оценками эффективной $h_\odot$ для A_λ и A , полученными на основе других математических моделей отражения, также базирующихся на теории переноса излучения в мутной среде [39, 46]. Этот же результат подтверждает целесообразность эмпирического приема приведения данных измерений b_λ к b_λ при $h_\odot = 45^\circ$ [32 и др.].

3.8. Сравнение результатов численных экспериментов, выполненных по разным моделям отражения

К настоящему времени опубликованы некоторые результаты численных экспериментов¹, проведенных по моделям Суитса,

¹ Подавляющий объем информации по этому вопросу содержится в источниках, не поступающих в СССР.

Сравнение теоретических тенденций изменения b_{λ} РП в зависимости от ориентации фитоземлементов и высоты Солнца по разным моделям для условий визуирования в надир
(для модели Сунтса см. данные табл. 1.2)

Автор, модель	L	Ориентация фитоземлементов	λ°	Спектральный диапазон	Характеристики оптических свойств фитоземлементов и почвы			Тенденция изменения ¹ b _λ		
					ρ	τ	ρ _g	I	II	
Зависимость b _λ (θ _φ)										
D. S. Kimes и др. (1984 г.)	6	Эректофильная — сферическая — планофильная	64,3	К	0,05	0,05	0,12	—	—	—
	3	Эректофильная — планофильная	27	БИК	0,45	0,45	0,23	—	—	—
				К	0,08	0,07	Нет данных	—	—	—
SAIL [53]	1	Эректофильная — планофильная	60	БИК	0,40	0,48	0,18	—	—	+
			К	Зеленые				+		
	1	То же	60	БИК			0,29	—	—	—
	4		60	К			0,18	—	—	—
4			60	БИК						

Зависимость $b_\lambda (h_0)$

D. S. Kimes и др. [106]	0,3	Сферическая	Зависимость $b_\lambda (h_0)$						
			23—90 ¹	К	0,05	0,05	0,31	+	+
	1,4	"	23—90	К	0,12	0,08	0,34	+	+
				К	0,12	0,08	0,00	—	—
				К	0,00	0,00	0,24	+	+
	6	"	23—90	К	0,05	0,05	0,12	0	—
	6	Эректофильная	23—90	К	0,05	0,05	0,12	0	Отклонение ориентации к вертикальной и горизонтальной уменьшает амплитуду дневного хода
	6	Планофильная	23—90	К	0,05	0,05	0,12	0	
SAIL [144]	2	Сферическая	15—65	3	0,135	0,055	0,126	+	+
				БИК	0,520	0,440	0,286	—	—

¹ Тенденции получены: I — по моделям разных авторов, II — по модели Гюдрмана; функции $b_\lambda(\theta_0)$, $b_\lambda(h_0)$ возрастающие (+), убывающие (—) и нейтральные (0).

Kimes, SAIL и CUPID¹. Их сравнение с расчетными оценками b_λ по модели Гоудриана ограничено по следующим причинам. Во-первых, ни для одной из ММРР не выполнена систематизация зависимостей b_λ , подобно сделанной нами для модели Гоудриана. Это не позволяет сравнивать общие закономерности формирования b_λ РП для ситуаций, имитирующих возможное природное разнообразие состояния растительности и почвы. Во-вторых, в литературе при описании численных экспериментов не всегда конкретизированы значения всех входных параметров. Это не позволяет провести количественное сравнение b_λ , для которого требуется полное совпадение значений входных параметров. В итоге мы располагали малочисленными результатами расчетов b_λ , сопровождающимися информацией о параметрах, положенных в основу систематизации закономерностей формирования b_λ по модели Гоудриана. Соответственно указанные ограничения позволили провести сравнение зависимостей b_λ только на уровне тенденций.

Как было показано в разд. 1.1, основные различия между ММРР заключаются в детальности описания геометрии освещения и визирования, а также структуры РП. Поэтому можно полагать, что специфика модели Гоудриана не скажется на характере связи между b_λ и оптическими свойствами фитоэлементов и почвы. Это предположение подтверждается совпадением вида зависимости b_λ от ρ_s , полученным при расчетах по разным моделям (см. разд. 3.3). Также в целом совпадают зависимости b_λ от L , полученные с помощью моделей Гоудриана и Суитса (табл. 1.2 и [119]), однако сравнение с другими ММРР провести нельзя из-за отсутствия необходимых данных.

При фиксированном направлении визирования наиболее существенные расхождения в закономерностях, вытекающих из различных моделей, можно ожидать для зависимостей b_λ от угловых характеристик θ_ϕ и $h_\odot$. Тем не менее для большинства приведенных в табл. 3.16 ситуаций функции $b_\lambda(\bar{\theta}_\phi)$, $b_\lambda(h_\odot)$, полученные с помощью модели Гоудриана и других, более сложных моделей, совпадают. Исключение составляет зависимость $b_\lambda(h_\odot)$ для РП с высоким L . Следовательно, ограничения, заложенные в модели Гоудриана, для рассмотренных комбинаций входных параметров не приводят к принципиальным отклонениям в характере получаемых связей между b_λ и $\bar{\theta}_\phi$ независимо от L , а также между b_λ и $h_\odot$ в случае несомкнутых РП.

Сходство тенденций изменения b_λ для несомкнутых РП позволяет предполагать, что механизмы, учитываемые в модели Гоудриана (см. разд. 3.5 и 3.6), оказывают определяющее воздействие на b_λ . В РП с высокой плотностью полого весьма вероятно существенное влияние индикатрис отражения на вид функции $b_\lambda(h_\odot)$.

¹ Данные по моделям А. Кууска и Т. Нильсона, относящиеся преимущественно к исследованию индикатрис отражения, для сравнения с моделью Гоудриана не привлекаются.

Так как этот эффект не описывается Гудрианом, то полученные в рамках модели оценки скорее всего дают самую грубую схему дневного хода b_λ , принципиальные стороны которой необходимо проверить в натурном эксперименте. Не вполне ясно сейчас и как повлияет учет индикатрисы на зависимости b_λ от структуры РП при других комбинациях значений входных параметров. Для этого нужно провести в дальнейшем расчеты b_λ для широкого набора значений параметров и систематизацию расхождений в теоретических оценках b_λ по разным ММРР.

3.9. Зависимость комбинаций СКЯ от входных параметров модели

3.9.1. Постановка задачи

В настоящее время в практике дистанционного зондирования широко используются самые разнообразные комбинации яркостных характеристик. Чисто эмпирическим путем подбираются индексы (основанные на отношениях, разностях, суммах и прочих линейных комбинациях результатов измерений в различных спектральных диапазонах), наиболее чувствительные к изменению плотности полога или цвета растительности и наиболее инвариантные к яркости почвы, условиям освещения и другим факторам, затрудняющим определение искомым параметров РП. Несомненным преимуществом использования комбинаций яркостных характеристик является также сжатие многоспектральной информации, которое несколько упрощает математическую процедуру ее обработки при решении задач распознавания и идентификации.

В цикле работ С. J. Tucker и др. за 1977—1985 гг. (в том числе [112, 143]) рассмотрено большое число различных индексов с позиций их применения для оценки характеристик РП. Распространенное отношение данных в БИК-диапазоне и в красной области видимого диапазона, предложенное С. F. Jordan в 1969 г. [111], впоследствии подробно было исследовано в работах В. И. Рачулика и М. В. Ситниковой и внедрено ими в практику агрометеорологической службы страны для определения запасов фитомассы, L и/или B естественных травостоев и посевов [44]. В 1977 г. А. J. Richardson, С. L. Wiegand [129] ввели «перпендикулярный вегетационный индекс» PVI, который в координатах $b_{\text{БИК}}$ и b_K графически выражается ортогональным отрезком от точки на линии, соответствующей растительности, к почвенной линии. Этот индекс является двумерным аналогом линейной комбинации, введенной R. J. Kauth и G. S. Thomas [113] для анализа многоспектральных измерений «Ландсат». Не останавливаясь здесь на описании различных линейных преобразований четырехмерных данных «Ландсат» и шестимерных для Тематического картографа ТМ (см. в том числе обзор в [30], а также [85, 86, 113]), отметим, что эти и любые другие спектральные комбинации в основном подбираются

экспериментально, исходя из известных особенностей кривых отражения растительности и почвы.

Несмотря на апробацию большинства комбинаций при решении обратных задач, практический опыт показывает, что в одних случаях с помощью какой-либо комбинации можно восстановить оценки искомых характеристик РП, а в других та же комбинация оказывается малополезной при решении подобной задачи. Учитывая неоднозначность экспериментальных результатов, с методической точки зрения представляется целесообразным исследовать закономерности изменения спектральных комбинаций на основе численного моделирования, имитирующего разнообразие природных условий. Впервые такое исследование было проведено Бунником [73] с помощью модели Суитса для гомогенного полога гипотетического РП, сформированного фитоэлементами, оптические свойства которых соответствовали зеленым листьям пшеницы, бобов и кукурузы.

В развитие работы [73] нами на модели Гоудриана также для условий визирования в надир было проанализировано поведение 10 комбинаций b_λ в зеленой, красной областях видимого диапазона и в БИК-диапазоне, в том числе:¹

$$\begin{aligned} P_1 &= \text{БИК}/K; \quad P_2 = K/3; \quad P_3 = 3 \cdot \text{БИК}/K; \quad P_4 = K \cdot \text{БИК}/3; \\ P_5 &= (3 - K)/(3 + K); \quad P_6 = (\text{БИК} - 3)/(\text{БИК} + 3); \\ P_7 &= P_3 \cdot \text{БИК}; \quad P_8 = (\text{БИК} - K)/(\text{БИК} + K); \quad P_9 = (P_8 + 0,5)^{1/2}; \\ P_{10} &= [(\text{БИК} - K)^2 + (\text{БИК}_s - K_s)^2]^{1/2} = [PVI^2 + 2(\text{БИК}_s - K) \times \\ &\quad \times (\text{БИК} - K_s)]^{1/2}. \end{aligned}$$

При этом P_8 есть вегетационный индекс «нормализованная разность» — ND, P_{10} есть аналог PVI в интерпретации [129] (БИК_s и K_s соответствуют b_s), при этом искусственное введение добавки к PVI позволяет усилить различия, обусловленные яркостью почвы.

Указанные P_i (далее в тексте они называются комплексными спектральными индексами) были рассчитаны при следующих значениях входных параметров. Значения ρ были заданы как соответствующие листьям разного цвета от зеленого до желтого [73]: для 550 нм — от 0,15 до 0,25, для 670 нм — от 0,075 до 0,35 и для 750—800 нм — от 0,40 до 0,45; прозрачность листьев задавалась как $\tau/\rho=1$. Значения ρ_s были заданы для светлой (в видимом диапазоне 0,15 и в БИК 0,25) и для темной (соответственно 0,06 и 0,10) почв. Плотность полога для всех вариантов по h_0 (15, 45 и 65°), ρ и ρ_s задавалась в интервале L от 0,5 до 5; пространственная ориентация фитоэлементов — согласно типам распределения углов наклона, по де Виту [148]. Отметим, что за счет большего (по сравнению с использованным в [73]) интервала значений ρ полученные оценки позволяют рассматривать изменчивость P_i для

¹ Обозначение b_λ в выражениях для расчета их комбинаций опущено.

условий, имитирующих различные фазы и некоторые стрессовые состояния (например, засуху). В целом в анализ было включено около 2140 теоретических оценок P_i , соответствующих разнообразным сочетаниям характеристик растительности и отражательных свойств почв.¹

Для того чтобы выявить преимущество какой-либо из 10 комбинаций b_λ при восстановлении параметров модели, были рассчитаны также относительные изменения P_i

$$\Delta P_i = (P_{i_{\max}} - P_{i_{\min}}) / P_{i_{\max}}, \quad (3.17)$$

где $P_{i_{\max}}$ и $P_{i_{\min}}$ — максимальные и минимальные значения P_i при заданном интервале значений входных параметров модели.

3.9.2. Основные результаты ²

Влияние высоты Солнца. При выборе вегетационных индексов прежде всего стараются снизить чувствительность отражательных свойств к условиям освещения. Достигается это путем комбинаций характеристик отражения в видимом и БИК-диапазонах, так как в этих диапазонах они имеют разнонаправленные тенденции дневного хода (см. разд. 3.6). Однако конечная зависимость P_i от $h_\odot$ определяется не только типом функции $b_\lambda(h_\odot)$, но и амплитудами b_λ в интервале $h_\odot = 15 \div 65^\circ$. Согласно данным [19, 59], инвариантным к изменению $h_\odot$ является достаточно большой набор P_i , но унифицированной комбинации b_λ , которую можно использовать при различных сочетаниях L , ρ и ρ_s , нет. По теоретическим оценкам, максимальной чувствительностью к изменению $h_\odot$ ($\Delta P_i > 50\%$) для несомкнутых РП обладают индексы P_7 , P_3 , P_1 и P_5 , что заведомо ограничивает их применение при восстановлении искоемых параметров РП по измерениям яркостных характеристик, выполненным в различное время. В большинстве рассмотренных вариантов по ρ и ρ_s при $L \geq 3$ для P_2 и P_8 характерны ΔP_i менее 10%. Очевидно, что полученные зависимости $P_i(h_\odot)$ в той степени соответствуют реальным условиям, в какой модель Гоудриана адекватно описывает дневной ход b_λ . Учитывая ограничения модели, теоретические зависимости P_i от входных параметров модели рассматриваются ниже только для $h_\odot$ более 45° .

Влияние почвенного фона. Второй фактор, влияние которого стремятся минимизировать при восстановлении характеристик РП за счет минимирования b_λ , — это отражение почвы. Использование в расчетах P_i значений ρ_s для темных и светлых почв позволило выявить индексы, чувствительность которых к L , θ_ϕ и ρ не зависит от ρ_s (табл. 3.17). Так, P_{10} теоретически должен одинаково реагировать на изменение ориентации в РП различной плотности и цвета (в несомкнутых РП) в случае как темных, так и

¹ Расчеты P_i были выполнены под нашим руководством Е. В. Фадеевой, А. В. Ольчевым и А. Н. Голубевым, ΔP_i — Е. В. Фадеевой.

² Раздел подготовлен совместно с Е. В. Фадеевой.

светлых почв. Вероятна также слабая зависимость от ρ_s чувствительности P_1 и P_4 к L при доминировании зеленого цвета растений, P_6 — в случае желтой растительности. На различных поч-

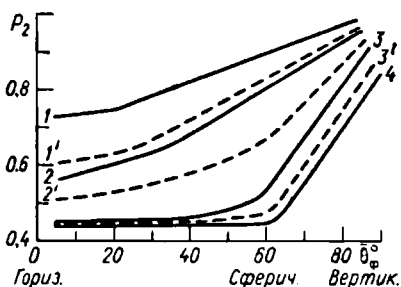
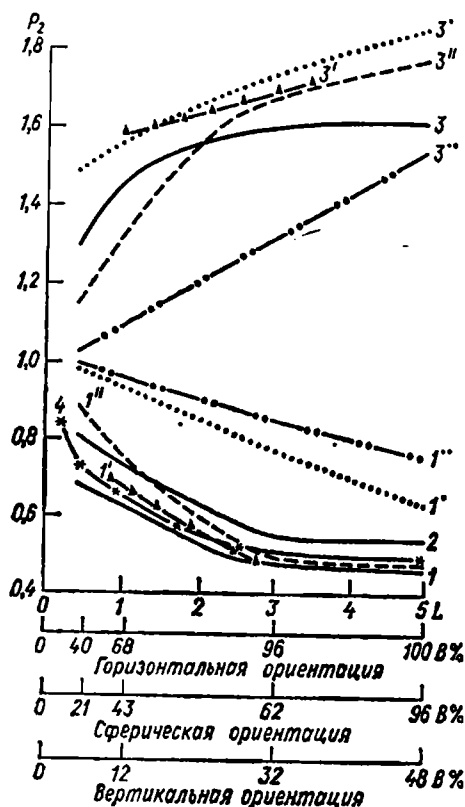


Рис. 3.21. Зависимость между P_2 и средним углом наклона фитоэлементов θ_ϕ для зеленой растительности. Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $\rho_k=0,075$, $\rho_s=0,15$; $\rho_{sk}=0,15$, $\rho_{s3}=0,15$ (светлые почвы); $\rho_{sk}=0,06$, $\rho_{s3}=0,06$ (темные почвы).

1, 1' $L=0,5$, 2, 2' $L=1$, 3, 3' $L=3$, 4) $L=5$; почвы: светлые (1—4), темные (1'—3').

Рис. 3.20. Зависимость между P_2 и относительной поверхностью фитоэлементов L . Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1—3), сферическая (1', 3', 1'', 3'', 4), вертикальная (1'', 3'', 1'', 3''); почвы: светлые (1'', 3'', 1'', 3''), темные (1—3, 1', 3', 1'', 3''); цвет растений: зеленый (1, 1', 1'', 1'', 1'', 4), зелено-желтый (2), желтый (3, 3', 3'', 3'', 3''); 4 — по данным [73].

Таблица 3.17

Группировка комплексных спектральных индексов, обладающих одинаковой чувствительностью (ΔP_i) к изменению L , ρ и θ_ϕ на темных и светлых почвах. Надир, $h_0 > 45^\circ$

L	P_i с близкими ΔP_i		Цвет	P_i с близкими ΔP_i
	при изменении цвета от зеленого до желтого	при изменении ориентации от горизонтальной до сферической		при изменении L от 0,5 до 5
1 зел. 1 жел.	6, 8, 10	3, 10 2	Зел. Желт.	1, 4, 10 6, 10

Примечание. Для фиксированных значений L перечислены P_i с одинаковой чувствительностью к изменению ρ и θ_ϕ , а для фиксированного цвета растительности — к изменению L .

вах P_1 обладает разной чувствительностью к изменению ориентации и оптических параметров растительности, что заведомо может ограничивать область его применения. В целом из рассмотренных

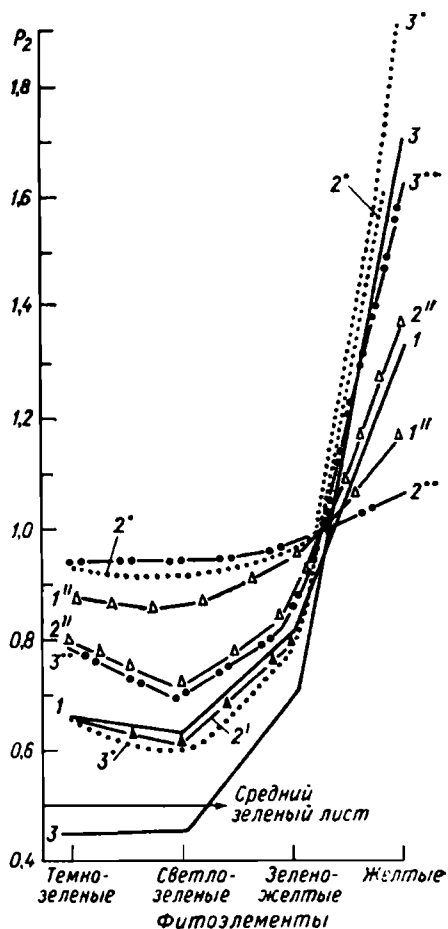


Рис. 3.22. Изменение P_2 в зависимости от цвета растительности при разной плотности полога РП. Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1, 3), сферическая (1'', 2'', 2'), вертикальная (2, 2'', 3, 3''); почвы: светлые (1'', 2'', 2', 3''), темные (1, 2', 2, 3, 3').

	3	1	2', 2''	3', 3''	1''	2, 2''
$B \%$	100		40—48		12—20	
L	5	0,5	1	4	0,5	1

P_i нет ни одной комбинации, полностью инвариантной к изменению отражения почвы при $B < 100 \%$.

Влияние структуры РП и оптических свойств отдельных фитоэлементов. Подробно результаты численного моделирования для 10 комплексных спектральных индексов изложены в [19, 59]. Здесь

приводим только серию графиков (рис. 3.20—3.30), которые иллюстрируют поведение P_i , наиболее часто используемых в экспериментальных исследованиях. Для всех индексов (за исключением P_9 , являющегося непринципиальной модификацией P_8) общие тенденции их изменения в зависимости от L , ρ и $\bar{\theta}_\phi$ систематизированы в табл. 3.18—3.20.

Таблица 3.18

Группировка комплексных спектральных индексов по тенденциям их изменения в зависимости от относительной поверхности фитоэлементов для интервала $L=0,5 \div 5,0$.

Надир, $h_\odot > 45^\circ$

Характер зависимости $P_i(L)$	Растительность					
	зеленая		зелено-желтая		желтая	
	Почва					
	темная	светлая	темная	светлая	темная	светлая
P_i убывает при увеличении L	2 4 (в)	2 3 (в) 4 (в, с)	2 4 (в)	2 3 (в) 4 (в, с)	5 7	3 (в) 5 7
P_i слабо зависит от L	4 (с)			4 (с) 10 (в)	3 (с) 1 3	3 (с) 1 3 10 (в)
P_i увеличивается при увеличении L	1 3 4 (г) 5 6 7 8 10	1 3 (г, с) 5 6 7 8 10	1 3 4 (г, с) 5 6 7 8 10	1 3 (г, с) 5 6 7 8 10 (г, с)	1 3 2 3 (в, г) 4 6 8 10	1 3 2 4 6 8 10 (г, с)

Примечание. Здесь и в табл. 3.19 в скобках дана ориентация: г — горизонтальная, в — вертикальная, с — сферическая; там, где ориентация не дается, тенденции возможны для всех основных типов ориентации фитоэлементов.

Из материалов этих таблиц и графиков следует, что характер зависимостей P_i от L и ρ может существенно варьировать под воздействием пространственной ориентации. Так, например, на начальных стадиях пожелтения (γ_3 не менее 50 %) для редких РП с доминированием вертикальной ориентации независимо от ρ , значения P_8 и P_{10} практически не реагируют на изменения цвета растительности. В то же время если преобладают горизонтально ориентированные фитоэлементы или сферическая ориентация, значения этих индексов уменьшаются при переходе цвета от зеленого

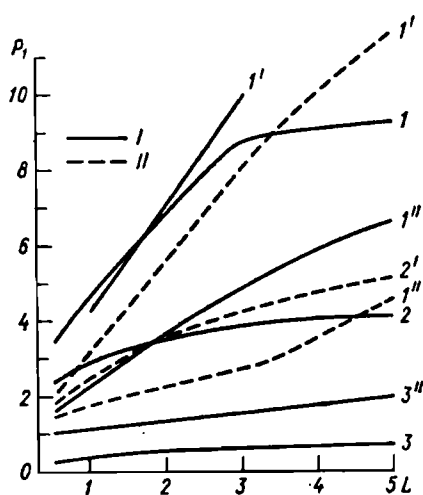


Рис. 3.23. Зависимость между P_1 и относительной поверхностью фитоэлементов L . Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

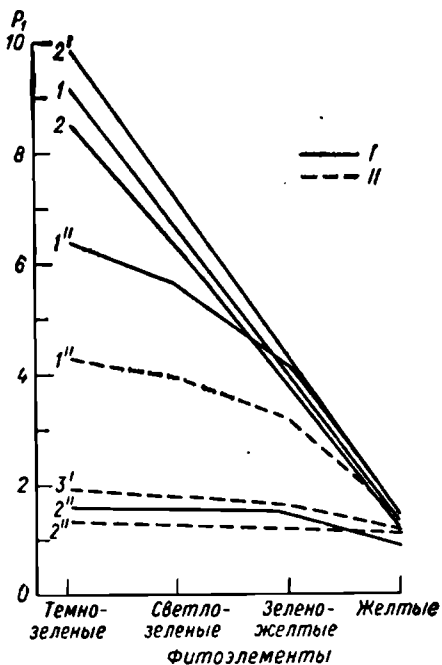
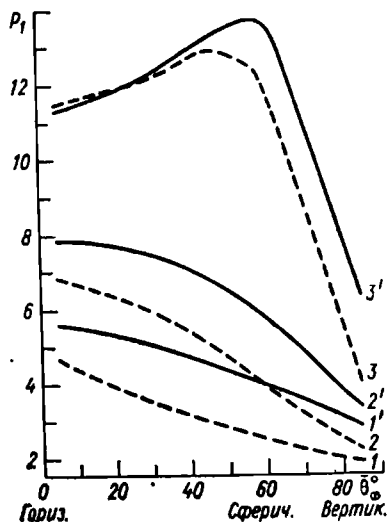
Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1—3), сферическая (1', 2'), вертикальная (1'', 2''); почвы: темные (I), светлые (II); цвет растений: зеленый (1, 1', 1''), зелено-желтый (2, 2'), желтый (3, 3'').

Рис. 3.24. Зависимость между P_1 и средним углом наклона фитоэлементов θ_0 для зеленой растительности. Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $\rho_k=0,075$, $\rho_{\text{БИК}}=0,45$.

L : 1, 1') 0,5, 2, 2') 1, 3, 3') 3; светлые почвы (1—3): $\rho_{sk}=0,15$, $\rho_{\text{БИК}}=0,45$; темные почвы (1'—3'): $\rho_{sk}=0,06$, $\rho_{\text{БИК}}=0,15$.

Рис. 3.25. Изменение P_1 в зависимости от цвета растительности при разной плотности полога. Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1—2), сферическая (2', 3'), вертикальная (1'', 2''); почвы: темные (I), светлые (II).



	1	2	2'	1''	2''	3'
$B \%$	>90		62	48	12—20	
L	5	3	3	5	1	0,5

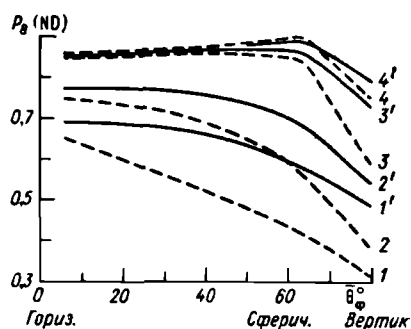
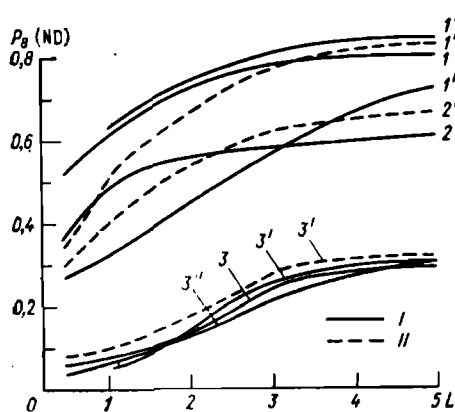


Рис. 3.26. Зависимость между P_θ и относительной поверхностью фитоэлементов L . Надир, $h_0 = 65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1—3), сферическая (1'—3'), вертикальная (1'', 3''); почвы: темные (I), светлые (II); цвет растений: зеленый (1, 1', 1''), зелено-желтый (2, 2'), желтый (3, 3', 3'').

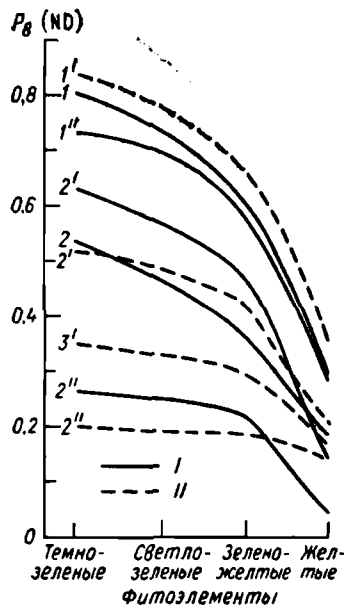


Рис. 3.27. Зависимость между P_θ и средним углом наклона фитоэлементов θ_ϕ для зеленой растительности Надир, $h_0 = 65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $\rho_k = 0,075$, $\rho_{\text{БИК}} = 0,45$; $\rho_{sk} = 0,15$, $\rho_{\text{БИК}} = 0,25$ (светлые почвы), $\rho_{sk} = 0,06$, $\rho_{\text{БИК}} = 0,15$ (темные почвы).

1, 1') $L = 0,5$, 2, 2') $L = 1$, 3, 3') $L = 3$, 4, 4') $L = 5$; почвы: светлые (1—4), темные (1'—4').

Рис. 3.28. Изменение P_θ в зависимости от цвета растительности при разной плотности полого РП. Надир, $h_0 = 65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1, 2), сферическая (1', 2', 3), вертикальная (1'', 2''); почвы: темные (I), светлые (II).

	1, 1'	1''	2'	2	2''	3'
$B \%$	>90		40—48		12—20	
L	5	5	1	0,5	1	0,5

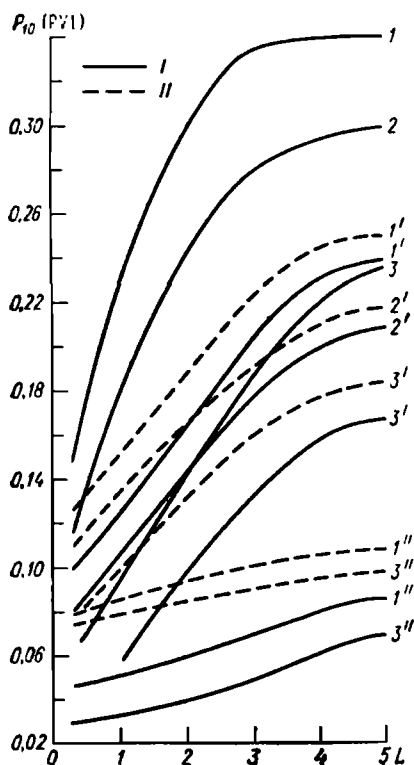
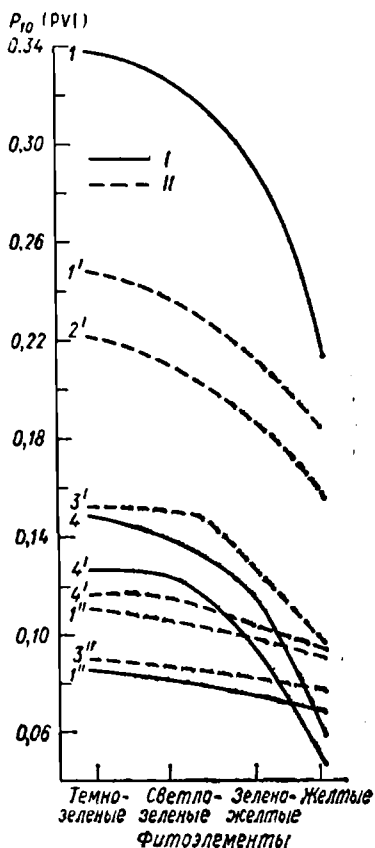


Рис. 3.30. Изменение P_{10} в зависимости от цвета растительности при разной плотности полога РП. Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1, 4), сферическая (1'—4'), вертикальная (1'', 3''); почвы: темные (I), светлые (II).

Рис. 3.29. Зависимость между P_{10} и относительной поверхностью фитоэлементов L . Надир, $h_0=65^\circ$, $S_\lambda \gg D_\lambda$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (1—3), сферическая (1'—3'), вертикальная (1'', 3''); почвы: темные (I), светлые (II); цвет растений: зеленый (1, 1', 1''), зелено-желтый (2, 2'), желтый (3, 3', 3'').



	1, 1'	2'	1''	3'	4	3''	4'
$B \%$	>90	62	40—48			12—20	
L	5	3	5	1	0,5	1	0,5

Группировка комплексных спектральных индексов по тенденциям их изменения в зависимости от цвета растительности.

Надир, $h_0 > 45^\circ$

Тенденция изменения P_i	$L=5$		$L=3$		$L=1$		$L=0,5$	
	a	б	a	б	a	б	a	б

Изменение цвета от темно-зеленого до светло-зеленого

Уменьшается	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2
Зависит слабо	6 (в, с)	6 (в, с)	6 (в, с)	6 (в, с)	6 (г, с)	6 (г, с)	6 (г, с)	6 (г, с)
	8	8	8	8	8	8	8	8
Увеличивается	10 (г)	10 (г)	10 (г)	10	10	10	10	10
	3 (г)	3 (г, с)	3 (г)	3 (г, с)	3 (в, с)	3 (в, с)	3	4
	4	4	4	4	4	4	4	5
	5 (г)	7 (г)	5 (в, г)	5 (в, г)	5 (в, с)	5 (в)	5	6 (в)
	6 (г)	10 (в, с)	6 (г)	6 (г)	6 (в)	6 (в)	6	7 (в)
	10 (в, с)	7	10 (в, с)	7	7	7	7	8 (в)
	3 (в, с)	3 (в)	3 (в, с)	3 (в)	3 (г, с)	3 (г, с)	3	4
	5 (в, с)	5	5 (с)	5	5 (г, с)	5 (г, с)	5	6 (в)

Изменение цвета от зеленого до зелено-желтого

Уменьшается	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	3	3	3	3	3	3	3
	5	5	5	5	5	5	5	5
	7	7	7	7	7	7	7	7
	8	8	8	8 (г, с)	8 (г, с)	8 (г, с)	8	8
	10	10	10	10 (в)	10 (г, с)	10 (г, с)	10	10
	3 (г, с)	3 (г, с)	3 (г, с)	3 (г, с)	3 (г, с)	3 (г, с)	3	4
	5 (г, с)	5 (г, с)	5 (г, с)	5 (г, с)	5 (г, с)	5 (г, с)	5	6 (в)
	7 (г, с)	7 (г, с)	7 (г, с)	7 (г, с)	7 (г, с)	7 (г, с)	7	8
	8 (г, с)	8 (г, с)	8 (г, с)	8 (г, с)	8 (г, с)	8 (г, с)	8	9
	10 (г, с)	10 (г, с)	10 (г, с)	10 (г, с)	10 (г, с)	10 (г, с)	10	11

Тенденция изменения P_t	$L=5$		$L=3$		$L=1$		$L=0,5$	
	а	б	а	б	а	б	а	б
Зависит слабо	4 (в) 6	4 (в) 6	4 (в) 6	4 (в) 6 10 (г, с)	2 (в) 3 (в) 4 (в, с) 5 (в) 6 7 (в) 8 (в) 10 (в)	2 (в) 3 (в) 4 (в, с) 5 (в) 6 7 (в) 8 (в) 10 (в)	2 (в) 3 (в) 4 (г, с) 5 (в) 6 7 (в) 8 (в) 10 (в)	3 (в) 4 (г, с) 5 (в) 6 7 (в) 8 (в) 10 (в)
Увеличивается	2 4 (г, с)	2 4 (г, с)	2 4 (г, с)	2 4 (г, с)	2 (г, с) 4 (г)	2 (г, с) 4 (г)	2 (г, с) 4 (г)	2 4 (г)

Изменение цвета от зелено-желтого до желтого

Уменьшается	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10 (г, с)	1 3 5 7 8 10	1 3 5 7 8 10
Зависит слабо	6	6 (с)	6	4 (в) 6 (с)	4 (в) 6	6 10 (в)	6 10 (в)	2 (в) 4 (в) 6
Увеличивается	2 4	2 4 6 (в)	2 4	2 4 (г, с) 6 (в)	2 4	2 4 (г, с) 6 (с)	2 4	2 (г, с) 4 (г, с)

Примечание. Здесь и в табл. 3.20 в головке: а — темные почвы, б — светлые почвы; остальные обозначения см. табл. 3.18.

Таблица 3.20

Группировка комплексных спектральных индексов по тенденциям их изменения при увеличении среднего угла наклона фитоэлементов

Надир, $h_0 > 45^\circ$

Тенденция изменения P_i	$L=5$		$L=3$		$L=1$		$L=0,5$	
	а	б	а	б	а	б	а	б
Уменьшается	1 (<63)	3	1 (<63)	1 (<63)	1	1	1	1
	3	4	3	3	3	3	3	3
	4	5 (>63)	4	4	4	5	4	4 (<27)
	5 (>63)	6 (>63)	5 (>45)	5 (>57)	5	6	5	5
	6 (>63)	7 (>63)	6 (>63)	6 (>63)	6	7	6	6
	7 (>63)	8 (>63)	7 (>45)	7 (>57)	7	8	7	7
	8 (>63)	10	8 (>63)	8 (>63)	8	10	8	8
Зависит слабо	10		10	10	10		10	10
	2 (<63)	2 (<63)	2 (<57)	2 (<45)		4		4 (>27)
	5 (<63)	5 (<63)	5 (<45)	5 (<57)				
	6 (<63)	6 (<63)	6 (<63)	6 (<63)				
	7 (<63)	7 (<63)	7 (<45)	7 (<57)				
Увеличивается	8 (<63)	8 (<63)	8 (<63)	8 (<63)	2	2	2	2
	2 (>63)	2 (>63)	2 (>57)	2 (>45)				

Примечание. В скобках дан средний угол наклона фитоэлементов $\bar{\theta}_\Phi$; там, где $\bar{\theta}_\Phi$ не указан, тенденция сохраняется при изменении $\bar{\theta}_\Phi$ от 0 до 90° .

к зелено-желтому. Так же как и для ρ_s , нет P_i , полностью инвариантных к ориентации при ее изменении от горизонтальной до вертикальной. При этом сами значения $\Delta P_i(\theta_\Phi)$ существенно зависят от комбинаций ρ , ρ_s и L . Из табл. 3.20 и 3.21 видно, что только P_3 , P_4 и P_{10} характеризуются преимущественно стабильной тенден-

цией изменения их значений при увеличении $\bar{\theta}_\Phi$ от 5 до 85° , независимо от плотности полога, яркости фитоэлементов и почвы. Общей чертой для всех P_i (так же как и для b_λ) является более высокая их чувствительность к отклонениям ориентации от сферической к вертикальной, чем к отклонениям ориентации от сфери-

ческой к горизонтальной. В интервале $\bar{\theta}_\Phi = 5 \div 57,5^\circ$ максимальные $\Delta P_i(\theta_\Phi)$ в целом отмечаются при сочетании редких РП, сформированных зеленой растительностью, и светлых почв. В этом же интервале θ_Φ минимальной чувствительностью к ориентации обладают P_2 , P_6 и P_8 . Индексы, для которых выявлена устойчивая тенденция (табл. 3.20), характеризуются в большинстве случаев и наибольшей чувствительностью к θ_Φ . Так, в случае плотных РП, сформированных зеленой растительностью на темных почвах,

$\Delta P_4(\bar{\theta}_\Phi)$ в 9 раз выше $\Delta P_8(\bar{\theta}_\Phi)$ и примерно в 1,5 раза выше $\Delta P_1(\theta_\Phi)$.

Таблица 3.21

Относительные изменения комплексных спектральных индексов $|\Delta P_i|$ (%) в интервале $\theta_\phi = 5 \div 85^\circ$

Надир, $h_\odot > 55^\circ$, зеленая растительность

P_i	Темные почвы			Светлые почвы		
	L					
	5	3	1	5	3	1
P_1	44	53	64	58	70	68
P_2	67	57	45	41	48	41
P_3	83	83	78	79	79	66
P_4	69	50	27	40	24	22
P_5	47	70	88	66	83	92
P_6	10	10	16	11	25	40
P_7	84	91	96	84	93	96
P_8	7	28	31	16	32	50
P_{10}	66	67	58	62	63	55

Примечание. $|\Delta P_i|$ даны для теоретических типов ориентации фитоэлементов, по де Виту [148].

Сравнение ΔP_i с Δb_λ показало, что традиционные индексы (P_1 , P_2 и P_3) позволяют существенно минимизировать (до 10 раз) «шумовой» эффект ориентации при восстановлении L .

*
* *

В целом численные эксперименты показали, что b_λ РП высокочувствительны ко всем параметрам, характеризующим его оптико-биологическое состояние, и менее чувствительны к условиям освещения (в частности, к отношению D_λ/Q_λ и изменению $h_\odot$ в пределах $45\text{--}65^\circ$ для наиболее распространенных в природе типов пространственной ориентации фитоэлементов). Снижение влияния ориентации и отражения почвы при восстановлении плотности полога и цвета растительности можно достигнуть, используя рассмотренные в этой главе отдельные комбинации b_λ в зеленой, красной областях видимого и в БИК-диапазонах. Сравнение с результатами теоретических оценок b_λ и P_i по другим ММРР (для P_i по модели Сунтса [73]) показало, что модель Гоудриана дает сопоставимые зависимости для условий визирования в надир и больших высот Солнца.

4.1. Общие замечания

Адекватность теоретической модели можно рассматривать как на качественном, так и количественном уровне соответствия расчетных и полученных в ходе измерений закономерностей изменения b_λ РП. Первый из этих уровней предусматривает проверку общих тенденций изменения b_λ в зависимости от параметров, учитываемых моделью. При таком подходе возможно использование как обширного литературного материала, так и результатов собственных измерений. Верификация модели на количественном уровне должна проводиться более корректно по материалам строго поставленных специальных экспериментов, обеспечивающих детальную информацию о всех входных параметрах модели. В этом случае цель состоит в выявлении расхождений между численными значениями расчетных и измеренных b_λ одного и того же объекта.

Непосредственно для модели Гоудриана проверка ее адекватности проводилась только для интегрального альбеда A через сравнение A посевов кукурузы с экспериментальными данными других авторов. Было выявлено полное соответствие тенденций расчетного и измеренного дневного хода A при некоторых различиях в численных значениях [99]. По предположению Гоудриана, эти различия вызваны расхождением между фактическими и заданными значениями ρ . В то же время на основе специально поставленных экспериментов для посевов пшеницы в течение трех фаз автором модели было установлено хорошее качественное и количественное согласование между теоретическими и экспериментальными кривыми дневного хода A .

В настоящей главе проводится верификация модели Гоудриана применительно к b_λ и их комбинациям в различных спектральных диапазонах на основе литературных данных и результатов специально поставленных натурных экспериментов для $h_\odot > 45^\circ$ и $\theta_0 = 0^\circ$ [18].

Натурные эксперименты проводились в течение 1981—1985 гг. на территории Херсонской области и в Молдавии. Измерения b_λ сельскохозяйственных посевов выполнялись преимущественно с помощью наземных приборов, любезно предоставленных в наше распоряжение В. А. Коваленко, П. П. Федченко, М. Сулевым. Эти приборы сходны по своей конструкции, просты в эксплуатации, имеют близкие углы зрения (10 — 20°) и точность измерения b_λ (3 — 8%). Проведенное сравнение b_λ однородных поверхностей (ракушеч-

ника, пластин с напыленным песком, выровненных площадок чернозема) показало расхождение менее 7 % между оценками, полученными при измерениях разными приборами. В зависимости от цели эксперимента, характера объекта и конструкции прибора¹ закладывались площадки размерами от 25×25 см и до 1×3 м. Измерения наземными приборами проводились с высоты 0,5 ÷ 1 м над объектом (в случае растительности — над верхней границей РП) при ясной малооблачной погоде. Наблюдения сопровождались определением D_λ/S_λ в падающем потоке для каждой из рабочих зон спектра по яркости полностью освещенной и затененной эталонной поверхности. Затенение эталона осуществлялось с помощью круглого зачерненного непрозрачного экрана, имеющего угловые размеры солнечного диска. Параллельно выполнялись измерения суммарной и рассеянной радиации цветными пиранометрами Махоткиной и стандартными черно-белыми пиранометрами Янишевского. Результаты этих измерений использовались для коррекции D_λ/S_λ в видимом и в БИК-диапазонах. Для характеристики условий проведения эксперимента фиксировались скорость и направление ветра, влажность и шероховатость поверхностного слоя почвы.

Фитометрические наблюдения определялись конкретной задачей эксперимента, но во всех вариантах опытов обязательно находились следующие параметры: 1) густота посева и высота растений; 2) в случае рядковых посевов — ширина междурядий и рядков, ориентация рядков по сторонам горизонта; 3) относительная поверхность и фитомасса фракций растений с разделением каждой фракции по цвету; 4) суммарные характеристики относительной поверхности фитоэлементов и надземной фитомассы; 5) дифференциальная функция распределения углов наклона фитоэлементов. Для растительных объектов находились значения ρ и τ с помощью лабораторных спектрофотометров или в полевых условиях по измерениям b_λ слоя фитоэлементов, плотно выложенных на черной подложке [44]. В отдельных случаях привлекались литературные данные по ρ и τ . Средневзвешенные значения ρ и τ для РП рассчитывались с учетом γ_z . Значения ρ_s (в предположении матовости поверхности почвы) определялись по измерениям b_s в надир для участков почвы в пределах исследуемых РП, свободных от растительности и теней. При выборе участка почвы, репрезентативного для посева, обращалось внимание на особенности покрытия почвы ветошью, опадом и т. п. с целью коррекции значений $b_s \approx \rho_s$, вводимых далее в расчетную схему.

Отмеченные выше различия в размерах пробных площадок, на которых измерялись b_λ , были связаны прежде всего с особенностями структуры РП. Чем больше была выражена неоднородность РП, тем больше был размер площадок, их количество и повторность измерений на каждой площадке. В частности, для

¹ Например, использованный нами прибор конструкции В. А. Коваленко позволяет проводить измерения в стационарном режиме над одной точкой.

растительности с крупными листьями и выраженной рядковостью посева (соя, кукуруза) средние значения b_λ при фиксированном L определялись по 25—100 измерениям b_λ для одной рабочей зоны спектра. В посевах узколистных злаков (пшеница, райграс) размеры отдельных фитоэлементов существенно меньше мгновенного поля зрения прибора, поэтому они практически не влияют на изменчивость измеренных значений b_λ . Ниже при описании каждого эксперимента указываются объемы выборок измерений b_λ , а также особенности проведения самого эксперимента.

4.2. Сравнение теоретических и экспериментальных тенденций изменения СКЯ сельскохозяйственных посевов

В этом разделе сравниваются закономерности изменения b_λ по результатам численных и натурных экспериментов в зависимости от трех входных параметров модели Гоудриана, характеризующих

состояние растительности ρ , L и $\bar{\theta}_\Phi$, при различных ρ_λ .

Зависимость b_λ от ρ . Согласно результатам моделирования (разд. 3.2), функция $b_\lambda(\rho)$ является монотонно возрастающей и максимальная чувствительность b_λ к изменению ρ отмечается для плотных РП. Первое положение подтверждается многочисленными экспериментальными данными, свидетельствующими о совпадении формы спектральных кривых РП и отдельных фитоэлементов. Кроме того, результаты исследования вегетационного хода b_λ растительных объектов показали закономерное увеличение b_λ в видимом диапазоне на заключительных этапах вегетации при пожелтении растений. Однако вопрос о дифференциации сезонных изменений b_λ в зависимости от L недостаточно освещен в литературе.

Для проверки вывода об увеличении сезонной динамики b_λ по мере смыкания полога, следующего из результатов численных экспериментов, была проведена серия измерений на посевах озимой пшеницы в период фенофаз от колошения до полной спелости. Площадки, на которых измерялись b_λ и проводился полный комплекс описанных в разд. 4.1 наблюдений, закладывались в посевах с L от 1,4 до 5 и более. Полученные данные, сгруппированные для посевов различной плотности, представлены в табл. 4.1. Внутри каждой градации результаты для разных фенофаз отражают относительные изменения b_λ , обусловленные доминирующим воздействием изменения цвета растительности от зеленого до желтого — $\Delta b_\lambda(\rho)$.

Из приведенных оценок следует, что чем выше плотность полога, тем больше выражены сезонные изменения b_λ . Так, в видимом диапазоне $\Delta b_\lambda(\rho)$ при $L \geq 5$ в 2—2,7 раза превышают $\Delta b_\lambda(\rho)$ при $L < 2$. Однако сами значения $\Delta b_\lambda(\rho)$ могут варьировать при любой плотности полога в зависимости от оттенков желтого цвета на заключительных фенофазах. В БИК-диапазоне (см.

Таблица 4.1

Относительные изменения СКЯ $\Delta b_{\lambda}(\rho)$ (%) посевов озимой пшеницы
Безостая 1 в период колошение—полная спелость. Херсонская область
Надир, ясная малооблачная погода, полуденные часы

Фенофаза	Характеристика	550 нм	670 нм	80 нм
$L \geq 5$				
Колошение, $\gamma_a = 83\%$	1	0,05	0,03	0,37
Колошение, $\gamma_a = 75\%$	2	17	40	—13
Начало молочной спелости	2	17	57	—27
Конец молочной спелости	2	23	57	—22
Молочно-восковая спелость	2	41	75	—11
Полная спелость (желтый цвет растений)	2	55	81	—16
$L = 2+3$				
Колошение, $\gamma_a = 76\%$	1	0,06	0,07	0,24
Колошение, $\gamma_a = 60\%$	2	17	13	—13
Начало молочной спелости	2	17	13	—4
Конец молочной спелости	2	17	23	11
Восковая спелость	2	38	57	8
Полная спелость (желтый цвет растений)	2	40	61	4
Полная спелость (желто-бурый цвет растений)	2	17	30	—67
$L = 1,4+1,7$				
Колошение, $\gamma_a = 75\%$	1	0,08	0,09	0,22
Колошение, $\gamma_a = 63\%$	2	16	22	8
Восковая спелость	2	27	47	17
Полная спелость (желто-бурый цвет растений)	2	20	30	—23

Примечание. 1 — b_{λ} в фазе колошения; 2 — Δb_{λ} рассчитано как разность между b_{λ} на фенофазе колошения (для 1) и b_{λ} на последующих фенофазах, нормированная к максимальному из двух сравниваемых значений b_{λ} ; γ_a — доля поверхности фитоэлементов зеленого цвета.

разд. 2.1) сезонная динамика b_{λ} выражена слабо и определяется преимущественно морфоанатомическими особенностями фитоэлементов. Поэтому выявленная тенденция к понижению b_{λ} в БИК-диапазоне скорее всего есть следствие увеличения вертикальности в ориентации фитоэлементов, происходящего на поздних фенофазах в посевах пшеницы (см. разд. 2.4 и 3.5). В целом данные табл. 4.1 хорошо согласуются с расчетными закономерностями изменения $b_{\lambda}(\rho)$.

Зависимость b_λ от L . В разд. 3.4 были сформулированы теоретические закономерности изменения b_λ в зависимости от плотности полога РП. Их сравнение с результатами измерений, обобщенными в разд. 3.4.1, свидетельствует о хорошем соответствии теоретических тенденций реально наблюдаемым в природе.

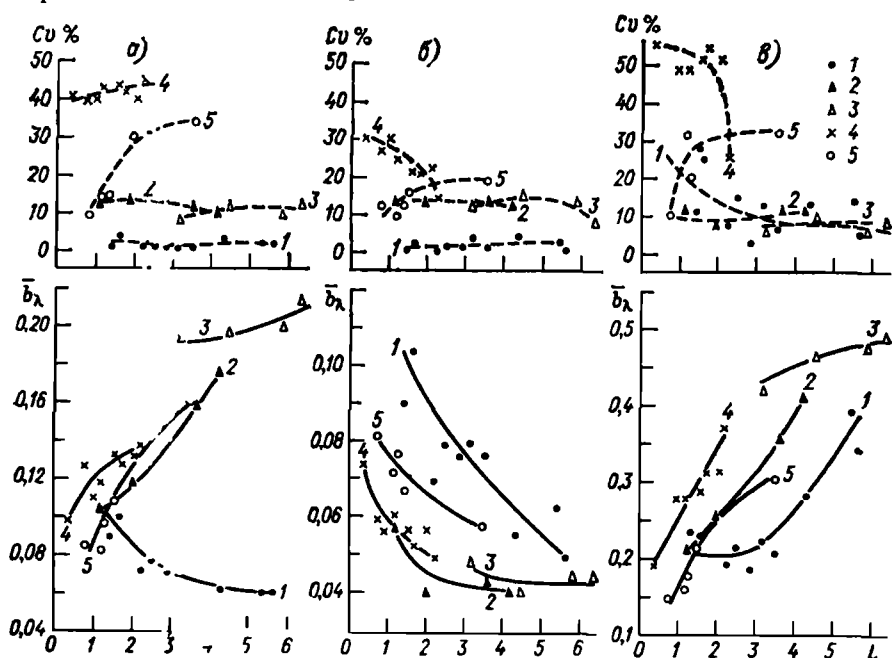


Рис. 4.1. Зависимость средних значений b_λ и их коэффициентов вариации Cv от L для посевов различных сельскохозяйственных культур. Наدير, $h_\odot > 45^\circ$, наземные измерения.

Данные воли: а — 550 и 558 нм, б — 670 нм, в — 800 нм; 1 — озимая пшеница, для каждой точки $n=5 \pm 15$; 2 — райграс, фенофаза цветение, $n=25 \pm 30$; 3 — райграс, фенофаза 4–5-й лист, $n=40$; 4 — соя, $n=6 \pm 48$; 5 — кукуруза, $n=15 \pm 32$.

Некоторые материалы выполненных нами натурных измерений приведены в табл. 4.2. В этой же таблице указаны типы связи между b_λ и L (см. рис. 3.8), которые теоретически возможны при комбинациях ρ и ρ_s , зафиксированных в ходе экспериментов. Соответствующие графики, полученные по результатам наземных измерений, представлены на рис. 4.1. Сравнение экспериментальных (рис. 4.1) и теоретических (табл. 4.2) тенденций показывает их хорошее согласование для всех изученных объектов.

В разд. 3.4 было показано, что в случае РП, сформированного непрозрачными вертикальными фитоэлементами, теоретическая функция $b_\lambda(L)$ является преимущественно убывающей, независимо от комбинации ρ и ρ_s . Последнее означает сохранение указанного вида функции для любого спектрального диапазона и в то же время для одного диапазона, но при изменении окраски раститель-

Таблица 4.2

Теоретический тип зависимости $b_\lambda(L)$ для исследованных объектов

Объект, фенофаза	Ориентация фитозлементов $\bar{\theta}_\phi^\circ$	λ нм	ρ	ρ_s	Теоретический тип связи между b_λ и L
Озимая пшеница, цветение	Близкая к сферической с отклонением в сторону вертикальности	558	0,20	0,08	Близка к нейтральной
		670	0,15	0,13	—
		800	0,50	0,20	+
Соя, конец листообразования	48,7	558	0,23	0,06	Близка к нейтральной
		670	0,10	0,075	—
		800	0,47	0,10	+
Райграс, цветение	60—67	558	0,18—0,29	0,08	+
		670	0,05—0,10	0,10	—
		800	0,45—0,55	0,15	+
Райграс, 4—5-й лист	27—47	558	0,17—0,23	0,08	+
		670	0,05—0,09	0,10	—
		800	0,44—0,50	0,15	+

Примечание. Плюс (+) означает, что функция возрастающая, минус (—) — убывающая.

ности и/или цвета почвы. При доминировании зеленого цвета растений зависимость между b_λ и L наиболее выражена в красной области видимого диапазона (см. рис. 3.8). Проверка этой теоретической закономерности представляет интерес в связи с особенностями фракционного состава посевов злаковых культур (см. разд. 2.3). Поскольку в природе чисто вертикальная ориентация фитозлементов не встречается, то такой тип ориентации в наших опытах на посевах пшеницы имитировался путем полного удаления листьев с растений. Таким образом было подготовлено пять площадок размером 50×50 см с густотой стеблестоя от 144 до 520 ст/м^2 . На этих площадках в период фенофазы цветения проводились измерения b_λ при $h_\odot = 53 \div 65^\circ$.

Для сравнения теоретических и экспериментальных тенденций изменения $b_\lambda(L)$ при вертикальной ориентации ниже приводятся относительные характеристики b_λ , полученные как отношение b_λ , измеренного или рассчитанного при некотором значении $L_{\text{ст+к}}$, к b_λ при максимальном значении $L_{\text{ст+к}} = 0,76$:

λ нм	$L_{\text{ст+к}} = 0,52$		$L_{\text{ст+к}} = 0,45$		$L_{\text{ст+к}} = 0,31$		$L_{\text{ст+к}} = 0,13$	
	расч.	изм.	расч.	изм.	расч.	изм.	расч.	изм.
575	1,07	1,08	1,10	1,09	1,14	1,14	1,21	1,16
675	1,11	1,18	1,15	1,21	1,23	1,30	1,33	1,31
805	1,04	1,01	1,06	1,02	1,09	1,07	1,12	1,13

Из этих данных видно, что в случае вертикальной ориентации увеличение L сопровождается снижением b_λ РП во всех рабочих зонах спектра. Этот результат полностью подтверждает теоретические выводы, что указывает на принципиально верное описание моделью Гоудриана отражения радиации пологом с вертикальными фитоэлементами.

Влияние ориентации фитоэлементов на вид функции $b_\lambda(L)$ позволяет также проследить рис. 4.1, из которого следует, что при равных значениях L отклонения ориентации в сторону вертикальности на более поздней фазе в посевах райграса сопровождается повышением чувствительности b_λ к вариациям L . Тем самым экспериментально проверена тенденция, установленная в разд. 3.4 (см. табл. 3.9).

Зависимость b_λ от $\bar{\theta}_\phi$. Исследование зависимости b_λ РП от $\bar{\theta}_\phi$ проводилось в имитационных опытах на примере посевов озимой и яровой пшеницы, различающихся по L , ρ , τ , ρ_s , $\bar{\theta}_\phi$ и азимуту полегших растений (табл. 4.3). В пределах каждого из посевов выбирались однородные участки, которые разбивались на 5—6 площадок. Одна площадка с ненарушенной структурой являлась контрольной, на второй все растения удалялись с целью получения значений $b_s \approx \rho_s$, соответствующих конкретным условиям измерений. На остальных площадках имитировалось полегание растений. В первом опыте (вариант А) растения имели различный угол наклона стеблей при одинаковом азимуте; во втором опыте (вариант Б) при фиксированном среднем угле наклона стеблей $\bar{\theta}_{ст}$ создавалась различная азимутальная ориентация растений.

Как следует из сравнения материалов разд. 3.5, табл. 4.3 и [18, 29], теоретические закономерности изменения b_λ , вызванные отклонением ориентации в сторону горизонтальности, подтверждаются натурным экспериментом. Во-первых, при заданных комбинациях L , ρ и ρ_s уменьшение $\bar{\theta}_\phi$ сопровождается увеличением b_λ во всех рабочих зонах спектра. Во-вторых, минимальные изменения b_λ , обусловленные полеганием, отмечаются в красной области видимого диапазона при сочетании темных почв и зеленого цвета растений, т. е. низких значений ρ и ρ_s . В-третьих, чувствительность

b_λ к изменению $\bar{\theta}_\phi$ возрастает по мере увеличения плотности РП. Однако, как следует из табл. 4.3, b_λ при полегании варьируют в зависимости от азимутальной ориентации полегших растений, что, вероятнее всего, связано с наличием зеркальной составляющей в угловом распределении радиации, отраженной стеблями.

Таким образом, модель Гоудриана качественно правильно описывает изменения b_λ , вызванные полеганием растений. При этом неучет в модели индикатрисы отражения отдельных фитоэлементов не позволяет оценить изменчивость b_λ , обусловленную особенностями азимутальной ориентации растений.

Таблица 4.3

Относительные значения измеренных b_{λ} полегших посевов пшеницы¹

Фенофаза	L	Объем выборки	λ мм	ρ	ρ_s	$b_{\lambda_{п}}/b_{\lambda_{н}}$			
						$\bar{\theta}_{ст}^{\circ}$			
						85—90	30—35	20—25	10—15

А. Ориентация растений на восток при переменном угле наклона стеблей

Молочно-восковая спелость	0,9—1,3	35	575	0,23	0,05	1,0	1,5	1,7	1,8
			670	0,24	0,06	1,0	1,2	1,4	1,3
			805	0,55	0,08	1,0	1,5	1,7	1,7

Фенофаза	L	Объем выборки	λ мм	ρ	ρ_s	$b_{\lambda_{п}}/b_{\lambda_{н}}$			
						азимут, °			
						0	180	90	270

Б. Угол наклона стеблей 15—20° при переменном азимуте полегших растений

Конец цветения	1,3	144	558	0,29	0,09	1,4	1,4	1,6	1,5
			670	0,25	0,11	1,2	1,2	1,3	1,3
			800	0,54	0,13	1,4	1,5	1,5	1,6
Восковая спелость	3—4	60	550	0,34	0,18	2,1	1,7	2,1	2,0
			650	0,45	0,20	2,3	2,0	2,5	2,2
			840	0,57	0,25	2,1	1,8	2,1	1,9

¹ Значения b_{λ} полегших посевов нормированы к b_{λ} контрольного участка пшеницы нормального состояния.

Зависимость b_{λ} от L и $\bar{\theta}_{ф}$. В другой серии имитационных опытов, поставленных на посевах пшеницы желтого цвета, одновременно изменялись L и $\bar{\theta}_{ф}$. Для этого на подготовленных площадках, вокруг которых были убраны соседние растения, чтобы исключить возможное влияние теней от них, последовательно изымались листья и колосья.

В первой серии опытов вначале удалялись листья, тем самым искусственно уменьшалось L в сочетании с увеличением $\bar{\theta}_{ф}$. Как показано в разд. 3.4 и 3.5, следствием подобных изменений является убывание b_{λ} . Аналогичный результат установлен и экспериментально (табл. 4.4А, вариант «а»). Далее за счет удаления колосьев достигалось уменьшение L при сохранении вертикальной ориентации. Как видно из табл. 4.4А (вариант «б»), указанное

Таблица 4.4

Относительные изменения СКА (%) в имитационных опытах на посевах пшеницы (площадка 25×25 см, фенофаза восковая — полная спелость).

Надир, $\rho_s = 0,10 \div 0,25$, $h_0 > 56^\circ$

Тип структуры	Вариант	L	b_{λ_i}/b_λ	
			Область спектра	
			зеленая	красная

А

1. Ненарушенный		1,83	100	100
Убраны листья	а	0,73	71	58
Убраны колосья	б	0,53	87	68
2. Ненарушенный		1,10	100	100
Убраны листья	а	0,62	44	68
Убраны колосья	б	0,51	97	81
3. Ненарушенный		4,82	100	100
Убраны листья	а	1,91	75	71
Убраны колосья	б	1,50	87	80

Б

1. Ненарушенный		6,49	100	100
Убраны колосья	а	5,90	100	100
Убраны листья	б	2,40	81	90

Примечание. b_{λ_i}/b_λ — отношение b_{λ_i} к b_λ посевов с ненарушенной структурой.

изменение структуры РП привело к возрастанию b_λ по сравнению с b_λ в варианте «а». Эта тенденция вполне соответствует расчетным зависимостям между b_λ и L в случае вертикальной ориентации.

Во втором опыте вначале удалялись колосья, а затем листья. Тем самым первоначально достигалось уменьшение L в сочетании с отклонением ориентации в сторону горизонтальности. Из данных табл. 4.4Б видно, что изъятие колосьев не повлекло за собой изменений в b_λ . Это вполне логично укладывается в представления, следующие из анализа модели Гоудриана, согласно которым при таком изменении структуры РП происходит взаимная компенсация двух разнонаправленных тенденций изменения b_λ за счет L и $\bar{\theta}_\phi$ (см. разд. 3.4 и 3.5). Дальнейшее удаление листьев с растений приводит как к уменьшению L , так и к увеличению $\bar{\theta}_\phi$.

т. е. создается ситуация, аналогичная варианту «а» в табл. 4.4А, при которой теоретически должно происходить снижение b_λ .

*
* *
*

Таким образом, серии проведенных экспериментов подтвердили соответствие модели Гоудриана реальным природным ситуациям. Модель качественно правильно описывает тенденции изменения b_λ для надира в зависимости от ρ , L и $\bar{\theta}_\phi$. Кроме того, имитационные опыты доказали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей при одновременном изменении двух параметров структуры РП (L и $\bar{\theta}_\phi$). Очевидно, что последний вариант является наиболее сложным при проверке адекватности модели и в то же время наиболее вероятным в природных условиях.

4.3. Сравнение расчетных и измеренных значений СКЯ

Адекватность модели Гоудриана на количественном уровне оценивалась на основе сравнения измеренных и расчетных значений b_λ для одного и того же растительного объекта. Расчет выполнялся на ЭВМ при задании значений входных параметров модели, полученных в ходе конкретного эксперимента, для $h_\odot$ и D_λ/Q_λ , соответствующих условиям измерений.

В качестве характеристики согласования расчетных и измеренных b_λ использовались оценки отклонений Δ :

$$\Delta = (b_{\lambda_p} - b_{\lambda_n}) / b_{\lambda_n}. \quad (4.1)$$

Проверка теоретической модели в пространстве ее параметров была выполнена на примере посевов пшеницы, райграса, сои и кукурузы. Основной объем экспериментов был проведен на посевах пшеницы, как ведущей зерновой культуры степных районов Украины. Райграс был включен в программу исследований как еще один вариант узколистных злаков в дополнение к пшенице и как один из видов перспективных кормовых культур. В отличие от пшеницы и райграса, соя и кукуруза имеют крупные листья. Кроме того, посевы этих культур до смыкания полога характеризуются выраженной рядковой структурой. Включение в программу исследований сои и кукурузы позволило оценить применимость модели Гоудриана для описания процесса отражения растительных объектов с заведомо крупными размерами фитоэлементов и упорядоченной пространственной структурой.

Из всего экспериментального материала, полученного в течение четырех лет на территории Херсонской области и Молдавии, при проверке адекватности теоретической модели использовалось следующее число измерений: для озимой и яровой пшеницы — 2410,

райграса — 1350, кукурузы — 360 и сои — 563. В указанные объемы выборки были включены результаты измерений b_λ , проведенных только при $h_\odot > 45^\circ$ и ясной малооблачной погоде. Отбраковка материалов проводилась в основном исходя из стабильности значений D_λ/Q_λ , скорости и направления ветра в течение одной серии наблюдений.

Посевы пшеницы. Для проверки адекватности модели привлекались данные измерений, проведенных в период колошение — полная спелость на сельскохозяйственных полях с посевами озимой пшеницы (сорт Безостая 1) и на опытных делянках с яровой пшеницей (сорт Саратовская 42). Во всех случаях почвы были представлены южными черноземами. Несмотря на то что для пшеницы нами были получены обобщенные систематизированные оценки фитометрических параметров и оптических свойств отдельных фитоэлементов, для каждого варианта площадок находились конкретные значения входных параметров. Это позволило минимизировать возможные ошибки расчета b_λ . Но так как не всегда по техническим причинам удавалось одновременно с полевыми измерениями b_λ провести лабораторные измерения ρ и τ , то заведомо сохранялся источник ошибок расчета b_λ за счет распространения для отдельных вариантов опытов средних по фазе значений ρ и τ .

Сравнение измеренных и расчетных b_λ проводилось с использованием результатов, осредненных за одну серию измерений для конкретной площадки. Число измерений в серии для каждой из рабочих зон спектра колебалось от 1 до 6, что определялось не только однородностью объекта, но и конструктивными особенностями наземных приборов. Серии для площадок повторялись через 10—30 мин в зависимости от условий облачности, скорости и направления ветра, количества одновременно обследуемых площадок и их удаленности друг от друга. Например, если одновременно было подготовлено к измерениям пять площадок размером 1 м², то при благоприятных погодных условиях для $h_\odot > 60^\circ$ по каждой рабочей зоне спектра реальная выборка состояла из 60—90 измерений или из 10—15 осредненных по сериям значений b_λ . Эти данные дополнялись результатами измерений b_λ на расположенной рядом площадке с оголенной почвой. Далее оценка Δ проводилась на основе сравнения расчетного для площадки b_λ и осредненного за серию значения измеренного b_λ .

Данные табл. 4.5 характеризуют выявленные отклонения между расчетными и измеренными значениями b_λ по всей выборке

Таблица 4.5

Вероятность p абсолютных значений отклонений $|\Delta|$ расчетных b_λ от измеренных b_λ для посевов пшеницы.

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $n = 2356$

$ \Delta $ % . . .	≤ 5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	36—45	> 46
p	0,25	0,19	0,15	0,15	0,12	0,05	0,03	0,02	0,04

для посевов пшеницы. Среднее отклонение расчетных b_λ за период колошение — полная спелость составляет 15 %, причем в 86 % случаев расхождения в оценках b_λ не превышают 25 %.

При проверке адекватности модели не было получено каких-либо принципиальных расхождений в оценках b_λ для разных фаз фаз (табл. 4.6), хотя следует подчеркнуть, что значения вход-

Таблица 4.6

Характеристики абсолютных значений отклонений $|\Delta|$ (%) расчетных b_λ от измеренных b_λ для посевов яровой пшеницы на разных фаз фаз.

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $L = 0,5 \div 2,5$

Δ	Накопленные частоты, %	
	Колошение	Восковая спелость
<5	26,3	20,8
<10	46,1	41,7
<15	60,9	54,1
<20	77,9	83,3
<25	86,7	91,6
$\bar{\Delta}$	15,4	13,3

Примечание. Для фаз фаз колошение $n=182$, для восковой спелости $n=84$.

ных параметров модели, определенные на поздних фаз фаз, имеют большие погрешности из-за сложной конфигурации усыхающих листьев. Из табл. 4.7 также очевидно, что модель Гоудриана позволяет рассчитывать b_λ практически с одинаковым отклонением от измеренных b_λ в видимом и в БИК-диапазоне. Отсутствие систематических отклонений какого-либо знака свидетельствует о том, что модель достаточно адекватно описывает процесс отражения радиации посевами пшеницы для условий визирования в надир и $h_\odot > 45^\circ$.

Таблица 4.7

Средние отклонения $\bar{\Delta}$ расчетных b_λ от измеренных в различных областях спектра для посевов пшеницы.

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $n=2356$

Область спектра	$\bar{\Delta}$ %	$\bar{\Delta}$ %
Зеленая	—11,9... 17,9	14,8
Красная	—12,0... 18,1	16,1
БИК-диапазон	—11,4... 13,0	13,5

В то же время на конкретных площадках соотношение между положительными и отрицательными отклонениями могут варьировать (табл. 4.8) как по объективным, так и субъективным причи-

Таблица 4.8

Характеристики положительных и отрицательных отклонений Δ (%) расчетных b_λ от измеренных b_λ для посева яровой пшеницы на фенофазах колошение—цветение.

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $L \geq 2,5$, $n=314$

Δ	Накопленные частоты, %					
	Красная область видимого диапазона			БИК-диапазон		
	+ Δ	- Δ	Δ	+ Δ	- Δ	Δ
<5	20	29	22	23	38	28
<10	38	53	41	35	69	46
<15	49	68	54	57	85	66
<20	70	86	79	70	94	78
<25	80	92	91	86	100	91
$\bar{\Delta}$	18	12	16	14	9	14

нам. Последние состоят прежде всего в неточности задания значений входных параметров модели, а объективные являются следствием ограничений, заложенных в расчетную схему.

Как уже отмечалось, для отдельных вариантов опытов основные погрешности могли возникать при задании значений оптических характеристик фитоэлементов, хотя отклонения ρ в конкретных ситуациях от средних для текущей фенофазы значений $\bar{\rho}$ не превышали 20 %. В разд. 2.3 было показано, что ошибки определения основного параметра структуры РП L зависят от используемой методики и могут достигать ± 20 %. Из рис. 3.5 а видно, что отклонения значений ρ порядка 20 % вызывают относительные изменения расчетных b_λ для посевов с $L=0,5 \div 3$ порядка 5—22 %. Также из теоретических оценок следует, что погрешности в определении L должны сказываться на расчетных значениях b_λ в видимом диапазоне при $L < 3$, а в БИК-диапазоне — при $L < 5$ (см. разд. 3.4). В целом с учетом погрешностей заданных значений входных параметров ориентировочно можно принять реальную точность расчета среднего b_λ для площадки порядка 10 %.

При анализе причин формирования b_λ нельзя игнорировать и ошибки полевых измерений b_λ . Суммарная ошибка измеренных значений b_λ определяется инструментальной ошибкой и изменчивостью b_λ в пределах спектрофотометрируемой площадки. Как отмечалось выше, инструментальная ошибка не превышает ± 8 %. В то же время ошибки осреднения b_λ по 15 точкам для визуально

однородной площадки за одну серию измерений могут достигать $\pm 15\%$, а отклонения отдельных b_λ от среднего значения — 30% . В итоге реальная суммарная ошибка измеренного среднего значения b_λ для одной площадки может составить $\pm 13 \div 16\%$, хотя приведенные в работе D. Lord, R. L. Desjardins, P. A. Dube (1985 г.) отклонения достигают 60% в красной области видимого диапазона и 40% в БИК-диапазоне.

Таким образом, погрешность расчета b_λ и ошибки измеренных b_λ сопоставимы с преобладающими значениями Δ (табл. 4.5, 4.6 и 4.8). Учитывая изложенные выше соображения, а также сравнительно невысокую точность прямых измерений фитометрических параметров при массовых обследованиях сельскохозяйственных полей, которые используются при интерпретации дистанционных измерений [88], достигнутую точность расчетов b_λ для посевов пшеницы с помощью модели Гоудриана можно оценить как вполне приемлемую.

Несмотря на хорошую сходимость расчетных и измеренных b_λ на уровне средних оценок, существуют ситуации, когда $|\Delta|$ значительно выше 25% . Доминирование при этом отрицательных Δ позволяет предполагать наличие объективных причин, вызывающих формирование указанных отклонений. Показательным является также то, что в подавляющем большинстве случаев максимальные отрицательные Δ во всех рабочих зонах спектра отмечаются для сомкнутых посевов. Так, например, для посева Безостой 1 на фенотипе колошения при $L=5$ были получены следующие Δ ($\%$):

$h_\odot^\circ$	670 нм	800 нм
50—60	—50... —66	—38... —63
>60	—47... —65	—45... —61

Систематический характер занижения расчетных данных для сомкнутых посевов пшеницы, возможно, связан с допущениями, использованными при построении модели. Неламбертовское рассеяние отдельных фитоэлементов скорее всего не является преобладающей причиной занижения расчетных b_λ для надира (см. разд. 1.1). Из числа других допущений (см. разд. 1.1) предположение о малых размерах фитоэлементов вполне приемлемо для посевов узколистных злаков, в том числе и для пшеницы. Следовательно, в рамках модели причинами указанных выше отклонений может быть, во-первых, неучет реального вертикального профиля

L и $\bar{\theta}_\Phi$, а во-вторых, несоответствие реальной пространственной структуры пуассоновскому закону размещения фитоэлементов.

Надежными фактическими данными о типе пространственного размещения фитоэлементов в посевах пшеницы мы не располагаем.

В пользу того, что тип размещения не должен существенно отличаться от пуассоновского, свидетельствуют следующие обстоятельства. Во-первых, преобладание перекрестного сева на исследуемых полях, при котором упорядоченность размещения на уровне особи выражена слабо. Даже при наличии рядкового сева на фенофазах, в течение которых оценивалось адекватность модели, смыкание полога нивелирует регулярность в размещении на уровне особей. Во-вторых, результаты эпизодических измерений с помощью наклонной иглы показали случайный тип размещения фитоэлементов на фенофазах колошение — молочная спелость. И в-третьих, ориентируясь на данные Е. В. Абашиной [1] о формировании контактного размещения листьев только в загущенных посевах узколистных злаков (ячменя), можно полагать, что эффект «упаковки» листьев вряд ли будет характерным для обследованных посевов пшеницы с $L < 5 \div 6$. Кроме того, преобладание отрицательных Δ само по себе указывает на то, что в посевах пшеницы не наблюдается группового размещения фитоэлементов (см. разд. 1.1).

Теперь рассмотрим возможное влияние на b_λ вертикального профиля фитометрических параметров. В модели Гоудриана, как и во многих моделях того же класса, предполагается равномерное заполнение объема РП фитоэлементами. Поэтому в расчетную схему вводятся обобщенные для всего посева значения $\bar{L}$, $\bar{\theta}_\phi$, $\bar{\rho}$ и $\bar{t}$. Значения последних трех параметров определяются для площадки (посева) как средневзвешенные на основе соотношения площадей отдельных фракций растений безотносительно к возможной роли этих фракций в формировании b_λ . В то же время очевидно, что влияние отдельных фитоэлементов на отраженный поток радиации зависит прежде всего от положения фитоэлемента в толще РП и от плотности последнего. Так, в редких РП большинство фитоэлементов непосредственно взаимодействуют с облучающим потоком радиации и в равной степени экспонированы для наблюдателя. При подобной структуре логично предположить равновероятное участие всех фитоэлементов в формировании b_λ . В сомкнутых РП роль фитоэлементов нижнего яруса, особенно ориентированных вертикально, крайне ограничена. Это объясняется тем, что количество радиации, рассеянной вверх матовыми непрозрачными вертикально ориентированными пластинами, вдвое меньше, чем горизонтальными пластинами с аналогичными оптическими свойствами. При такой структуре логично предположить, что активно отражающий слой растительности состоит из колосьев, верхних частей стеблей и листьев. Исходя из указанной специфики влияния различных фитоэлементов на b_λ , можно считать, что учет нижних частей стеблей в плотных РП приведет к завышению суммарных для посева значений ρ , L , θ_ϕ и к занижению t .

Суммируя последствия отмеченных выше изменений значений входных параметров, вытекающие из анализа материалов главы 3,

отметим следующие основные моменты. Увеличение ρ может повлечь за собой возрастание b_λ в силу прямой связи между b_λ и ρ (см. разд. 3.2). Занижение τ : в видимом диапазоне τ практически не влияет на b_λ , а в БИК-диапазоне воздействие τ ограничено компенсирующим увеличением ρ (см. разд. 3.2). Увеличение L : при зеленом цвете растительности тенденции в изменении b_λ за счет L разнонаправлены в красной области видимого диапазона и в БИК-диапазоне; кроме того, при высоких значениях L b_λ малочувствительно к колебаниям этого параметра (см. разд. 3.4).

Увеличение $\bar{\theta}_\Phi$: для сомкнутого РП функция $\beta_\lambda(\bar{\theta}_\Phi)$ является убывающей независимо от λ , при этом b_λ высокочувствительно к незначительным изменениям $\bar{\theta}_\Phi$, особенно при отклонении ориентации в сторону вертикальной (см. разд. 3.5).

Учитывая эти тенденции, можно принять наиболее вероятной причиной занижения b_λ некорректное задание характеристик ориентации фитоэлементов, в том числе искусственное завышение $\bar{\theta}_\Phi$ при включении «неработающих» частей стеблей и неучет вертикального профиля ориентации листьев. Из табл. 4.9 следует, что

Таблица 4.9

Вертикальное распределение среднего угла наклона листьев $\bar{\theta}_\lambda$ и относительной поверхности отдельных фракций растений в посеве озимой пшеницы (фенофаза молочная спелость, густота 415 ст/м²)

z см	$\bar{\theta}_\lambda(z)^\circ$	$L_\lambda(z)$	$L_{ст}(z)$	$L_k(z)$	$L_\lambda(z)/L_\lambda$
100—80	52	0,23	0,03	0,26	0,07
80—60	53	0,58	0,20	0,07	0,17
60—40	58	1,06	0,32	0	0,31
40—20	61	1,34	0,36	0	0,39
20—0	48	0,19	0,39	0	0,06

в относительно разреженном верхнем (до 60 см) и нижнем слоях посева углы наклона листьев на 4—9° меньше, чем средние для посева $\bar{\theta}_\lambda = 57^\circ$. Итоговое для верхнего яруса значение $\bar{\theta}_\Phi$ с учетом вертикального профиля $\bar{\theta}_\lambda$, а также ориентации стеблей и колосьев составляет 56°, т. е. практически равно $\bar{\theta}_\lambda$ для посева в целом.

На основе этого соотношения можно принять, что изменение $\bar{\theta}_\lambda$ по вертикали компенсируется наличием стеблей и колосьев в верхнем ярусе и соответственно при расчетах b_λ сомкнутого посева целесообразно использовать значения $\bar{\theta}_\Phi = \bar{\theta}_\lambda$ и $L = L_\lambda$.

При рассмотрении причин возможных систематических расхождений между расчетными и измеренными значениями b_λ для посевов узколистных злаков была также оценена применимость модели Гюдриана для описания отражения стеблями и колосьями. В разд. 4.2 на основе специально поставленных опытов было показано, что для РП с чисто вертикальной ориентацией тенденции изменения b_λ , рассчитанных по модели и выявленных в ходе измерений, хорошо согласуются. Из табл. 4.10, составленной по результатам того же опыта, следует, что и количественные оценки b_λ хорошо согласуются.

Таблица 4.10

Повторяемость p отклонений $|\Delta|$ расчетных значений b_λ от измеренных b_λ для РП с вертикальной ориентацией фитоэлементов (стебли и колосья пшеницы).

Надир, $h_0 > 45^\circ$, $n = 55$

$ \Delta $ % . . .	≤ 5	6—10	11—15	16—20	21—25	$ \bar{\Delta} $
p %	40	33	16	7	5	8

На основе полученных оценок остается принять в качестве доминирующей причины формирования отрицательных Δ для сомкнутых посевов пшеницы рассмотренное выше влияние вертикального профиля L и $\bar{\theta}_\phi$. Из данных табл. 4.11 видно, что при $\bar{\theta}_\phi = \bar{\theta}_\lambda$ и $L = L_\lambda$ можно существенно уменьшить погрешность теоре-

Таблица 4.11

Отклонения Δ (%) расчетных значений b_λ^* от измеренных b_λ для сомкнутых посевов озимой пшеницы

Надир, $h_0 > 45^\circ$

L_λ	Видимый диапазон	БИК-диапазон	L_λ	Видимый диапазон	БИК-диапазон
5,5	—14	—7... 4	2,4	5	8
5,3	—2	—6... 5	2,3	—9	1... 3
3,0	—5	—11... 2	2,3	0	—2... 8

Примечание. Расчет b_λ^* проведен с учетом только листьев.

тических оценок b_λ в видимом и в БИК-диапазоне. Таким образом, снимая вклад вертикальности фитоэлементов, можно достичь лучшего согласования расчетных и измеренных значений b_λ для сомкнутых посевов пшеницы. Хотя этот прием и является искусственным, его использование кажется нам обоснованным исходя из предположения о превалирующей роли листьев в процессе взаимодействия фитоэлементов с потоками радиации.

В заключение остановимся еще на одном методическом вопросе, касающемся способа определения значений $b_s \approx r_s$, задаваемых при расчетах b_λ . Согласно ряду методических указаний, отражательные свойства почвы определяются по данным измерений на оголенной площадке, расположенной рядом с РП или в его пределах. Однако на таких площадках трудно соблюсти условия, полностью адекватные условиям посева, так как в последнем случае на поверхности почвы находится ветошь, остатки растительности от предшественника и т. п. По нашим данным, b_s при наличии ветоши (b_s^v) выше b_s оголенной площадки (b_s^o):

	558 нм	670 нм	748—970 нм
$(b_s^v - b_s^o)/b_s^o$ %	9—51	9—45	6—44

Причем, чем суше ветошь и темнее почва, тем больше различия в значениях b_s^v и b_s^o . Отмеченное несоответствие оценок b_s было подтверждено в опыте с редким ($L=0,18 \div 0,76$) РП, сформированным вертикальными фитоэлементами, т. е. в ситуации, когда возможна максимальная чувствительность b_λ к изменению b_s . При экстраполяции экспериментальной зависимости $b_\lambda(L)$ в точку с координатой $L=0$ превышение полученных при экстраполяции значений b_s^v над измеренными b_s^o на соседней оголенной площадке составили:

	520—575 нм	670 нм	800 нм
$(b_s^v - b_s^o)/b_s^o$ %	8—70	≤ 10	13—48

Использование в дальнейших расчетах b_λ значений b_s^o позволило снизить $|\bar{\Delta}|$ до 10 % и менее по сравнению с 37 % при расчете b_λ по $b_s^v \approx r_s$ на оголенных площадках.

Подводя итог рассмотрению материалов по проверке адекватности модели Гоудриана применительно к посевам пшеницы, следует подчеркнуть, что при корректном задании значений входных параметров модель адекватно описывает отражение посевов пшеницы для условий $\theta_0=0^\circ$ и $h_\odot > 45^\circ$. В случае редких РП, когда существенна роль отражательных свойств почвы, целесообразно значения $b_s \approx r_s$ находить при экстраполяции экспериментальных зависимостей $b_\lambda(L)$ в точку с координатой $L=0$. Такой прием позволяет лучше учесть реальные отражательные свойства почвы в посевах. Для сомкнутых посевов хорошее количественное согласование достигается при расчете b_λ на основе фитометрических

характеристик листьев, что вполне логично объясняется ведущей ролью этих фитоэлементов в процессе рассеяния и поглощения радиации. В то же время если выполнить модификацию модели, позволяющую задавать реальный вертикальный профиль относительной поверхности и пространственной ориентации фитоэлементов, тогда при расчете b_λ и для сомкнутых посевов станет возможным учет фракционного состава в различных ярусах РП.

Посевы райграса. Исследованные нами посевы райграса итальянского находились в двух фазах развития: разворачивание 4—5-го листа и цветение. В первом случае посев имел высоту $25 \div 30$ см и сформировал высокосомкнутый полог при варьировании L от 3,2 до 6,4 на площадках с разным удобрением; ориентация фитоэлементов за счет доминирования листьев отклонялась от сферической в сторону горизонтальности. Посев на фенофазе цветения имел высоту около 60 см, L изменялось в пределах 1,1—4,2 в сочетании с общим отклонением ориентации в сторону вертикальной (см. разд. 2.4). Оба посева были приурочены к черноземам южным карбонатным.

Измерения b_λ посева райграса сопровождалось одновременными лабораторными измерениями ρ (см. разд. 2.1), при этом ρ определялось для верхней и нижней сторон листа, а также для стеблей. При расчете b_λ был задан диапазон ρ , охватывающий изменчивость ρ как в пределах площадки, так и в пределах одного растения. Это позволило учесть в расчетной схеме b_λ влияние различного разнообразия ρ и снять погрешности расчета b_λ из-за некорректного задания ρ .

Экспериментальные зависимости $b_\lambda(L)$ для райграса на обеих фенофазах соответствуют теоретическим тенденциям (см. рис. 4.1). Однако количественное согласование осредненных по площадкам расчетных и измеренных значений b_λ можно считать хорошим только в БИК-диапазоне для всех рассмотренных вариантов плотности полога. В видимом диапазоне преобладают отрицательные Δ , значения которых возрастают для плотного полога (табл. 4.12).

Таблица 4.12

Средние отклонения $\bar{\Delta}$ (%) расчетных значений b_λ от измеренных для посевов райграса итальянского

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $n = 1350$

λ нм	Цветение			4—5-й лист			
	L						
	1,1	1,9	3,6	3,2	3,2	4,5	6,4
558	0	—17	—46	—29	—36	—47	—56
675	24	0	—30	—22	—29	—39	—36
800	6	—2	—17	8	3	6	11

Занижение расчетных b_λ на фенофазе цветения в вариантах с $L > 3$, возможно, обусловлено неучетом вертикальной структуры РП, последствия которого были рассмотрены выше на примере сомкнутых посевов пшеницы. Но для проверки этого предположения для райграса мы не располагаем фактическим материалом. В то же время систематическое занижение расчетных b_λ в видимом диапазоне для высокосомкнутых посевов на фенофазе 4—5-й лист заставляет искать другую причину, вызывающую отрицательные Δ . Скорее всего это регулярная упорядоченность в расположении фитоэлементов, которые максимально заполняют свободное пространство РП. При тенденции к горизонтальной ориентации листьев следствием упорядоченности в их расположении в сомкнутых посевах является уменьшение затененных участков растительности и соответственно увеличение яркости посева. Причем этот эффект проявляется в меньшей степени в БИК-диапазоне, в котором влияние затенения ограничено (см. разд. 3.2). Отметим, что общее снижение расчетных b_λ в высокоплотных посевах райграса, особенно выраженное в видимом диапазоне, согласуется с тенденцией к уменьшению A для плотного полога с регулярной структурой, выявленной Гудрианом (см. разд. 1.1).

Таким образом, проверка адекватности модели на примере райграса показала, что модель Гудриана неприменима к загущенным посевам узколистных злаков с регулярным размещением фитоэлементов. Однако это ограничение справедливо в основном для видимого диапазона, а в БИК-диапазоне, где влияние пространственного размещения не столь существенно, модель позволяет получать вполне приемлемые оценки b_λ .

Посевы сои и кукурузы. Как уже отмечалось, посевы этих культур имели рядковую структуру. Сами рядки были очень неоднородны, поэтому в целом посев можно рассматривать как комбинацию регулярного и группового размещения на уровне особей. Сложность интерпретации наземных измерений b_λ усугублялась также наличием крупных листьев, которые формировали суммарную относительную поверхность фитоэлементов на момент обследования посевов.

Помимо общих черт строения посевов двух культур, для сои характерен гелиотропизм листьев, т. е. листья «следят» за положением Солнца и изменяют свои угловые координаты в течение короткого отрезка времени даже в полуденные часы (см. разд. 2.4). Более того, в процессе приспособления к дневной динамике условий освещения изменяется экспонированность верхней и нижней сторон листа по отношению к Солнцу. Отмеченные видовые особенности сои должны были вызвать разброс экспериментальных значений b_λ при фиксированных L вследствие влияния ρ и θ_ϕ . Однако измерения показали, что во всех рабочих участках спектра ρ верхней и нижней сторон листьев сои приблизительно равны между собой, за исключением зеленой области, в которой $\rho_n = 1,12\rho_v$. Изменения θ_λ в течение часа наблюдений составляли $\pm 7^\circ$ при среднем значении $\theta_\lambda = 49^\circ$, т. е. в целом ориентация

отклонялась от сферической в сторону горизонтальности. А как было показано в разд. 3.5 (см. рис. 3.11), подобные колебания углов наклона фитоэлементов не приводят к значительным изменениям b_λ . Таким образом, видовая специфика оптических свойств фитоэлементов и пространственной ориентации листьев сои не может быть основной причиной, объясняющей выявленный разброс измеренных значений b_λ (см. коэффициенты вариации b_λ на рис. 4.1).

Доминирующим фактором, обуславливающим как значительную изменчивость измеренных b_λ , так и большие значения Δ , полученные при сравнении расчетных b_λ со значениями b_λ для конкретных площадок в посевах сои и кукурузы, является общая для посевов двух культур неоднородность пространственной структуры. Учитывая неоднородность структуры посевов, а также соизмеримость мгновенного поля зрения наземных приборов с размерами листьев, целесообразно сравнивать расчетные b_λ со значениями b_λ , осредненными по большой выборке элементарных площадок, при группировке последних на основе близких значений L . При таком подходе достигается хорошее согласование расчетных и измеренных b_λ (табл. 4.13 и 4.14) без каких-либо

Таблица 4.13

Средние отклонения $\bar{\Delta}$ (%) расчетных значений b_λ от измеренных для посева сои на фенофазе конец листообразования

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $n = 563$

λ нм	L_λ							
	0,3	0,65	0,9	1,1	1,45	1,7	1,95	2,2
550	—18	—20	—8	—9	—13	—3	—7	—7
670	—4	5	5	—5	—7	—2	—12	0
800	—9	—	—14	—8	4	4	13	—4

Таблица 4.14

Средние отклонения $\bar{\Delta}$ (%) расчетных значений b_λ от измеренных для посева кукурузы на фенофазе 5—8-й лист

Надир, $h_\odot > 45^\circ$, $n = 360$

λ нм	L_λ				
	0,75	1,1	1,2	1,4	3,5
550	—15	—32	—13	—6	11
670	10	3	10	0	5
800	—19	—34	—15	0	5

систематических тенденций в поведении Δ . Некоторое превышение значений $|\Delta|$ для посевов кукурузы по сравнению с $|\Delta|$ для сои, вероятнее всего, связано с меньшим объемом выборки по кукурузе.

Таким образом, модель Гоудриана адекватно описывает процесс отражения посевов с неоднородной пространственной структурой и крупными фитоэлементами только на уровне средних для посева значений b_λ .

Рассмотренные выше результаты характеризуют пригодность модели для описания отражательных свойств посевов, спектрометрируемых в наземных условиях в направлении надира, при детальном обследовании структуры РП, оптических свойств отдельных фитоэлементов и почвы. В практике дистанционных исследований используются отражательные характеристики, являющиеся интегральными для больших площадей. Поэтому целесообразно оценить возможность применения численного моделирования для получения значений b_λ , осредненных по площади, размеры которой соизмеримы с размерами поля, т. е. порядка 10^4 — 10^5 м². Осреднение, выполненное на посевах кукурузы и сои, по существу имитирует результаты самолетно-вертолетных измерений при большом пространственном разрешении аппаратуры. Непосредственно сравнение расчетных b_λ с измеренными с помощью самолетной аппаратуры ГосНИЦИПР [63] было проведено для посева пшеницы, находящегося в фенофазе молочно-восковой спелости. Участок, на котором выполнялись измерения, имел размер $3,3 \times 10^4$ м. При визировании в надир в околополуденные часы выборка измеренных значений b_λ состояла из 30 членов для каждой длины волны. Объем выборки по L составлял 359 измерений на учетных площадках размером 50×50 см и 200 измерений характеристик пространственной ориентации растений, отобранных по случайной схеме. Посев был практически однородным по окраске (доминировал желто-зеленый аспект), поэтому расчет b_λ выполнялся по средневзвешенному значению $\bar{\rho}$, найденному через средние для поля характеристики $\bar{Y}_\lambda$ и доли относительной поверхности различных фракций. Из данных табл. 4.15 следует, что

Таблица 4.15

Сравнение расчетных и средних для посева озимой пшеницы измеренных значений b_λ

Надир, самолетные измерения с высоты 150 м, $h_\odot > 55^\circ$

λ нм	$b_{\lambda p}$	$b_{\lambda n} \pm m b_\lambda$ (при $P=0,95$)	$\bar{\Delta} \%$
550	0,075	$0,072 \pm 0,006$	4
670	0,089	$0,086 \pm 0,003$	3
780	0,257	$0,227 \pm 0,010$	13

модель Гоудриана с хорошим количественным согласованием описывает отражательные свойства посева в целом.

Таким образом, проведенная количественная проверка адекватности модели Гоудриана показала возможность и целесообразность использования численных экспериментов для выявления основных закономерностей изменения b_λ в пространстве параметров модели.

Модель применима для условий визирования в надир и $h_\odot > 45^\circ$ для РП со случайным размещением фитоэлементов в пространстве. При этом

- в случае несомкнутых РП требуется корректное задание характеристик отражательных свойств почвы, максимально приближенных к условиям почвенного покрова в посеве;

- в случае сомкнутых РП возможны ошибки расчета b_λ за счет несоответствия реального вертикального профиля фитометрических параметров допущению о равномерном заполнении объема РП фитоэлементами.

Для загущенных посевов при регулярном размещении фитоэлементов и максимально возможном заполнении ими свободного пространства РП расчетные оценки b_λ существенно занижены по сравнению с измеренными.

Для посевов с неоднородной пространственной структурой и крупными размерами фитоэлементов согласование результатов во многом зависит от пространственного разрешения используемой аппаратуры. Для таких РП удовлетворительное согласование расчетных и измеренных b_λ достигается за счет осреднения по пространству. В целом при увеличении пространственного разрешения аппаратуры снимается воздействие на b_λ неоднородности растительных объектов. Это позволяет предполагать реальность использования результатов численного моделирования при анализе спектрометрической информации, полученной для надира на основе самолетно-вертолетных измерений.

4.4. Сопоставление тенденций изменения расчетных и измеренных комплексных спектральных индексов

Качественное согласование теоретических зависимостей P_i от входных параметров модели реально наблюдаемым в природе проверялось с привлечением данных наземных измерений b_λ для посевов озимой пшеницы.

Зависимость P_i от высоты Солнца. Для проверки дневного хода P_i были отобраны серии измерений b_λ , выполненные в надир при ясной и малооблачной погоде и при $h_\odot$ от 20° до 65° на посеве с сомкнутым пологом ($L > 3$) в период восковая—полная спелость, когда растения имели желтый цвет. Почвы (чернозем южный, среднегумусированный) находились в сухом состоянии с уплотненным верхним слоем. Значения r , при измерениях были близки к тем, которые использовались в численных экспериментах для варианта «светлые» почвы (см. разд. 3.9).

Общие тенденции дневного хода осредненных за серии значений $P_1 \div P_8$ для посева пшеницы (рис. 4.2) хорошо совпадают

с теоретическими для гипотетического РП, сформированного желтыми фитоэлементами на «светлых» почвах (с учетом возможного влияния θ_f при переходе от чисто сферической к вертикальной ориентации), а для P_6 — и при сочетании зеленой растительности и «темных» почв [19, 59]. Наибольшая чувствительность к изменению $h_\odot$ на завершающих фенофазах пшеницы выявлена для P_4

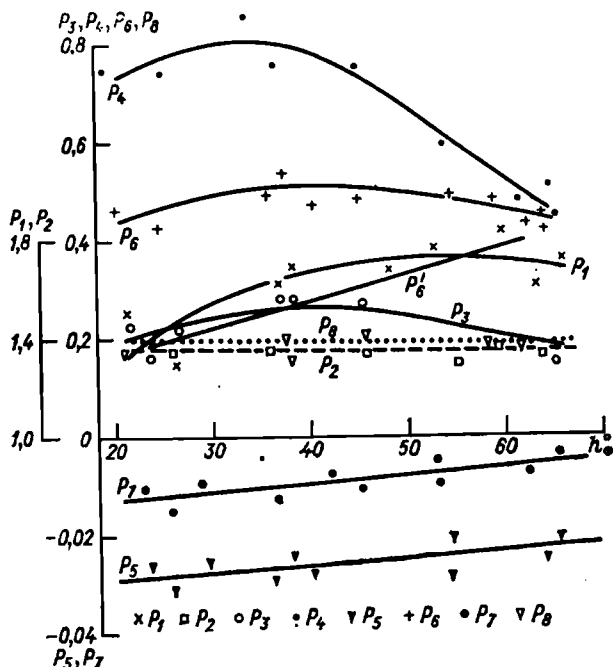


Рис. 4.2. Изменение комплексных спектральных индексов P_i в зависимости от $h_\odot$ при ясной погоде. Надир, посевы озимой пшеницы, фенофаза восковой и полной спелости, наземные измерения.

P_6' — по данным [17] для зеленого сомкнутого полога клевера.

при $h_\odot > 30^\circ$ и P_1 при $h_\odot < 40^\circ$, наибольшая стабильность в течение дня — для P_2 и P_8 . Линейная зависимость от $h_\odot$ получена для P_5 и P_7 , что существенно облегчает приведение значений этих индексов, особо чувствительных к колебаниям L (см. ниже табл. 5.3 и 5.5), к однотипным условиям освещения. Оценки ΔP_i в интервале $h_\odot = 20 \div 65^\circ$ в целом соответствуют группировке, выполненной на основе расчетной чувствительности P_i к изменению $h_\odot$ [19, 59]. Исключение составляют данные для индекса P_8 , который в конкретном опыте оказался более инвариантным к $h_\odot$, чем в результате численного моделирования.

Помимо объективных ограничений модели Гоудриана, рассмотренных в главах 1 и 3, реальной причиной расхождений расчетных и измеренных P_i могут быть ошибки измерений b_λ при низких

$h_{\odot}$, обусловленные анизотропностью эталона [117]. Но так как в общем на примере сомкнутого полога получено достаточно хорошее согласование тенденций дневного хода и ΔP_i , можно предполагать, что использование комбинаций b_{λ} является одним из способов снижения погрешностей расчета яркостных характери-

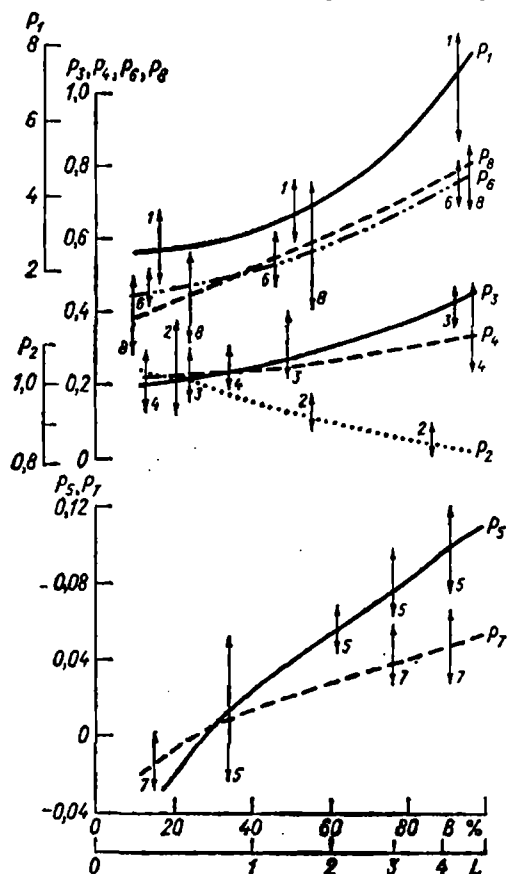


Рис. 4.3. Изменение комплексных спектральных индексов P_i в зависимости от проективного покрытия B и относительной поверхности фитоэлементов L посевов озимой пшеницы. Надир, полуденные часы, ясная малооблачная погода, фенофаза колошение—цветение, наземные измерения.

Стрелками показан диапазон изменения P_i .

стик без принципиальных изменений самой модели Гудриана. Однако это предположение требует дальнейшей экспериментальной проверки.

Зависимость P_i от плотности полога демонстрируют данные, приведенные на рис. 4.3. При построении этих графиков объединены результаты измерений, выполненных на фенофазах колошение—цветение ($\gamma_3 > 70\%$) в ясную малооблачную погоду при $h_{\odot} > 50^\circ$. Почвы те же, что и в рассмотренном выше примере, но более влажные (p_s соответствовал промежуточным значениям для вариантов «светлые» и «темные» почвы).

Из сопоставления эмпирических зависимостей $\bar{P}_i(L)$ с теоретическими для зеленой растительности (см. табл. 3.18) очевидно

полное совпадение тенденций. С привлечением расчетных данных (см. разд. 3.9) можно объяснить и те отклонения от средних значений P_i , которые выявлены при измерениях для фиксированных L . Так, весьма вероятными причинами этих отклонений для P_1 являются: а) при сомкнутом и среднесомкнутом положе — чувствительность к ρ в пределах оттенков зеленого цвета (см. рис. 3.25), б) при несомкнутом положе — высокая чувствительность к ρ , (кривые 1' на рис. 3.23 и 3, 3' на рис. 3.24) и в) высокая чувствительность к незначительным отклонениям ориентации от сферической (кривые 3, 3' на рис. 3.24); для P_2 — чувствительность этого индекса: а) к ρ , при несомкнутом положе (рис. 3.20—3.22), б) к изменению θ_ϕ при отклонении ориентации в сторону вертикальности в случае сомкнутого полога (рис. 3.21); для P_3 — чувствительность: а) к ρ , при несомкнутом положе (кривые 1 на рис. 3.26 и 1, 2' на рис. 3.27), б) к ρ при сомкнутом положе (кривые 1, 2' на рис. 3.28) и в) к θ_ϕ при отклонении ориентации в сторону вертикальности (рис. 3.27). Аналогично для других индексов (теоретические зависимости для которых приведены в [19], см. также табл. 3.18—3.21) на основе результатов численного моделирования разброс экспериментальных значений P_i можно объяснить следующими причинами: для P_3 и P_4 — существенной их чувствительностью к θ_ϕ и ρ ; для P_5 — P_7 — чувствительностью к ρ , при $L < 3 \div 4$ и к ρ в пределах оттенков зеленого цвета.

Как видно из данных табл. 4.16, совпадает не только общий характер зависимости P_i от L , но и степень чувствительности

Таблица 4.16

Сравнение расчетной и измеренной чувствительности комплексных спектральных индексов к изменению L от 0,5 до 5

Надир, зеленая растительность

Способ оценки P_i	$ \Delta \bar{P}_i / \Delta \bar{P}_4 $			
	P_4	P_2	P_3	P_1
По модели Гоудриана По измерениям b_λ	1 (0,36—0,28) 1 (0,33)	1,0—1,3 0,7	1,5—2,0 1,5	1,4—1,6 1,3
Способ оценки P_i	$ \Delta \bar{P}_i / \Delta \bar{P}_4 $			
	P_3	P_1	P_7	P_5
По модели Гоудриана По измерениям b_λ	1,4—1,7 1,4	2,0—2,4 2,0	2,5 2,6	2,3—2,4 2,7

Примечание. В скобках даны значения ΔP_4 , к которым нормировались $\Delta P_2 - \Delta P_3$.

разных индексов к изменению L от 0,5 до 5. В отличие от теоретических оценок, при натурных измерениях минимальные ΔP_i получены для P_2 , но в целом этот индекс, как и P_4 , обладает слабой чувствительностью к изменению L . При выделении группы индексов с максимальной чувствительностью к L (P_7 , P_5 и P_1) получено полное согласование результатов численного и натурального экспериментов.

Необходимо подчеркнуть, что, несмотря на достаточно высокую чувствительность P_7 и P_5 , разброс значений этих индексов для

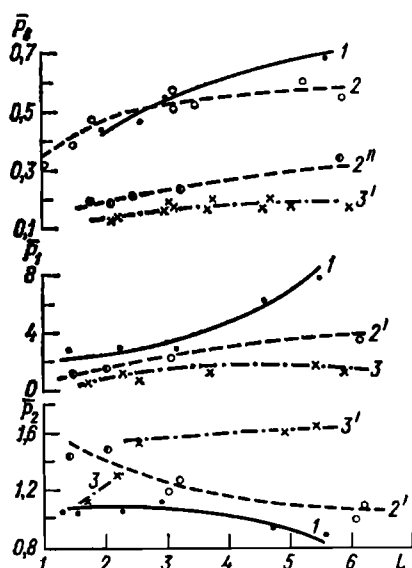


Рис. 4.4. Сезонные изменения средних значений P_1 , P_2 , P_8 посевов озимой пшеницы в зависимости от L . Надир, полуденные часы, ясная малооблачная погода, наземные измерения.

Фенофазы: 1 — колосшение—цветение, 2 — молочная спелость, 2' — молочная—молочно-восковая спелость, 2'' — восковая спелость, 3, 3' — полная спелость (3' — посевы желтого цвета, 3 — желто-бурого).

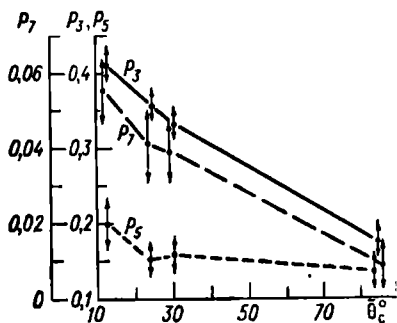
среднесомкнутого полога позволяет выделить только три группы посевов, различающихся по плотности полога: с $B > 75 \div 80$, $30 \div 60$ и $B < 25 \div 30$ %. Большая вариабельность P_1 ограничивает возможности его использования при восстановлении B (или L). Поэтому на основе P_1 (так же как и для P_6 , P_8 , P_3 и P_2) реально выделить всего двух групп посевов: с $B > 70-80$ % и $B < 20-30$ % (рис. 4.3).

Изменение P_i в течение вегетации определяется динамикой состояния посевов, в том числе изменением L , θ_f , ρ и ρ_s . Из представленных на рис. 4.4 индексов теоретически наименьшие ΔP_i за счет ρ_s характерны для P_8 , наибольшие — для P_1 и P_2 . Так как P_8 менее чувствителен и к θ_f (табл. 3.21), можно полагать, что только сезонная динамика «нормализованной разности» непосредственно формируется под воздействием изменчивости ρ и L . В целом качественное согласование результатов численных и натуральных экспериментов для РП, сформированного как зелеными, так и желтыми фитоэлементами, очевидно из сравнения данных рис. 4.4 и рис. 3.23, 3.25 (для P_1), 3.20, 3.22 (для P_2) и 3.26, 3.28 (для P_8).

Практически одинаковые оценки чувствительности при изменении L от 2 до 5 получены для P_8 в случае зеленого цвета растений (ΔP_8 по измерениям 0,27, по расчету — 0,21) и зелено-желтого (0,30 и 0,21 соответственно), для P_1 — при желтом цвете (0,58 и 0,50 соответственно). В остальных случаях расхождения в ΔP_i более существенны, но общее свойство рассмотренных P_i — минимальная чувствительность к L для P_2 и максимальная для P_1 — сохраняется как при расчете по модели, так и по измерениям. Однако, несмотря на среднюю чувствительность P_8 к изменению L от 2 до 5, несомненным преимуществом этого индекса является, устойчивость ΔP_8 (при разнице между значениями Δ менее 10 %) при переходе зеленого цвета растительности к зелено-желтому [19, 59].

Рис. 4.5. Зависимость P_3 , P_5 , P_7 от среднего угла наклона стеблей θ_c в посевах пшеницы (описание объекта см. в табл. 4.3А). Надир, полуденные часы, ясная малооблачная погода, наземные измерения.

Стрелками показаны σ_{P_i} . (График составлен совместно с Е. В. Фадеевой.)



Влияние на P_i пространственной ориентации иллюстрируют данные рис. 4.5, полученные по результатам имитационных опытов с полеганием. Установленное в этих опытах уменьшение чувствительных к ориентации индексов по мере роста θ_ϕ (при фиксированных значениях L , ρ_s и ρ) полностью совпадает с теоретическими зависимостями P_3 , P_5 и P_7 от θ_ϕ (см. табл. 3.20, 3.21 и [19, 59]).

*
* *
*

Таким образом, приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что модель Гоудриана качественно правильно описывает тенденции изменения различных комбинаций b_λ в оптическом диапазоне для условий визирования в надир. Возможно также, что метод комбинирования b_λ в разных областях спектра позволяет ослабить эффекты, связанные с особенностями индикатрис отражения РП в видимом и БИК-диапазоне. Если это предположение подтвердится в дальнейших исследованиях, то область практического применения ММРР типа модели Гоудриана существенно расширится. В заключение отметим, что, по данным [98], осредненные по 75 полям с пшеницей значения ND (P_8) во время колошения—цветения были равны 0,85—0,80, молочной спелости — 0,65—0,50 и полной спелости — 0,25—0,10. Эти оценки хорошо

Согласование измеренных и рассчитанных по моделям Сунтса (1), Kimes (2) и SAIL (3) значений b_λ для надгара

Модель, источник	Культура, фенофаза; объем выборки	Входные параметры			λ нм	Оценка согласования		Согласование расчетных и экспериментальных зави- симостей
		$L; \theta_\phi$	ρ	ρ_s	$h_\odot^*$	r^2	$\Delta \%$	
1 [75]	Пшеница яровая, МВС	3,1; —	Нет дан- ных	0,13 0,39	18—55 18—55	550 850	Нет данных То же	$\Delta > 0$, расчетные зависи- мости $b_\lambda(h_\odot)$ противопо- ложны эксперименталь- ным
1 [76]	Пшеница яровая, К	3,5; —	Нет дан- ных	0,04— —0,16	39	550— —1350	" "	$\Delta > 0$, минимальные Δ получены для 550—650 нм*
1 [120]	Пшеница яровая, В—ПС; по 17 из- мерений в 16 ра- бочих зонах спек- тра	0—5,3; —	0,042—0,62 (16 вари- антов	0,055— —0,181	25—64	500— —1150	0,47— —0,98 Нет данных	Худшее согласование по- лучено на ранних и позд- них фенофазах

1	Соя, ПСт; 6 изме- рений	2,87; 52	0,05—0,15	Нет данных	30—60	500—700	Нет данных	18—28	$\Delta > 0$ при $h_{\odot} > 45^{\circ}$; $\Delta < 0$ при $h_{\odot} < 45^{\circ}$
2	Пшеница	0,3; 57,5	0,05	0,31	30—60	700— —1100	То же	4—22	Минимальные Δ полу- чены при $h_{\odot} = 30^{\circ}$
[106]					39—63	580—680	"	2—4	Совпадают зависимости $b_{\lambda}(h_{\odot})^*$
	Ежа сборная	1,4; 57,5	0,12	0,24	19—45	580—680	"	17—29	Совпадают зависимости $b_{\lambda}(h_{\odot})$, минимальные Δ получены при $h_{\odot} = 45^{\circ}$
3**	Соя, ПСт; 12 изме- рений	2,87; 52	0,45	0,21— —0,24	30—60	800— —1100	"	0—15	

* Данные получены на основе графиков, приведенных в указанных источниках.

** Получено по работе Goel, Thompson, 1984 г.

Примечание. Δ рассчитано по (4.1); фазы: В — всходы, К — колошение, МВС — молочно-восковая спелость, ПС — полная спелость, ПСт — появление стручков.

согласуются как с рассчитанными по модели Гюдриана значениями P_8 для сомкнутых РП (рис. 3.26), так и с измеренными для посевов пшеницы Безостая 1 (см. рис. 4.3, 4.4).

4.5. Оценка адекватности различных математических моделей отражения

Для сравнения адекватности модели Гюдриана с адекватностью других ММРР нами использовались литературные данные, которые систематизированы в табл. 4.17 и частично изложены в разд. 1.1. Отметим, что в последние годы в печати появляются в основном работы по исследованию ММРР для наклонных углов визирования. Этот факт скорее всего является результатом совпадения по времени интенсивного развития теоретических вопросов дистанционного зондирования и потребностей в обосновании возможностей перспективных широкоугольных сканеров. Для надирных углов визирования число публикаций, посвященных проверке различных ММРР, довольно ограничено, причем сравнение теоретических и измеренных b_λ проводится преимущественно для одной фиксированной площадки. Так, в частности, ряд моделей был проверен с привлечением материалов полевых измерений, выполненных Ranson и др. (университет Purdue, LARS) в 1980, 1982 гг. на посевах сои и кукурузы.

Для моделей Суитса [119] и Кууска—Нильсона [41] имеются данные, показывающие качественно хорошее согласование расчетной и измеренной зависимостей b_λ в красной области и в БИК-диапазоне от L и/или B для посевов пшеницы, ржи и ячменя в период от появления всходов до колошения [41] и до молочно-восковой спелости [119].

Количественные оценки согласования расчетных и измеренных b_λ (в том числе коэффициент детерминации r^2 , значения Δ , а также полученные нами характеристики, следующие из сопоставления опубликованных графических материалов) приведены в табл. 4.17. Из этих оценок при исследовании ММРР в первую очередь представляет интерес знак и величина расхождений Δ . Значения r^2 и коэффициенты регрессии, используемые в некоторых зарубежных работах, далеко не полностью отражают адекватность моделей, так как при равных выборках высокие r^2 могут быть получены и в случае систематических расхождений, и при незначительном разбросе случайных расхождений.

Приведенные в табл. 4.17 данные свидетельствуют прежде всего о принципиальном характере расхождений между измеренными и рассчитанными по модели Суитса зависимостями b_λ ($h_\odot$). Возможные причины этих расхождений обсуждались в разд. 1.1. Кроме того, обращает на себя внимание факт систематического (примерно одного порядка) завышения b_λ , рассчитанных по моделям Суитса и SAIL, в БИК-диапазоне для сомкнутых посевов. Но в целом из-за малых объемов выборок трудно в настоящее

время судить о преимуществе той или иной модели. Предварительно можно сделать заключение, что модель Гоудриана позволяет рассчитывать b_λ с расхождениями, близкими к тем, которые получены для моделей, учитывающих азимуты Солнца и направления визирования, а также вертикальную стратификацию полого РП (см. дополнительно оценки для модели CSP в разд. 1.1). С другой стороны, близкие значения Δ свидетельствуют и о том, что на основе однотипных моделей можно рассчитывать b_λ приблизительно с одинаковой погрешностью как для одной фиксированной площадки, так и для пространственной выборки площадок. Это, в свою очередь, указывает на то, что главный источник погрешностей расчетов заключается в принципиальных положениях, которые используются при построении рассмотренных ММРР одного класса.

*

* *

Таким образом, модель Гоудриана наравне с моделями SAIL, Kimes и Суитса применима для исследования закономерностей изменения b_λ при надирных углах визирования. Дальнейшее совершенствование этой модели целесообразно проводить путем введения в расчетную схему реальных вертикальных профилей ориентации, пространственного размещения фитоэлементов и L . Очевидно, что в настоящем варианте модель нельзя использовать для адекватного описания закономерностей углового распределения радиации, отраженной различными природными РП. Хотя вполне возможно, что модификация, выполненная Chen [78, 79], расширит область применения модели Гоудриана для оценки b_λ и при наклонных углах визирования.

Проверка адекватности модели Гоудриана показала возможность и целесообразность использования полученных теоретических закономерностей формирования яркостных характеристик системы растительность—почва для экспертных оценок потенциально распознаваемых ситуаций. В отличие от процедуры обращения, подробно исследованной в цикле работ Goel для моделей Суитса, SAIL, CUPID¹, мы будем рассматривать далее возможность восстановления отдельных параметров растительности и диагностики состояния агроценозов на основе результатов решения прямой задачи для условий визирования в надир.

В принципе для модели Гоудриана, так же как и для указанных выше моделей, можно реализовать математическую процедуру обращения. Однако сам метод обращения, построенный на итерациях, требует очень большого объема машинного времени. По нашему мнению, рациональнее предварительно оптимизировать решение обратной задачи, выделив при прямой ее постановке ситуации, для которых возможно восстановление того или иного параметра модели. Подобные ситуации можно определить на основе графиков и таблиц главы 3, а также обратившись к рис. 5.1. Хотя изложенный в настоящей главе подход реализован на основе прямой задачи, по сути он направлен на решение тех же задач, для которых применялся метод обращения, в том числе: нахождение b_λ , высокочувствительных к искомому параметру и низкочувствительных к другим, или b_λ при их сильной (равной) зависимости от нескольких параметров, формулировка требований к априорной информации, необходимой для восстановления искомого параметра.

5.1. Восстановление отдельных параметров растительного покрова

Рассмотренные в главе 3 результаты численных экспериментов позволили выявить характер и масштабы возможных изменений b_λ под влиянием входных параметров модели. Очевидно, что на-

¹ См. Remote Sens. Envir., 1983, v. 13; 1984, v. 14—16; Int. J. Remote Sens., 1985, v. 6.

личие многопараметрических зависимостей затрудняет однозначную идентификацию любого из параметров. С этим обстоятельством сталкивается каждый интерпретатор при анализе аэрокосмической информации. Одним из способов исключения неоднозначности решения задач распознавания является широко используемый в настоящее время метод комбинирования яркостных характеристик в разных спектральных каналах. Однако этот метод не дает универсального решения, так как поведение самих «вегетационных индексов» (или комплексных спектральных индексов P_i) зависит от специфических особенностей исследуемых РП и условий проведения измерений. На наш взгляд, аналитик-интерпретатор должен квалифицированно представлять причинно-следственные связи процесса формирования спектрального образа растительных объектов. Понимание этих связей есть логическая основа интерпретации b_λ и их комбинаций, в том числе и при расшифровке результатов кластер-анализа видеоизображений.

5.1.1. Оценка возможности определения параметров растительности на основе СКЯ

На рис. 5.1 показано изменение b_λ как функции двух переменных L и ρ при фиксированных значениях ρ_s . Из приведенных схем

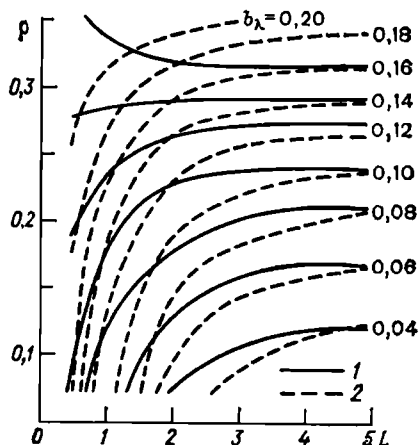


Рис. 5.1. Изолинии b_λ РП для различных L и ρ . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_\odot = 65^\circ$, сферическая ориентация, $\tau/\rho = 1$.

1) $\rho_s = 0,15$, 2) $\rho_s = 0,25$.

видно, что в случае $L < 3 \div 4$ (или $B < 60 \div 80 \%$) по b_λ для надира практически невозможно восстановить либо L , либо ρ (цвет растительности). Если априори известно, что РП имеет плотный полог, то на основе b_λ можно найти значения ρ . В общем случае, когда ничего неизвестно о состоянии объекта, по яркостным характеристикам нереально определить значение какого-либо из двух искомых параметров, причем количество вариантов с неразличимыми состояниями РП увеличивается на светлых почвах.

Так как взаимокомпенсирующие изменения L и ρ могут привести к образованию равных значений b_λ , очевидной является необходимость в априорной информации об исследуемых РП. Это может быть информация о структуре землепользования, фенологическом календаре, сопровождающаяся данными аэровизуальных и наземных наблюдений на тестовых территориях. Если такой информации нет (т. е. распознавание проводится «без обучения») или она не полная, то теоретические закономерности могут рассматриваться в качестве исходной предпосылки для анализа связей между спектральным образом объектов и их свойствами. С этой целью на основе результатов численного моделирования мы систематизировали: а) возможные причины положительных и отрицательных отклонений b_λ ; б) тенденции в изменении входных параметров модели, обуславливающие отклонения b_λ разного знака; в) масштабы изменений входных параметров модели, определяющих заданный масштаб изменения значений b_λ .

Результаты систематизации сведены в табл. 5.1. Всего рассмотрено восемь исходных ситуаций для красной области видимого и БИК-диапазона, куда включены темные и светлые почвы в комбинациях с редким и сомкнутым РП. Были заданы 10, 30 и 50 %-ные положительные и отрицательные отклонения b_λ от тех значений b_λ , которые соответствуют указанным в таблице исходным ситуациям. На основе материалов главы 3 были выявлены возможные причины отклонений разного знака и оценено, на сколько должен измениться каждый из входных параметров модели, чтобы повлечь за собой 10, 30 и 50 %-ные отклонения b_λ при фиксированных значениях других входных параметров. При систематизации не учитывалось соотношение прямой и рассеянной радиации в облучающем потоке, так как в главе 3 было показано, что колебания D_λ/Q_λ от 0 до 0,8 (при прочих равных условиях) вызывают изменения b_λ не более чем на $\pm 10\%$.

Из приведенных в табл. 5.1 примеров можно сделать следующие выводы:

1. Красная область видимого диапазона. *Темные почвы.* Независимо от сомкнутости полога РП, значения b_λ особо реагируют на изменение ρ . В случае сомкнутого полога b_λ дополнительно чувствителен к изменению пространственной ориентации фитоэлементов. *Светлые почвы.* Значения b_λ высокочувствительны к колебаниям всех рассмотренных входных параметров.

2. БИК-диапазон. *Темные почвы.* Значения b_λ наиболее чувствительны к изменению структуры РП (L и θ_ϕ). Отклонения b_λ менее 30 % могут быть следствием колебаний всех рассмотренных входных параметров. *Светлые почвы.* Изменчивость b_λ в основном обусловлена варьированием ρ_λ и ориентации фитоэлементов.

Таким образом, данные табл. 5.1 характеризуют, с одной стороны, возможность идентификации искомого параметра, с другой — побочное влияние других параметров.

Таблица 5.1

Систематизация относительных изменений входных параметров модели, являющихся причиной заданных изменений СКЯ

(для всех вариантов исходных ситуаций ориентация фитоэлементов сферическая, $\theta_{\phi}=57,5^{\circ}$, $h_{\odot}=65^{\circ}$)

Фиксированное значение L	Заданное изменение Δb_{λ} %	Относительные изменения входных параметров ¹ , %				
		L	θ_{ϕ}°	ρ	ρ_s	$h_{\odot}^{\circ}$
I. Изменения входных параметров, которые приводят к увеличению b_{λ} по сравнению с b_{λ} для исходной ситуации						
А. Исходная ситуация: 670 нм, $\rho=\tau=0,075$, темные почвы ($\rho_s=0,06$)						
1	10	-30	-43; +26	+20	+20	*
	30	-80	*	+45	+54	*
	50	*	*	+65	+62	*
3	10	-10	-14	+10	+40	-31
	30	-60	-47	+25	+80	-77
	50	-87	*	+45	*	*
Б. Исходная ситуация: 670 нм, $\rho=\tau=0,075$, светлые почвы ($\rho_s=0,15$)						
1	10	-20	+17	+25	+25	*
	30	-50	+25	+55	+35	*
	50	-90	*	+70	*	*
3	10	-10	-30; +12	+10	+20	-45
	30	-33	-80; +25	+30	*	*
	50	-57	*	+50	*	*
В. Исходная ситуация: 750—800 нм, $\rho=\tau=0,45$, темные почвы ($\rho_s=0,09$)						
1	10	+17	-9	*	+22	-28
	30	+54	-35	*	+51	-62
	50	+80	-95	*	*	*
3	10	+25	-18	+10	+65	-25
	30	+40	-60	*	*	*
	50	+40	*	*	*	*
Г. Исходная ситуация: 750—800 нм, $\rho=\tau=0,45$, светлые почвы ($\rho_s=0,25$)						
1	10	+47	-25	*	+14	-45
	30	+80	-95	*	*	*
	50	+80	*	*	*	*
3	10	+40	-20	+8	*	-45
	30	+40	-95	*	*	*

Фиксированное значение L	Заданное изменение Δb_λ %	Относительные изменения входных параметров ¹ , %				
		L	θ_ϕ^c	ρ	ρ_s	$h_\odot^c$

II. Изменения входных параметров, которые приводят к уменьшению b_λ по сравнению с b_λ для исходной ситуации

А. Исходная ситуация: 670 нм, $\rho=\tau=0,075$, темные почвы ($\rho_s=0,06$)

1	10	+38	*	-20	-15	*
	30	+64	*	-45	*	*
3	10	+40	5-15	-10	*	*
	30	*	+17	-25	*	*
	50	*	*	-45	*	*

Б. Исходная ситуация: 670 нм, $\rho=\tau=0,075$, светлые почвы ($\rho_s=0,15$)

1	10	+17	-18	-25	-13	-53
	30	+38	*	-55	-37	*
	50	+58	*	*	-60	*
3	10	+15	*	-15	-50	*
	30	+50	*	-30	*	*
	50	*	*	-50	*	*

В. Исходная ситуация: 750—800 нм, $\rho=\tau=0,45$, темные почвы ($\rho_s=0,09$)

1	10	-20	+6	-8	-40	*
	30	-60	+17	-27	-67	*
	50	-90	+26	*	*	*
4	10	-20	+5	-4	*	*
	30	-50	+15	-14	*	*
	50	-77	+26	*	*	*

Г. Исходная ситуация: 750—800 нм, $\rho=\tau=0,45$, светлые почвы ($\rho_s=0,25$)

1	10	-90	+14	-18	-22	*
	30	*	*	*	-60	*
3	10	-27	+10	-8	-64	*
	30	-100	+20	-20	*	*

¹ Изменения рассчитаны как разность между значениями входных параметров, соответствующих исходной ситуации, и их значениями, которые вызывают 10, 30 и 50 %-ные отклонения b_λ , при нормировке разности по максимальному из двух сравниваемых значений параметров.

Примечание. Плюс (+) означает увеличение параметра, минус (—) — уменьшение, звездочка (*) — ситуация по разным причинам нереальная.

5.1.2. Рекомендации по определению параметров растительности на основе СКЯ

Материалы табл. 5.1 целесообразно учитывать при разработке методик проведения и анализа дистанционных измерений в интересах агрометеорологии и сельскохозяйственного производства.

На их основе для условий визирования в надир можно рекомендовать:

1. Измерения в красной области видимого диапазона: в случае темных почв — для определения цвета растительности при контроле за яркостью почвы; в случае светлых почв — для индикации любого из рассмотренных параметров при наличии сопутствующей информации об изменении других.

2. Измерения в БИК-диапазоне: в случае темных почв — для определения плотности полога РП; в случае светлых почв — для диагностики изменений ориентации фитоэлементов (например, полегания) при контроле за яркостью почвы.

Следует отметить, что в ряде методических разработок для индикации фитомассы и/или плотности полога РП рекомендуется использовать диапазон, в котором спектральный контраст между почвой и растительностью максимален. В частности, для РП при доминировании зеленых фитоэлементов в сочетании со светлыми почвами наибольший контраст возможен в красной области. Но, как видно из табл. 5.1, в этой области успешная индикация L реальна только при наличии сопутствующей информации об изменчивости цвета растительности, яркости почвы и ориентации на момент дистанционного зондирования.

На рис. 5.2 и 5.3 приведены номограммы, которые можно рекомендовать для использования в практической работе интерпретатора с целью экспертных оценок плотности полога, цвета и ориентации фитоэлементов. При построении этих номограмм для случая непрозрачных фитоэлементов (стебли, колосья) применялась формула (3.12), для прозрачных фитоэлементов использовался метод интерполяции.

Плотность полога РП. Идентификация L и/или B (а также связанных с ними N и запасов фитомассы — см. разд. 2.3, а также табл. 5.2) является одной из распространенных задач аэрокосмических исследований.

Номограмма на рис. 5.2 позволяет найти для различных природных ситуаций, заданных комбинациями ρ и ρ_v , максимально возможные изменения b_λ , обусловленные изменением L — $b_\lambda(L)_{\max}$. При этом $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$ определяется видом функции $b_\lambda(L)$ и значениями L , при которых эта функция выходит на плато. Номограмма на рис. 5.3 дополняет предыдущую. С ее помощью на основе полученных $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$ можно выявить для заданной точности измерений СКЯ интервал значений L , который приводит к приращению (снижению) b_λ , или, наоборот, по относительным изменениям b_λ восстановить ΔL .

В случае горизонтальной ориентации фитоэлементов достаточно использовать первую номограмму, так как при $L \geq 2$

Таблица 5.2

Зависимость между относительной поверхностью фитоэлементов L и густотой стеблестоя N (экз/м²) для посевов озимой пшеницы Безостая 1

Фенофаза	Состояние посева	r	η	Вид зависимости $L=f(N)$
Кушение Выход в трубку Колошение—цветение	Плохое—хорошее	0,93	0,58	$-0,552 + 0,00269N$
	Плохое—хорошее	0,98		$-0,0674 + 0,00141N$
	Удовлетворительное—отличное	0,58		$-12,4 + 2,55 \ln N$
Молочно-восковая спелость	Хорошее	0,67	0,50	$-12,1 + 3,75 \ln N$
	Удовлетворительное—хорошее	0,63	0,44	$-0,298 + 0,00196N$ $-5,65 + 1,03 \ln N$

920 Примечание. r и η — при уровне значимости 0,05; L — для $N=100+760$ экз/м² при кушении, $120+760$ экз/м² на фенофазе выход в трубку, $200+800$ экз/м² при колошении—цветении, $330+800$ экз/м² при молочно-восковой спелости; зависимость между L и N на фенофазах колошение—цветение и молочно-восковая спелость при объединении полей с состояниями от плохого до отличного, а также только с плохим и очень плохим состояниями практически отсутствует.

функция $b_\lambda(L)$ выходит на плато и, соответственно, значения $\Delta b_\lambda(L)$ инвариантны к дальнейшему увеличению L . Это подтверждается результатами обобщения материалов расчета b_λ для горизонтальной ориентации при различных комбинациях ρ (от 0 до 0,35) и τ (от 0 до 0,5), на основе которых получены следующие соотношения между приращениями b_λ при изменении L от 0 до 1 и от 0 до 5:

$$\Delta b_\lambda(L=0 \div 1) = 0,92 \Delta b_\lambda(L)_{\max} \text{ при } \tau/\rho = 0; \quad (5.1)$$

$$\Delta b_\lambda(L=0 \div 1) = 0,84 \Delta b_\lambda(L)_{\max} \text{ при } \tau/\rho = 1, \quad (5.2)$$

$$\text{где } \Delta b_\lambda(L)_{\max} = \Delta b_\lambda(L=0 \div 5).$$

Из приведенных соотношений видно, что изменение L от 1 до 5 при горизонтальной ориентации влечет за собой изменение b_λ только на 8—16 % от общего приращения Δb_λ в интервале $L=0 \div 5$.

В случае сферической ориентации необходимо использовать две номограммы, ибо функция $b_\lambda(L)$ выходит на плато при самых разнообразных значениях L в зависимости от сочетания ρ и τ . Покажем на примерах, как можно пользоваться номограммами.

Допустим, для посева пшеницы, имеющего ориентацию фитоэлементов, близкую к сферической, надо определить, какие изменения b_λ могут быть вызваны колебанием L во время колошения в физико-географических районах со светлыми и темными почвами.

Из табл. 2.8 находим для зеленой области $\bar{\rho} = 0,16$, для красной 0,086, для БИК-диапазона 0,458. Аналогично из табл. 2.11

Рис. 5.2. Номограмма для определения максимально возможных изменений b_λ РП при увеличении L от 0 до $5 b_\lambda(L)_{\max}$. Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 > 55^\circ$.

Ориентация фитоэлементов: горизонтальная (а), сферическая (б); 1) $\tau/\rho=0$, 2) $\tau/\rho=-1$; цифры у кривых — $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$ (%).

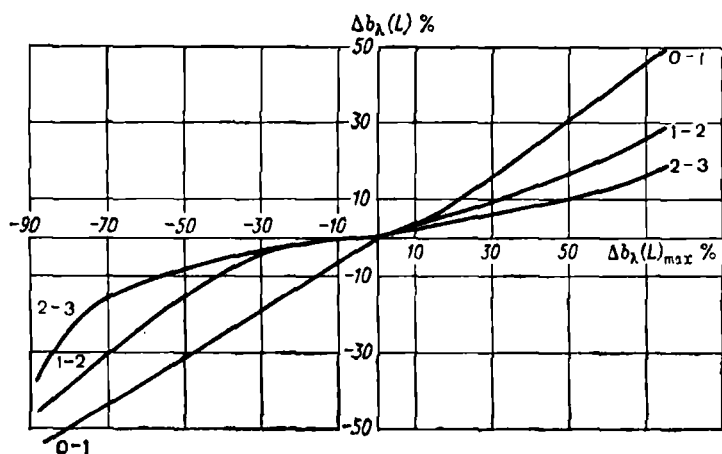
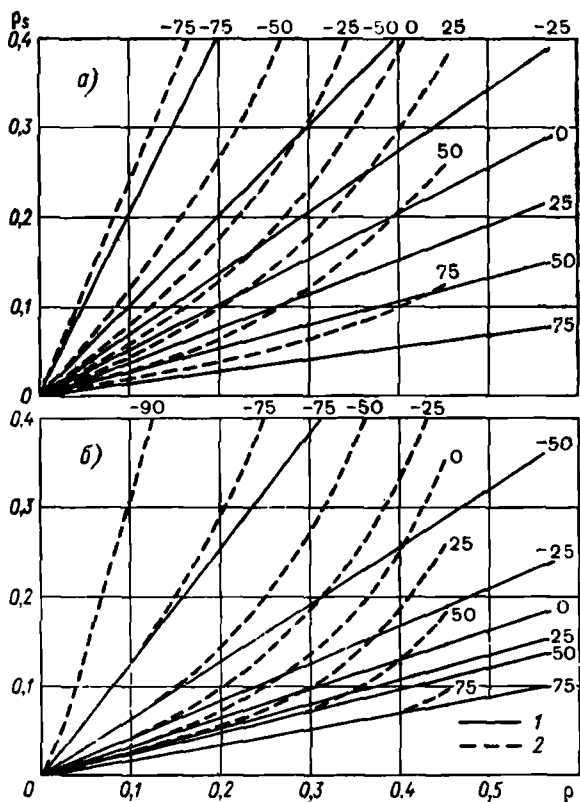


Рис. 5.3. Номограмма для определения $\Delta b_\lambda(L)$ РП в различных интервалах L . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, $h_0 > 55^\circ$, сферическая ориентация, $\tau/\rho=1$.

Цифры у кривых — L .

для светлых почв находим для видимого диапазона $\bar{\rho}_s = 0,16$, для БИК-диапазона 0,25 и соответственно для темных почв 0,06 и 0,10. По заданным значениям $\bar{\rho}$ и $\bar{\rho}_s$ с помощью первой номограммы определяем максимально возможные относительные изменения b_λ для интервала $L = 0 \div 5$ (или для B от 0 до 96). Эти относительные изменения b_λ будут равны:

$\bar{\rho}_s$ $\Delta b_\lambda(L)_{\max} \%$	$\bar{\rho}$					
	0,160		0,086		0,458	
	0,06 —10	0,16 —65	0,06 —50	0,16 —85	0,10 +75	0,25 +25

Затем, задаваясь найденными значениями $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$, переходим к второй номограмме и определяем относительные изменения Δb_λ в различных интервалах L . Соответственно оценки $\Delta b_\lambda (\%)$ будут равны:

$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}_s$	L		
		0—1	1—2	2—3
0,160	0,06	—6	0	0
	0,16	—40	—25	—13
0,086	0,06	—31	—14	—8
	0,16	—53	—38	—30
0,458	0,10	49	30	18
	0,25	13	8	5

(напомним, что сумма Δb_λ для отдельных интервалов L не равна $\Delta b_\lambda(L)_{\max}$, так как относительные изменения Δb_λ нормировались по максимальному значению b_λ в каждом интервале L).

На основе полученных результатов можно экспертно оценить возможность распознавания плотности полога посева пшеницы в случае зеленого цвета растений для разных спектральных диапазонов с учетом почвенного фона. Понятно, что если измерения СКЯ ведутся с точностью $\pm 5 \%$, то все изменения L , сопровождающиеся $\Delta b_\lambda < 5 \%$, заведомо не будут распознаваться. В рассмотренном примере измерения СКЯ в зеленой области спектра в случае темных почв вообще не должны быть информативны при определении плотности полога. На этих же почвах по СКЯ для красной области можно определить изменения L до $L \leq 2$ (или B до 50 %), на светлых почвах — во всем интервале L до 5. Наоборот, в БИК-диапазоне при сочетании темных почв и зеленой пшеницы можно индифицировать изменения L до 3—4 и B до 60—70 %, а при сочетании светлых почв и зеленой пшеницы — изменения L до 1,5 и B до 40—50 %. При этом дальнейшее смыкание полога

РП не вызовет каких-либо изменений отражения, которые можно было бы уловить, измеряя СКЯ с точностью $\pm 5\%$.

В целом возможность восстановления L ухудшается по мере увеличения плотности полога. Чем реже полог РП, тем в большей степени проявляется чувствительность b_λ к L . Но при отсутствии данных о яркости почвы существенно возрастает неопределенность оценки L и/или B .

Цвет растительности. Оценки цвета РП представляют интерес при определении созревания посевов, а также при диагностике аномальных явлений, сопровождающихся изменением ρ . Для нахождения относительных изменений Δb_λ , обусловленных колебаниями ρ в разных спектральных диапазонах и/или в одном диапазоне, но при различном состоянии отдельных фитоэлементов (см. разд. 2.1), можно пользоваться номограммами, приведенными на рис. 3.2 и 3.5. Так как значения ρ прямо связаны с цветовыми характеристиками фитоэлементов [73], то изменения $\Delta b_\lambda(\rho)$, показанные на рис. 3.2 и 3.5, можно интерпретировать и как возможный отклик b_λ на изменения цвета растительности. Пользоваться этими номограммами очень просто. Но для того чтобы с их помощью получить экспертные оценки Δb_λ , нужно располагать априорной информацией о характерных для данного ценоза типе ориентации, почвенном фоне и значениях $\bar{\rho}$ для видов (сортов), формирующих ценоз. На завершающих фенофазах следует работать с номограммой для непрозрачных фитоэлементов, на фенофазах, в течение которых в суммарной фитоповерхности доминирует $L_{\text{л}}$, — номограммой для прозрачных фитоэлементов.

Приведем несколько примеров использования номограмм. Допустим посев поражен заболеванием. Возможна ли диагностика фитопатологического состояния посева по СКЯ для видимого диапазона в случае, если заболевание приводит к изменениям оптических свойств отдельных фитоэлементов?

Из табл. 2.3 находим, что при поражении листьев райграса бурой ржавчиной менее 20 % $\bar{\rho}$ для 550 нм изменяется на 28 % и для 670 нм на 43 %, а при поражении более 50 % — соответственно на 16 и 51 %. Далее задаемся сферическим типом ориентации (см. разд. 2.4.3.2) и двумя вариантами по $\bar{\rho}$. Откладывая указанные выше $\Delta\rho$ по горизонтальной оси графика на рис. 3.5, находим следующие значения Δb_λ (%) для разных L :

		$\Delta\rho$ %							
		28		43		16		51	
		0,06	0,25	0,06	0,25	0,06	0,25	0,06	0,25
Δb_λ %	$L = 1$	15	8	24	16	6	3	32	19
	$L = 3$	30	24	48	42	18	14	55	48
	$L = 5$	33	33	52	52	19	19	57	57

А так как ρ в видимой области при поражении увеличивается, то и относительные изменения b_λ также будут положительными. На основе приведенных выше Δb_λ можно сделать заключение, что в случае зеленой растительности и поражении менее 20 % по СКЯ для зеленой и красной областей видимого диапазона реальна диагностика поражения бурой ржавчиной для РП с разной плотностью полога как на темных, так и светлых почвах (исключение составляет сочетание светлых почв и редкого РП для 550 нм). Хорошая возможность индикации сильного поражения сохраняется в красной области спектра, а в зеленой области из-за незначительных различий в ρ здоровых и больных листьев информативность СКЯ снижается.

По аналогичной схеме были оценены Δb_λ при поражении бурой ржавчиной желтых листьев пшеницы (см. разд. 2.1.4.1) для светлых почв:

Поражение	L		
	1	3	5
<20 %	—13	—24	—30
>50 %	—35	—60	—64

Эти оценки Δb_λ справедливы для 550, 670 и 750—800 нм, так как $\Delta\rho$ желтых листьев несущественно меняется в зависимости от λ . Из данных Δb_λ следует, что индикация пораженных бурой ржавчиной посевов возможна и на поздних фенофазах (кроме очень редких и слабо пораженных РП) даже в случае неблагоприятного по спектральным контрастам сочетания желтой растительности и светлых почв.

Так же используя рис. 3.5 а, можно экспертно оценить потенциальную распознаваемость различных сортов, принимая, что сортовые особенности проявляются только через изменение оптических свойств отдельных фитоэлементов. Полученные из табл. 2.8 $\Delta\rho$ для зеленых листьев пшеницы дают следующие оценки Δb_λ для посевов этой культуры:

$\Delta\rho$ %	550 нм	670 нм	750—800 нм
	27	56	35
Δb_λ % $\left\{ \begin{array}{l} L=1 \\ L=3 \\ L=5 \end{array} \right.$	14	38	20
	29	60	38
	31	64	40

Значения Δb_λ приведены для темных почв (ρ , см. выше в примерах), как наиболее соответствующих условиям произрастания

в южных степных районах. Из данных Δb_λ следует, что сортовые особенности при сочетании зеленой пшеницы и темных почв в большей степени проявляются в красной области видимого диапазона. Эти же оценки можно интерпретировать для темных почв при распознавании зеленых посевов, выращенных на разных фонах почвенного плодородия (см. разд. 2.1.4.2).

Подобным образом просто выявить потенциальные различия в b_λ посевов при полегании или в дни с ветреной погодой за счет разницы в ρ адаксиальной и абаксиальной сторон листьев (см. разд. 2.1.3.1).

Если требуется экспертная оценка возможности идентификации плотности полога посевов разных сортов или культур, целесообразно пользоваться номограммами на рис. 5.2 и 5.3. Для иллюстрации рассмотрим вариант темных почв и зеленой растительности. Сорта зададим максимальными и минимальными значениями ρ для пшеницы из табл. 2.8. По ρ с помощью рис. 5.2 найдем максимально возможные изменения $b_\lambda - \Delta b_\lambda(L)_{\max}$, а на основе последних с помощью рис. 5.3 — Δb_λ для различных интервалов L . При такой последовательности операций находим следующие оценки:

		ρ_s					
		0,06		0,06		0,10	
		0,138	0,186	0,052	0,120	0,368	0,564
ρ							
$\Delta b_\lambda (L)_{\max} \%$		—20	5	—75	—25	51	75
$\Delta b_\lambda \%$	$\left\{ \begin{array}{l} L=0+1 \\ L=1+2 \\ L=2+3 \end{array} \right.$	—12	2	—46	—16	32	49
		—2	2	—33	—2	16	30
		—2	2	—18	—2	11	18

Из сравнения этих данных с приведенными выше следует также, что различия в b_λ , связанные с сортовыми особенностями (и/или с условиями произрастания), для видимого диапазона могут превышать Δb_λ , вызванные изменением L в пределах одного сорта. Это подтверждает известный из практики результат о большей информативности БИК-диапазона для идентификации плотности полога посева при отсутствии данных о видовом составе РП или условиях произрастания.

Таким образом, номограммы на рис. 3.2 и 3.5 позволяют дать экспертные заключения о возможности решения обратных задач для ситуаций, когда изменения яркости РП могут быть вызваны изменениями отражательных свойств отдельных фитоэлементов. Наиболее благоприятными предпосылками для решения этих задач являются: высокая сомкнутость полога РП или наличие темного почвенного фона, а также малые h_0 и/или наклонные углы визирования.

Пространственная ориентация фитоэлементов. Восстановление этого параметра структуры РП обычно не ставится как самостоятельная задача аэрокосмических исследований. В то же время в разд. 3.2—3.7 была убедительно показана высокая чувствительность b_λ к изменению ориентации. В отдельных экспериментальных работах (см. например, D. Lord, R. Desjardins, P. Dube, 1985) приводятся данные об изменении b_λ при ветре до 40—60 %. Высокочастотные колебания ориентации также могут быть причиной изменения b_λ посевов культур с выраженным гелиотропизмом.

Представленные на рис. 3.11 номограммы позволяют определить соотношения между отклонениями θ_ϕ от $\bar{\theta}_\phi = 57,5^\circ$ (т. е. от сферической ориентации) и относительными изменениями b_λ — $\Delta b_\lambda(\bar{\theta}_\phi)$. Эти же номограммы являются основой для выявления колебаний θ_ϕ , допустимых при аппроксимации ориентации фитоэлементов сферическим типом для заданной точности измерений или расчетов b_λ . Как видно из рис. 3.11, для 5 %-ной чувствительности b_λ при отклонениях ориентации в сторону горизонтальности наибольшая точность (до 2—5°) в измерениях $\bar{\theta}_\phi$ должна соблюдаться как в плотных, так и в редких РП. В первом случае изменение b_λ определяется соотношением между освещенными и затененными фитоэлементами, во втором — между освещенными и затененными участками почвы и растительности. Слабее выражена чувствительность b_λ в красной области при сочетании темных почв и среднесомкнутых РП, а также в зеленой и красной областях при сочетании светлых почв и среднесомкнутых РП. В БИК-диапазоне сохраняется высокая чувствительность к малым изменениям $\bar{\theta}_\phi$ для всех рассмотренных вариантов РП.

Если задаться более грубой оценкой b_λ (10 %), то точность определения $\bar{\theta}_\phi$ при увеличении горизонтальности фитоэлементов для различных РП и спектральных диапазонов должна составлять 5—8°. Сложный характер функции $\Delta b_\lambda(\bar{\theta}_\phi)$ (см. разд. 3.5.2.3) обуславливает повышение чувствительности b_λ к $\bar{\theta}_\phi$, когда ориентация переходит от сферической к более вертикальной. Соответственно, при оценках b_λ с точностью 10 % $\bar{\theta}_\phi$ надо измерять с погрешностью не более 3—5°.

Таким образом, даже незначительные изменения $\bar{\theta}_\phi$ при равенстве всех прочих параметров могут вызвать разброс результатов измерений, превышающий распространенную ± 5 %-ную точность спектрометрирования. Так как обычно ориентация не дается в фитометрических описаниях объектов, то ошибки в интерпретации яркостных характеристик из-за неучета этого параметра вполне реальны. Для того чтобы минимизировать подобные ошибки, следует составить каталоги характеристик пространственной ориентации или предусмотреть ее измерения при каждом описании конкретных РП. С другой стороны, на основе всесторонних исследований можно подобрать комбинации b_λ , наименее чувствительные к изменению ориентации, но высокочувствительные к изменениям других искомых параметров РП.

При решении отдельных задач распознавания и идентификации чувствительность b_λ к изменению ориентации может быть использована целенаправленно. Так, например, увеличение отклика b_λ на θ_ϕ по мере смыкания полога (см. разд. 3.5) является благоприятной предпосылкой для индикации полегания. В этом случае каталоги не нужны, ибо изменение θ_ϕ при полегании зависит от слишком большого числа переменных факторов, а оптимальным путем является выбор комбинаций b_λ , наиболее чувствительных к ориентации.

*

* *

Подводя итог рассмотренным в разд. 5.1.1 и 5.1.2 материалам и учитывая основные результаты главы 3, подчеркнем, что спектрометрирование в надир может использоваться при решении следующих задач:

1) при определении плотности полога РП в случае больших спектральных контрастов между фитоэлементами и почвой и больших $h_\odot$;

2) при оценке пространственно-временной изменчивости цвета растительности (в том числе фитопатологических явлений, сопровождающихся изменением ρ и τ) при значительной сомкнутости полога или в случае темных почв, а также при малых $h_\odot$ и/или наклонных углах визирования;

3) при определении ориентации фитоэлементов в РП высокой плотности; в случае отклонений ориентации в сторону горизонтальности — при малых $h_\odot$, в сторону вертикальности — по измерениям в красной области спектра при больших $h_\odot$ и в БИК-диапазоне при малых $h_\odot$.

Эти основные положения, полученные в результате анализа теоретических зависимостей, хорошо согласуются с выводами экспериментальных исследований (см., например, [32, 44]). С одной стороны, это является еще одним доказательством адекватности модели Гоудриана, с другой — подтверждением целесообразности применения теоретического подхода в дистанционном зондировании. Для успешного внедрения теоретических разработок в практику аэрокосмических исследований необходимы прежде всего каталоги оптических свойств отдельных фитоэлементов, так как на основе этих данных можно дать экспертные заключения о рациональности решения методами оптического зондирования различных обратных задач для разных вариантов РП с учетом условий произрастания и состояния растительности.

5.1.3. Рекомендации по определению параметров РП на основе комбинаций СКЯ¹

В табл. 5.3 сгруппированы P_i , которые, исходя из анализа теоретических зависимостей (разд. 3.9), можно рекомендовать для

¹ Раздел подготовлен совместно с Е. В. Фадеевой.

Рекомендации к выбору комбинаций СКЯ в зеленой, красной областях видимого диапазона и в БИК-диапазоне (по данным измерений в надр и $h_0 > 45^\circ$) для решения некоторых задач дистанционных исследований

Решаемая задача	Индикаторный входной параметр модели	Априорная информация о растительности	P_i		Сведения о зависимостях P_i от параметров, помимо индицируемых	Дополнительные рекомендации по выбору P_i со средней чувствительностью к индицируемому параметру
			темные	светлые		
Определение плотности полога, запасов фитомассы в течение фаз вегетативного роста	L и/или B	Зеленая растительность, сферическая ориентация	P_7 , P_1 , P_3 , P_8 , P_{10}	P_6 , P_7 , P_1	1) P_7 и P_8 также зависят от ρ и θ_ϕ ; 2) P_1 зависит от ρ ; 3) P_{10} зависит от θ_ϕ ; 4) P_3 сильно зависит от θ_ϕ	Темные почвы: P_6, P_8 . Светлые почвы: P_8, P_{10} , P_6, P_3
			P_7 , P_8 , P_{10} , P_4	P_{10} , P_8 , P_1 , P_6	1) P_7, P_{10} и P_8 — см. выше; 2) P_4 зависит от θ_ϕ ;	Темные почвы: P_3, P_6, P_8 . Светлые почвы: P_3, P_7, P_4
Определение плотности полога, запасов фитомассы в течение фаз вегетативного роста	L и/или B	Желтая растительность, сферическая ориентация	P_7 , P_8 , P_{10} , P_4	P_{10} , P_8 , P_1 , P_6	1) P_7, P_{10} и P_8 — см. выше; 2) P_4 зависит от θ_ϕ ;	Темные почвы: P_3, P_6, P_8 . Светлые почвы: P_3, P_7, P_4

Определение цвета растительности (оценка степени созревания, индикация засухи, отдельных фитопатологических явлений и т. п.)	ρ	Сомкнутый полог, сферическая ориентация	P_3, P_7, P_1	P_7, P_6, P_1	1) P_1, P_5, P_7 — см. выше	3) P_3 и P_6 среднечувствительны к ρ , и малочувствительны к ρ
Определение изменений в ориентации фитозеленых (индикация пометания, в отдельных случаях — начала засухи, фитопатологических аномалий и т. п.)	θ_{ϕ}	Зеленая растительность, несомкнутый полог Зеленая растительность, сомкнутый полог	P_7, P_3, P_{10} P_4, P_{10}, P_1	P_5, P_7 P_1, P_4	P_3, P_6, P_7, P_{10} — см. выше P_1, P_4 и P_{10} — см. выше	Темные и светлые почвы: P_3, P_4 (P_3 и P_4 — см. выше, P_2 малочувствительна к L и θ_{ϕ}) Темные почвы: P_1, P_4, P_6 Светлые почвы: P_1, P_3 Темные почвы: P_3, P_5, P_7 Светлые почвы: P_3, P_7

Примечание. P_i даны в порядке снижения их чувствительности к индицируемому параметру.

решения отдельных обратных задач с использованием СКЯ, измеренных в надир при $h_0 > 45^\circ$. При составлении этой таблицы учитывалось, располагает ли интерпретатор априорной информацией о состоянии объекта. В частности, из-за высокой чувствительности P_7 и P_5 к изменениям ρ и θ_ϕ для восстановления какой-либо одной характеристики РП требуется сопутствующая информация о других. В меньшей степени это ограничение (при решении перечисленных в табл. 5.3 задач) действует при использовании P_1 , P_2 , P_3 и P_4 , хотя в целом чувствительность этих комбинаций b_λ ниже, чем P_7 и P_5 (см. разд. 3.9).

Данные табл. 5.3 показывают также, что ни одна из рассмотренных комбинаций b_λ не может быть специализирована для решения задач однозначной идентификации. В конкретных условиях произрастания (с учетом яркости почвы, видового состава РП и фенофазы) надо подбирать оптимальные P_i , придерживаясь результатов теоретического анализа, изложенных в разд. 3.9 и в [19, 59].

Добываясь максимальной чувствительности яркостных характеристик к искомым параметрам путем подбора оптимальных спектральных комбинаций, следует учитывать, что сжатие спектральной кривой не всегда приводит к ожидаемому повышению чувствительности относительно той, которая возможна в одном спектральном канале. Это положение иллюстрируют оценки значений $\Delta P_i / \Delta b_\lambda$, приведенные в табл. 5.4 и 5.5. Для индикации цвета сравнение проведено с Δb_λ для 670 нм, плотности полога — с Δb_λ в БИК-диапазоне. Из табл. 5.4, в частности, следует, что традиционное отношение b_K / b_3 (P_2) менее чувствительно к изменению цвета, чем другие P_i и собственно Δb_λ в видимом диапазоне. Объясняется это взаимокompенсирующими изменениями b_λ в зеленой и красной областях, происходящими при пожелтении фитоэлементов. В то же время чувствительное к L отношение $b_{\text{БИК}} / b_K$ (P_1) одновременно реагирует на колебания ρ (табл. 5.4), что мешает его использованию только для индикации L .

Другая традиционная комбинация — ND в целом менее чувствительна к цвету и ориентации по сравнению с P_1 . В случае темных почв P_8 слабее реагирует, чем b_λ в БИК-диапазоне, на изменение плотности полога при любом цвете растительности. По мере увеличения яркости почвы преимущества P_8 перед b_{800} при индикации L возрастают. Для определения L при любых сочетаниях ρ и ρ_s целесообразно использовать P_{10} с учетом $\Delta P_{10}(\theta_\phi)$. Из табл. 5.5 также видно, что в случае темных почв для восстановления L предпочтительнее использовать P_7 (при сопутствующей информации о цвете и ориентации — см. табл. 5.3 и 5.4). В целом приведенные в табл. 5.4 и 5.5 оценки могут служить дополнительным критерием при выборе оптимальных спектральных комбинаций, если измерения СКЯ выполнены с малых высотных уровней либо после проведения процедуры атмосферной коррекции.

Таблица 5.4

Сравнение чувствительности P_i и СКЯ в красной области спектра к изменению цвета фитоэлементов от зеленого до желтого
Надир, $h_{\odot} = 65^\circ$, $S_{\lambda} \gg D_{\lambda}$, сферическая ориентация, $\tau/\rho = 1$

Показатель	Почва	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_{10}	PVI
$ \Delta P_i(\rho)_{L=5}/\Delta P_2(\rho)_{L=5} $	Темная	1,6	1,0	1,0	1,0	2,3	0,7	2,3	0,9	0,6	0,03
	Средняя	1,5	1,0	1,0	1,0	2,7	0,6	2,7	0,9	0,4	0,4
	Светлая	1,6	1,0	1,0	1,0	2,6	0,6	2,6	0,8	0,7	0,7
$ \Delta P_i(\rho)_{L=1}/\Delta P_2(\rho)_{L=1} $	Темная	2,1	1,0	1,0	1,0	4,4	1,3	4,4	1,7	1,2	0,3
	Средняя	1,7	1,0	1,0	1,0	5,1	0,9	5,1	1,5	1,4	1,4
	Светлая	3,3	1,0	1,0	1,0	5,5	2,4	5,5	3,5	3,5	3,5
$ \Delta P_i(\rho)_{L=5}/\Delta b_{\text{фто}}(\rho)_{L=5} $	Темная	1,0	0,6	0,6	0,6	1,5	0,4	1,5	0,6	0,4	0,02
	Средняя	1,0	0,6	0,6	0,6	1,8	0,4	1,7	0,6	0,3	0,3
	Светлая	1,0	0,6	0,6	0,6	1,6	0,4	1,6	0,5	0,4	0,4
$ \Delta P_i(\rho)_{L=1}/\Delta b_{\text{фто}}(\rho)_{L=1} $	Темная	1,0	0,5	0,5	0,5	2,2	0,6	2,1	0,8	0,6	0,2
	Средняя	1,0	0,6	0,6	0,6	3,1	0,6	3,1	1,0	0,9	0,9
	Светлая	1,0	0,3	0,3	0,3	1,8	0,8	1,8	1,1	1,1	1,1
$ \Delta P_i(\rho)_{L=5}/\Delta P_i(\rho)_{L=1} $	Темная	1,3	1,7	1,7	1,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,2
	Средняя	1,2	1,3	1,3	1,3	0,7	0,9	0,7	0,8	0,4	0,4
	Светлая	2,0	4,0	3,3	3,4	1,8	1,0	1,8	0,9	0,8	0,8

Примечание. $\Delta P_i(\rho)$ и $\Delta b_{\text{фто}}(\rho)$ рассчитаны как абсолютная разность значений P_i и $b_{\text{фто}}$ для зеленой и желтой растительности, нормированная к максимальному из сравниваемых значений P_i и $b_{\text{фто}}$.

Результаты сравнения чувствительности P_i и b_λ в БИК-диапазоне ($\Delta P_i/\Delta b_{800}$) к изменению плотности полого растительности в интервале $L=0,5\div 5$.

Надир, $h_0=65^\circ$, сферическая ориентация, $\tau/\rho=1$

Цвет листьев (фаза развития РП по [73])	ρ			ΔP _i /Δb ₈₀₀ ≥ 1									
	550 нм	670 нм	800 нм	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
А. Темные почвы (ρ _{550, 670} = 0,06, ρ ₈₀₀ = 0,09), Δb ₈₀₀ = 0,64													
1	0,10	0,06	0,45	1,3	—	1,2	—	1,2	—	1,4	—	—	1,2
2	0,15	0,10	0,45	1,2	—	1,2	—	1,1	—	1,4	—	—	1,2
3	0,17	0,15	0,45	—	—	—	1,0	1,6	—	1,6	—	—	1,1
4	0,17	0,17	0,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2
5	0,18	0,20	0,45	—	—	—	1,1	1,2	—	1,4	—	—	1,2
6	0,25	0,28	0,45	—	—	—	1,1	—	—	1,4	—	—	1,2
7	0,25	0,28	0,40	—	—	—	1,1	1,2	—	1,6	—	—	1,1
Б. Средние почвы (ρ ₅₅₀ = 0,13, ρ ₆₇₀ = 0,18, ρ ₈₀₀ = 0,19), Δb ₈₀₀ = 0,24													
1	0,10	0,06	0,45	3,3	1,1	1,8	—	2,3	2,2	2,7	1,9	—	2,0
2	0,15	0,10	0,45	3,3	2,1	2,5	—	5,8	2,1	5,4	2,9	—	2,7
3	0,17	0,15	0,45	2,9	1,4	2,0	1,4	10,2	2,0	8,8	2,9	—	2,8
4	0,17	0,17	0,45	2,7	—	1,7	—	—	2,0	—	2,8	—	2,8
5	0,18	0,20	0,45	2,4	—	1,4	—	2,1	2,1	1,5	2,8	—	2,8
6	0,25	0,28	0,45	1,6	—	1,3	—	—	1,5	1,7	2,8	—	2,9

5.2. Теоретические оценки возможности распознавания посевов сельскохозяйственных культур

В посеве как целостной системе интегрируется фотосинтетическая работа на разных уровнях организации живой материи — от клетки до ценоза в целом. Взаимосвязанно изменяются все параметры посева (плотность полога, цвет растительности, ориентация фитоэлементов и т. д.), которые в совокупности формируют спектральный образ РП. При составлении экспертных заключений о различимости посевов разных культур и разных состояний посевов одной культуры по b_λ для надира учитывались взаимосвязанные изменения характеристик РП в течение вегетации. Посевы и их состояния задавались комбинациями L , L_λ/L , $g^*(\theta_\phi)$, γ_λ , ρ и ρ_λ , изменчивость которых для природных РП была рассмотрена в главе. 2.

5.2.1. Возможные различия в яркостных характеристиках посевов разных культур

Распознавание площадей, занятых под различными культурами, на практике стремятся проводить в периоды с минимальным разнообразием культур и максимальными спектральными контрастами (СК) между сельскохозяйственными угодьями. Понятно, что для озимых такими периодами являются осень, когда прекращается вегетация, и весна, когда вегетация начинается. Но с октября по ноябрь и с марта по апрель облачность вносит свои поправки. Например, на территории юго-востока Украины (где большая часть площадей занята под озимыми) поздней осенью и ранней весной число часов солнечного сияния не превышает 30 % от максимально возможного в это время года. Так как во многих земледельческих районах страны наиболее благоприятные для оптического зондирования условия облачности складываются в течение весенне-летней вегетации, то методически важно выявить сроки, когда в этот период по спектральным характеристикам можно различать посевы разных культур.

Эти сроки мы попытались установить, используя теоретические оценки b_λ . Расчет b_λ был проведен на основе фитометрических данных, представленных на рис. 5.4. При построении графиков вегетационного хода для озимой пшеницы, ярового ячменя и среднеспелых сортов кукурузы использовались фенологический календарь для каждой из трех культур в степных районах Украины (по справочным данным) и результаты систематизированных фитометрических наблюдений в разные фазы (см. разд. 2.3). Вегетационный ход L для каждой культуры представлен значениями L , возможными для посевов хорошего и удовлетворительного состояния с учетом варьирования N [3, 20, 35 и др.]. Эти состояния были выбраны при расчете b_λ как наиболее вероятные в среднем многолетнем. Значения ρ и τ выбирались согласно данным табл. 2.8 и 2.10 и корректировались на основе данных о γ_λ ,

$\gamma_{\text{эл}}$ и $\beta_{\text{л}}$ в соответствии с материалами разд. 2.3. Значения ρ_s для конкретных почв Украины при расчетах $b_{\text{л}}$ задавались исходя из данных табл. 2.11—2.13. Дифференциальная функция распределения углов наклона фитоэлементов определялась на основе материалов разд. 2.4 и оценок $\beta_{\text{л}}$.

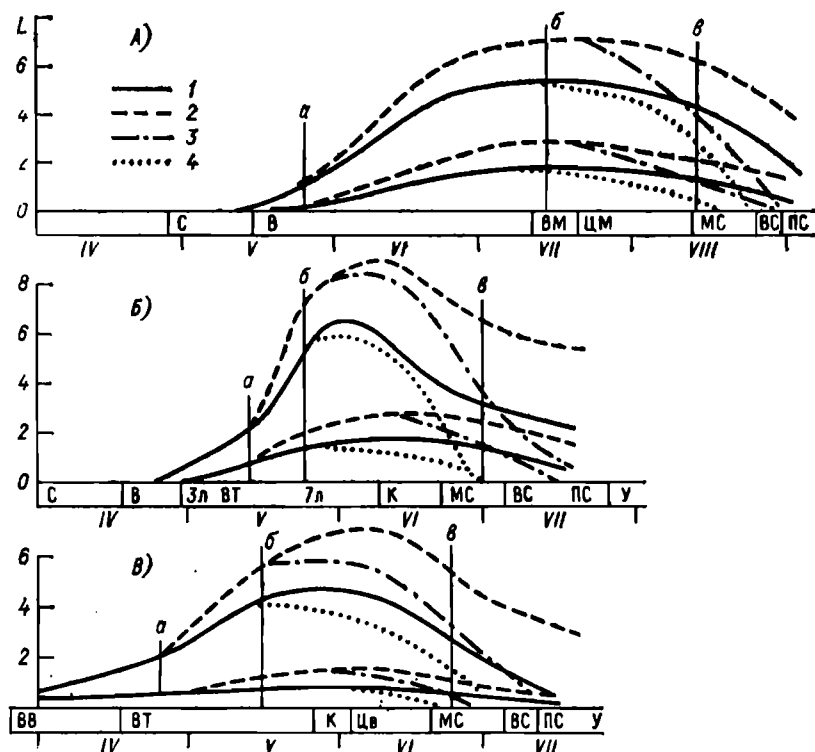


Рис. 5.4. Динамика относительной поверхности фитоэлементов в посевах различных культур в течение весенне-летней вегетации при средних многолетних сроках наступления фенофаз.

А — кукуруза, среднеспелые сорта, густота посева $N=30 \pm 80$ тыс. раст/га; Б — яровой ячмень, $N=3 \pm 8$ млн. раст/га; В — озимая пшеница, посевы удовлетворительного и хорошего состояний, $N=235 \pm 1400$ ст/м²; фенофазы: С — сев, В — всходы, 3л — 3-й лист, ВВ — возобновление вегетации, ВТ — выход в трубку, 7л — 7-й лист, К — колошение, Цв — цветение, ВМ — выметывание метелки, ЦМ — цветение метелки, МС, ВС, ПС — молочная, восковая и полная спелость (сроки наступления фенофаз даны по ст. Баштанка, УССР); а — появление стеблей, б — начало пожелтения, в — пожелтение более 50%; 1 — относительная поверхность листьев, 2 — суммарная относительная поверхность фитоэлементов, 3 — суммарная относительная поверхность зеленых фитоэлементов, 4 — относительная поверхность зеленых листьев.

Основные различия в структурных характеристиках культур, формирующиеся на протяжении весенне-летнего периода, определяются прежде всего фенологическим календарем, который связан с особенностями онтогенеза каждой культуры, а также со сроками сева. В среднем многолетнем в степных районах Украины максимальные различия в $\bar{L}$ складываются между посевами: а) яровых и озимых злаковых культур — в период от возоб-

новления вегетации озимых до конца первой декады мая; б) узколистных злаков и кукурузы — в период со второй половины мая до начала июня, а также после уборки озимых и яровых узколистных злаковых культур со второй половины июля. Контрастные по цвету растительности периоды на этой же территории отмечаются между посевами: а) яровых и озимых злаковых культур — во второй половине мая и в конце июня, причем сдвиг во времени начала пожелтения составляет примерно 10 дней, а полного пожелтения — 5—7 дней (рис. 5.4); б) узколистных злаков и кукурузы — в течение всего периода после всходов кукурузы до середины июля, т. е. когда посевы кукурузы сохраняют зеленый аспект.

В разд. 2.3 отмечалось, что динамика L в течение вегетации является устойчивым видовым (и сортовым) признаком. Поэтому коррекция значений L и γ_z на погодные условия конкретного года при отсутствии аномальных и стрессовых явлений заключается в сдвиге кривых на рис. 5.4 вдоль шкалы календарных дат.

Расчеты b_λ по модели Гюдрiana проводились при допущении пуассоновского размещения фитоэлементов в пространстве. Отсюда очевидно возможное несоответствие численных значений b_λ и измеренных СКЯ для посевов кукурузы с выраженной рядковой структурой, хотя и в этом случае (см. главу 4) можно ожидать совпадения тенденций изменения b_λ и СКЯ в ходе вегетации.

Расчетный спектральный «профиль» (изменения в течение вегетации) посевов разных культур в общих чертах повторяет вегетационный ход фитометрических параметров, что объясняется зависимостями b_λ от структурных параметров РП и ρ . Поэтому в табл. 5.6 приводятся уже значения минимальных СК между культурами, рассчитанные по кривым b_λ для полуденных часов при условии ясной погоды и визирования в надир. Согласно оценкам $СК_{min}$, в степных районах Украины оптимальные условия для разделения по b_λ посевов трех рассматриваемых культур формируются в следующие периоды; а) озимой пшеницы и ярового ячменя — до конца первой декады мая в зеленой и красной областях видимого диапазона; б) озимой пшеницы и среднеспелых сортов кукурузы — во второй половине мая в зеленой и красной областях видимого диапазона, а также в конце второй декады мая в БИК-диапазоне; во второй половине июня в красной области спектра и несколько хуже в БИК-диапазоне; в) ярового ячменя и среднеспелых сортов кукурузы — со второй половины мая и до конца июня в красной области видимого диапазона; несколько хуже — в конце июня по b_λ для зеленой области и БИК-диапазона.

В отмеченные выше периоды весенне-летней вегетации значения $СК_{min}$ между посевами разных культур больше $СК'_{min}$, возможных между посевами хорошего и удовлетворительного состояния одной культуры (табл. 5.7). Очевидно, что в периоды, когда

Таблица 5.6

Минимально возможные различия между b_{λ} посевов озимой пшеницы, ярового ячменя и среднеспелых сортов кукурузы в течение весенне-летнего периода вегетации для степных районов Украины.

Надир, ясная погода, полуденные часы

Область спектра						Ведущий параметр, определяющий CK_{min}
зеленая		красная		БИК-диапазон		
Период	CK_{min}	Период	CK_{min}	Период	CK_{min}	

Озимая пшеница — яровой ячмень

Конец 1-й декады мая	0,5	Конец 1-й декады мая	0,7	Конец 1-й декады мая	0,4	L
Конец мая *	0,4	Конец мая *	0,5	Конец мая *	0,4	L, γ_3
Конец июня *	0,2	Конец июня *	0,2	Конец июня *	0,3	γ_3, L

Озимая пшеница — кукуруза

Конец 2-й декады мая	0,6	Конец 2-й декады мая	0,8	Конец 2-й декады мая	0,4	L
Конец мая	0,5	Конец мая	0,7	Конец мая *	0,3	L, γ_3
Середина июня *	0,3	Середина июня	0,7	Середина июня	0,5	γ_3
Конец июня	0,4	Конец июня	0,8	Конец июня	0,5	γ_3, L

Яровой ячмень — кукуруза

Конец 2-й декады мая	0,3	Конец 2-й декады мая	0,7	Конец 2-й декады мая	0,5	L
Конец мая	0,3	Конец мая	0,7	Конец мая *	0,4	L, γ_3
Конец 2-й декады июня	0,2	Конец 2-й декады июня	0,7	Конец 2-й декады июня	0,4	γ_3, L
Конец июня	0,4	Конец июня	0,8	Конец июня	0,4	γ_3, L

Примечание. Период дан исходя из средних многолетних дат наступления фенофаз. Звездочкой (*) отмечены периоды, когда диапазоны b_{λ} для посевов разных культур перекрываются; CK_{min} рассчитан как абсолютная разность между b_{λ} для двух сравниваемых посевов, нормированная к максимальному из двух сравниваемых значений b_{λ} . Почвы — черноземы южные малогумусные, легкосуглинистые, на начальных фенофазах умеренно влажные, на завершающих — сухие.

Таблица 5.7

Минимально возможные различия между b_{λ} посевов одной культуры разных состояний в течение весенне-летнего периода вегетации для степных районов Украины ¹

Период	$СК'_{min}$		
	Область спектра		
	зеленая	красная	БИК-диапазон
Озимая пшеница			
Конец 2-й декады апреля	0,2	0,3	<0,1
Конец 1-й декады мая	0,5	0,7	0,3
Конец 2-й декады мая	0,5	0,7	0,3
Конец мая	0,5	0,7	0,3
Середина июня	0,3	0,4	0,2
Конец июня	0,2	0,3	0,2
Яровой ячмень			
Конец 1-й декады мая	<0,1	0,4	0,3
Конец 2-й декады мая	0,1	0,4	0,3
Конец мая	0,1	0,4	0,2
Конец 2-й декады июня	<0,1	0,4	<0,2
Конец июня	<0,1	<0,1	<0,1
Среднеспелые сорта кукурузы			
Конец 2-й декады мая	<0,1	<0,1	<0,2
Конец мая	<0,1	0,2	0,3
Конец 2-й декады июня—середина июня	0,1	0,4	0,3
Конец июня	0,1	0,4	0,2
Середина августа	<0,1	0,2	0,2

¹ О почвах см. в примечании к табл. 5.6.

$СК_{min} > СК'_{min}$, реально распознавание культур с учетом вариабельности b_{λ} , обусловленной наличием разных состояний посевов.

Дополнительно к b_{λ} были рассчитаны P_1 и P_8 . Из рис. 5.5 и 5.6 видно хорошее качественное и количественное согласование расчетных и экспериментальных значений P_1 и P_8 . Имеющиеся количественные расхождения b_{λ} в оценках этих комбинаций скорее всего связаны с различиями в плотности полого, принимаемой при расчетах и измеренной в полевых экспериментах, а также в детализации фитометрических параметров. Кроме того, на рис. 5.5 и 5.6 приведены P_1 и P_8 , рассчитанные по модели Суитса

для рядкового посева кукурузы.¹ При $L_{3л}=3,5$ на фенофазе выметывание метелки (для «средних» по яркости почв) расхождения в значениях P_1 и P_8 , полученных по моделям Гудриана и

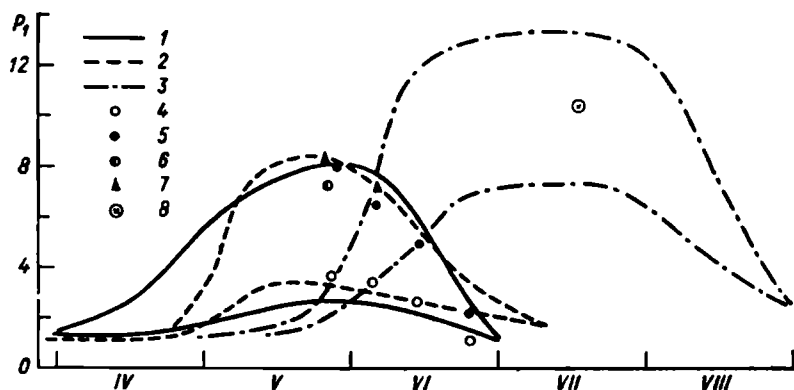


Рис. 5.5. Вегетационный ход расчетных (1—3, 8) и экспериментальных (4—7) значений P_1 для посевов различных культур плохого и хорошего состояний. Надир, полуденные часы.

1, 4—6 — озимая пшеница, 2, 7 — яровой ячмень, 3 — среднеспелые сорта кукурузы; 1—5 — для условий юго-востока Украины; 4, 5 — результаты собственных измерений в Херсонской области (4 — посевы с $L < 2$, 5 — посевы с $L > 3$); 6, 7 — по данным [44], $B=100\%$; 8 — рядковый посев кукурузы, $L=3,5$ (по Суитсу, 1985).

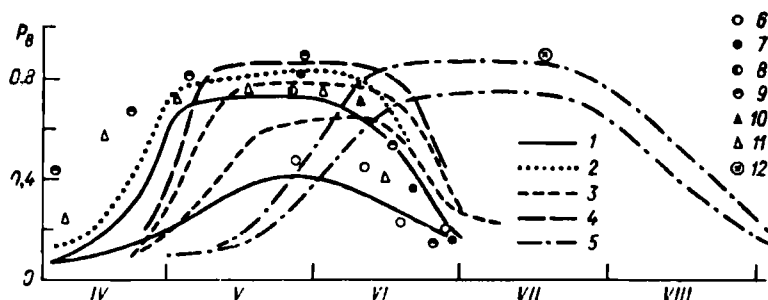


Рис. 5.6. Вегетационный ход расчетных (1, 3, 5, 12) и экспериментальных (2, 4, 6—11) значений P_8 для посевов различных культур плохого и хорошего состояний. Надир, полуденные часы.

1, 2, 6—9 — озимая пшеница, 3, 4, 10, 11 — яровой ячмень, 5, 12 — среднеспелые сорта кукурузы; 1, 3, 6—7 — результаты собственных измерений в Херсонской области (6 — посевы с $L < 2$, 7 — посевы с $L > 3$), 2 — по данным [101], 4 — по данным [40], 8, 10 — по данным [32], 9, 11 — по данным [98], 12 — рядковый посев кукурузы, $L=3,5$ (по Суитсу, 1985).

Суитса, не превышают 6 %. В то же время, согласно данным Суитса, P_1 различаются более чем на 30 %, а P_8 — на 10—15 %, если их значения вычислены для разных границ спектральных каналов Тематического картографа (ТМ) и «Ландсат», т. е. неучет рядковой структуры в модели Гудриана приводит к мень-

¹ Remote Sens. Envir., 1985, v. 17.

шим погрешностям в оценках P_1 и P_8 по сравнению со смещением границ каналов в одном спектральном диапазоне.

Основной результат, следующий из сравнения профилей P_1 и P_8 и имеющий важное методическое значение, состоит в том, что посевы разных культур, сформировавшие сомкнутый полог, характеризуются близкими значениями рассмотренных комбинаций b_λ . Это подтверждает гипотезу, выдвинутую в разд. 3.5, о возможности нивелирования воздействия ориентации путем комбинирования b_λ в видимом и БИК-диапазонах. Также подтвержден результат численного моделирования, свидетельствующий об относительной инвариантности P_8 и (в меньшей степени) P_1 к изменению ориентации фитоэлементов (см. табл. 5.3 и материалы разд. 3.9). Следовательно, на фенофазах максимального развития фитоплощади использование P_1 и P_8 для индикации культур нецелесообразно. Полученный вывод согласуется с многочисленными экспериментальными данными (см., например, [32, 44, 53]).

Периоды, в течение которых на основе P_1 и P_8 в степных районах Украины можно различить посевы разных культур в зависимости от их состояний, очевидны из сравнения значений этих комбинаций b_λ (табл. 5.8). Так как максимум L у ярового ячменя и озимой пшеницы формируется в близкие сроки, то с помощью P_1 реально отличить в течение весенне-летней вегетации только пшеницу хорошего состояния от ячменя удовлетворительного состояния и пшеницу удовлетворительного состояния от ячменя хорошего состояния; с помощью P_8 — пшеницу удовлетворительного состояния от ячменя хорошего состояния. Другие сочетания посевов этих культур различаются только в начале мая и в конце июня либо вовсе не различаются. Вероятнее отличить посевы пшеницы разных состояний от посевов кукурузы. За редким исключением в середине мая и во второй половине июня относительные изменения P_1 и P_8 для посевов разных состояний этих культур существенно превышают изменчивость P_1 и P_8 внутри посевов пшеницы (табл. 5.8).

В целом периоды, когда можно на основе P_1 и P_8 разделить культуры как в среднем, так и с учетом их состояний шире, чем при использовании b_λ . Разумеется, в конкретные годы эти периоды в календарных датах могут и не соблюдаться, но общая тенденция сохранится. Теоретические выводы о возможности распознавания посевов озимой пшеницы и кукурузы в степных районах Украины начиная с середины июня подтверждаются результатами расчетов аналога P_8 — TVI (и/или P_9 — см. разд. 3.9) по яркости, измеренной с ИСЗ [7]. Очевидной предпосылкой удовлетворительного совпадения результатов является нивелирование специфики пространственного размещения фитоэлементов при спутниковых наблюдениях.

Оценка влияния сроков наступления фенофаз. Выше были рассмотрены примеры расчетов для средних многолетних дат наступления фенофаз. При разных сроках сева и различных агрометеорологических условиях на одной территории в одни и те же

Таблица 5.8

Сравнение расчетных оценок $P_1 = b_{\text{БИК}}/b_k$ и $P_2 = (b_{\text{БИК}} - b_k)/(b_{\text{БИК}} + b_k)$ для посевов озимой пшеницы, ярового ячменя и среднеспелых сортов кукурузы для степных районов Украины

P_i	Культура, состояние	Май						Июнь					
		1	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	30

Пшеница, посевы хорошего (1) и удовлетворительного (2) состояний

P_1	1/2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,1	3,2	3,3	3,0	2,6	1,8	1,2
P_2	1/2	3,2	2,3	2,1	2,0	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	1,9	1,1

Пшеница, посевы хорошего (1) и удовлетворительного (2) состояний — кукуруза, посевы хорошего (3) и удовлетворительного (4) состояний

P_1	1/3	4,7	4,9	4,8	3,9	2,7*	1,6	—	—	0,5	0,3	0,2	0,1
P_1	2/4	1,8	1,8	1,9	1,7	—	—	—	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
P_1	1/4	5,6	6,7	5,9	5,2	4,0	3,2*	2,4	1,8	—	—	0,4	0,2
P_1	2/3	—	—	1,5	—	—	—	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
P_2	1/3	—	—	4,5	3,4	2,2	—	—	—	—	—	0,4	0,2
P_2	2/4	—	—	2,8*	2,1*	1,7*	—	—	—	0,5	0,4	0,3	0,2
P_2	1/4	—	—	6,0	4,1	3,1	2,1*	1,5*	—	—	—	—	0,2
P_2	2/3	—	—	2,3*	1,7*	—	—	—	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

Пшеница, посевы хорошего (1) и удовлетворительного (2) состояний — ячмень, посевы хорошего (5) и удовлетворительного (6) состояний

P_1	1/5	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
P_1	2/6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
P_1	1/6	3,3*	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5	2,6	2,4	1,8	—	—
P_1	2/5	—	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
P_2	1/5	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
P_2	2/6	—	—	—	—	—	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P_2	1/6	3,6*	2,1*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P_2	2/5	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Примечание. 1/2—2/6 — отношения P_i для сравниваемых пар посевов; приведенные значения этих отношений более 1,5 и менее 0,5. Звездочкой (*) отмечены отношения P_i между посевами культур разных состояний меньше отношений 1/2 или сопоставимые со значениями этих отношений для пшеницы. Соответствие фенофаз календарным датам для средних многолетних данных см. на рис. 5.4. О почвах см. в примечании к табл. 5.6.

даты посевы могут находиться в разных фазах развития. Поэтому при составлении графиков наземных подспутниковых обследований объектов на тестовых территориях, а также при сопоставлении дистанционных измерений, выполненных в разные дни, важно иметь представление о том, в какой степени проявляются возможные сдвиги фенофаз через яркостные характеристики.

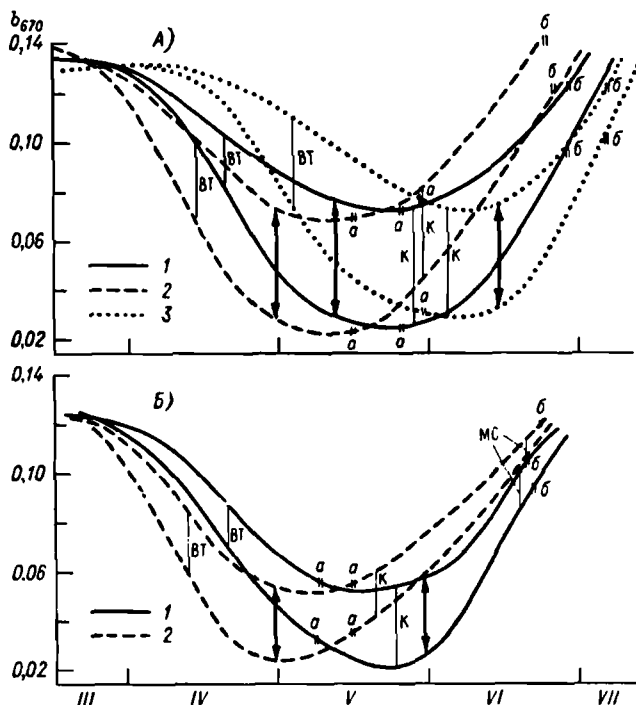


Рис. 5.7. Вегетационный ход расчетных значений СКЯ в красной области видимого диапазона (b_{670}) посевов озимой пшеницы в различных пунктах Украины. Надир, $D_\lambda/Q_\lambda = 0,4$, полуденные часы.

А — на основе средних многолетних дат наступления фенофаз: 1 — Баштанка, 2 — Аскания-Нова, 3 — Сумы; посевы удовлетворительного и отличного состояний; Б — на основе дат наступления фенофаз в 1977 г.: 1 — Нижние Сергозы, 2 — Аскания-Нова; посевы хорошего и отличного состояний (предшественник — пар); а — начало пожелтения ($\gamma_a > 80\%$), б — значительное пожелтение ($\gamma_b < 50\%$); фенофазы: BT — выход в трубку, К — колошение, МС — молочная спелость; стрелками показан диапазон изменений b_{670} для посевов хорошего и отличного состояний.

С целью проверки возможных различий были рассчитаны b_λ посевов озимой пшеницы хорошего и отличного состояний для двух вариантов: 1) по средним многолетним данным для трех пунктов Украины, различающихся по климатическим и почвенным условиям, и 2) для двух пунктов, один из которых совпадает с рассмотренным в первом варианте. Даты наступления фенофаз брались из справочной литературы и фондовых материалов Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и

контролю природной среды. Фитометрические параметры задавались на основе материалов, приведенных в разд. 2.3 и 2.4, в [26, 27]. Значения ρ , τ и ρ_s были конкретизированы исходя из результатов разд. 2.1 и 2.2 с учетом реальных почвенных условий и состояния посевов озимой пшеницы.

Расчеты показали, что для рассмотренной территории различия в сроках наступления фенофаз в основном могут повлиять на b_λ (рис. 5.7) и $СК_{min}$ в ранневесенний период вегетации и во время начала массового пожелтения. Соответственно в эти фенофазы, наиболее динамичные по нарастанию (сокращению) L и по изменению аспекта, необходимо проводить дистанционные и сопутствующие им обследования посевов в предельно сжатые сроки. Показательным признаком также является продолжительность периода от всходов до формирования максимальной плотности полога (и максимума b_λ в БИК-диапазоне, минимума — в видимой области). Но в середине периода вегетации разделение посевов с разными сроками сева усложняется из-за перекрытий значений b_λ даже для посевов однотипных состояний.

*

* *

В заключение этого раздела подчеркнем, что периоды, когда на основе b_λ и P_i можно достоверно выделить посевы разных культур или разных сроков сева, практически совпадают с теми, в течение которых посевы различаются по плотности полога и цвету растительности. Поэтому, располагая информацией о фенологическом календаре, дополненной данными о динамике фитометрических параметров¹, оптических свойств видов (сортов) и почвенных условиях, можно для конкретных объектов заранее оценить применимость метода «спектральных профилей»,² широко внедряемого сейчас в практику дистанционного зондирования.

5.2.2. Влияние состояния посевов на возможные различия в яркостных характеристиках

Индикация состояния посевов одной культуры и через него прогноз урожайности является одной из основных задач, в решении которой заинтересовано сельскохозяйственное производство. В то же время накопленный опыт показывает, что это одна и из самых сложных задач дистанционного зондирования.

В развитии разд. 5.2.1 ниже покажем возможность применения теоретического подхода при выделении состояний на примере

¹ Прежде всего данными о датах начальных фенофаз, созревания и формирования максимальной плотности полога, а также о фотосинтетическом потенциале посевов за выбранный период (см., например, табл. 2.26 и публикации G. Badhwar, K. Henderson. Remote Sens. Envir., 1985, v. 17, № 2; A. Jai., A. Gopalan, D. Kamat. Int. J. Remote Sens., 1985, v. 6, № 9).

² Термин «спектральный профиль» для описания динамики отражательных свойств в течение вегетации не совсем удачен.

посевов озимой пшеницы. При расчетах b_λ для надира использовались статистические материалы многолетних измерений L_λ по массовой выборке полей в Херсонской области [26, 27], данные рис. 2.6 б и 2.7 б, табл. 2.24, 2.25 и 5.2. На основе указанной информации было задано изменение в течение вегетации максимальных и минимальных значений L_λ , L , β_λ , $\gamma_{\lambda 1}$ и $\gamma_{\lambda 2}$ для посевов разных состояний. Значения ρ и τ , присущие фитоэлементам пшеницы в течение разных фенофаз, задавались с учетом материалов разд. 2.1, значения ρ_s — в соответствии с данными табл. 2.11—2.13.

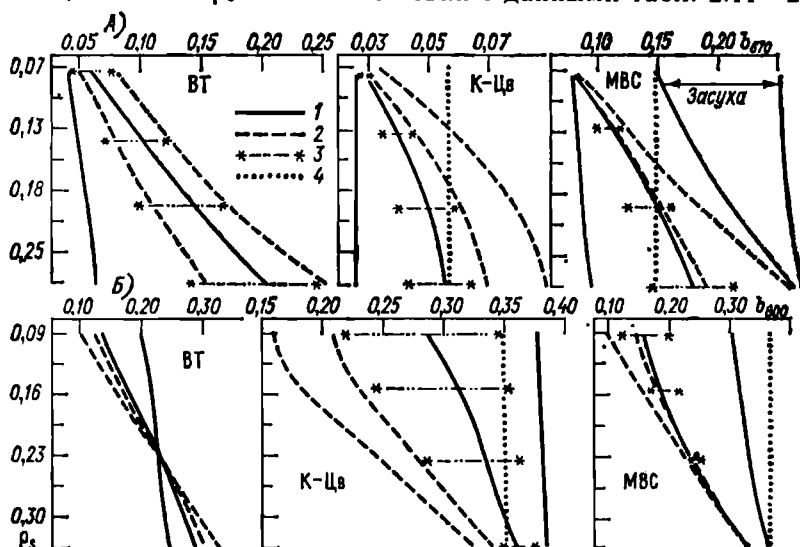


Рис. 5.8. Диапазоны изменений b_λ посевов озимой пшеницы разных состояний в зависимости от ρ_s . Надир, $S_\lambda \gg D_\lambda$, полуденные часы.

Длины волн: А — 670 нм, Б — 800 нм; фенофазы: ВТ — выход в трубку, К — колошение, Цв — цветение, МВС — молочно-восковая спелость; состояние посевов: 1 — хорошее и отличное, 2 — плохое, 3 — удовлетворительное, 4 — полегание.

Далее, полученные оценки входных параметров модели Гюдрриана были привязаны к шкале средних многолетних дат наступления фенофаз на юго-востоке Украины.

В итоге использованные при расчетах b_λ значения входных параметров в разнообразных сочетаниях позволяют интерпретировать результаты численных экспериментов в двух аспектах: 1) как пространственную изменчивость b_λ посевов, находящихся в идентичных условиях почвенного увлажнения и 2) как изменчивость b_λ , обусловленную особенностями режима увлажнения в рамках генетически однородного почвенного ареала.

На рис. 5.8 и в табл. 5.9 представлены результаты расчетов, анализ которых позволяет сделать экспертные заключения о возможности разделения посевов пшеницы различных состояний в период весенне-летней вегетации по измерениям b_λ в оптическом диапазоне для условий визирования в надир и при полуденных $h_\odot$.

Таблица 5.9

Теоретические значения спектральных контрастов (СК) между посевами пшеницы различного состояния

Надир, полуденные часы

Область спектра	Состояние посева	Состояние посева			
		плохое	удовлетворительное	хорошее	отличное

Выход в трубку

Красная	Плохое	1	0,4	0,4	0,8	0,8
		2	0	0	0	0,1
	Удовлетворительное	1	0,4	0,4	0,8	0,8
		2	0	0	0	<0,1
	Хорошее	1	0,8	0,8	0,7	0,7
		2	0	0	0	0
	Отличное	1	0,8	0,8	0,7	0,6
		2	0,1	<0,1	0	0
БИК	Плохое	1	<0,1	<0,1	0,2	0,2
		2	0	0,1	0	<0,1
	Удовлетворительное	1	<0,1	<0,1	0,2	0,2
		2	0	0	0	<0,1
	Хорошее	1	0,2	0,2	0,2	0,2
		2	0	0	0	0
	Отличное	1	0,2	0,2	0,2	0,2
		2	<0,1	<0,1	0	0

Колошение—цветение

Красная	Плохое	1	0,5	0,7	0,7	0,7
		2	0	0	0,3	0,3
	Удовлетворительное	1	0,7	0,4	0,4	0,4
		2	0	0	0	0,1
	Хорошее	1	0,7	0,4	0,15	0,15
		2	0,3	0	0	0
	Отличное	1	0,7	0,4	0,15	0,1
		2	0,3	<0,1	0	0
БИК	Плохое	1	0,1	0,3	0,3	0,3
		2	0	0	<0,1	0,2
	Удовлетворительное	1	0,3	0,2	0,3	0,3
		2	0	0	0	0
	Хорошее	1	0,3	0,3	0,2	0,2
		2	<0,1	0	0	0
	Отличное	1	0,3	0,3	0,2	0,1
		2	0,2	0	0	0

Область спектра	Состояние посева	Состояние посева			
		плохое	удовлетворительное	хорошее	отличное

Молочно-восковая спелость

Красная	Плохое	1	0,3	0,4	0,5	0,4
		2	0	0	0	0
	Удовлетворительное	1	0,4	0,3	0,4	0,8
		2	0	0	0	0
	Хорошее	1	0,5	0,4	0,3	0,3
		2	0	0	0	0
	Отличное	1	0,4	0,3	0,3	0,2
		2	0	0	0	0
БИК	Плохое	1	<0,1	0,1	0,2	0,1
		2	0	0	0	0
	Удовлетворительное	1	0,1	0,1	0,2	0,1
		2	0	0	0	0
	Хорошее	1	0,2	0,2	0,2	0,1
		2	0	0	0	0
	Отличное	1	0,1	0,1	0,1	0,1
		2	0	0	0	0

Примечание. СК рассчитывался как абсолютная разность между сравниваемыми значениями b_{λ} , нормированная к наибольшему из этих двух значений b_{λ} ; 1 — сравнение максимально различающихся b_{λ} , 2 — сравнение b_{λ} для той ситуации, для которой был определен предыдущий СК, но при минимальном расхождении между b_{λ} . О почве см. примечание к табл. 5.6.

Выход в трубку. В течение этой фенофазы при доминировании зеленого цвета растительности ведущим признаком, определяющим специфику спектрального образа посевов, является плотность полога. Соответственно различаются те посевы, для которых интервалы характерных значений $L_{\text{д}}$ и/или B не перекрываются: первую группу составляют посевы отличного состояния, вторая объединяет посевы плохого или плохого и удовлетворительного состояний. На темных почвах (черноземы с большим содержанием гумуса либо почвы во влажном состоянии) минимальные ошибки индикации групп посевов разных состояний возможны при использовании каналов БИК-диапазона. На светлых почвах (солонцы, светло-каштановые почвы или более гумусированные почвы, но в сухом состоянии) для выделения групп посевов предпочтительнее каналы красной области спектра.

Колошение и цветение. В течение этих фенофаз, с одной стороны, происходит усложнение фракционного состава растительности, уменьшение $\beta_{\text{л}}$, а с другой — увеличение сомкнутости полога и соответственно снижение вклада яркости почвы в формирование суммарного отражения посева. Так как полное смыкание

полога происходит далеко не всегда, то возможности определения разных состояний посевов частично зависят от ρ_s . Растительность сохраняет еще зеленый цвет, за исключением случаев ранних засух.

Так же как и в предыдущие фенофазы, достоверно различаются по b_λ только экстремальные варианты состояний посевов. На темных почвах по b_λ в БИК-диапазоне можно отделить плохие посевы от отличных; на светлых почвах посевы плохого состояния достоверно отличаются от посевов с хорошим и отличным состоянием во всем оптическом диапазоне. В целом наименее благоприятные условия для диагностики состояния в каналах видимого диапазона складываются на темных почвах, в БИК-диапазоне — при $\rho_s = 0,16 \div 0,18$.

Как видно из рис. 5.8, для индикации полегания целесообразно использовать каналы БИК-диапазона, в котором b_λ полегших посевов существенно превышает b_λ нормальных посевов любой плотности. В видимом диапазоне полегшие посевы достоверно отличаются от посевов хорошего и отличного состояний, независимо от ρ_s , а на темных почвах — и от неполегших посевов плохого состояния.

Молочно-восковая спелость. Для этого периода характерна очень большая изменчивость L и/или V и особенно цветовой гаммы внутри отдельных состояний. Поэтому успешное выделение состояний по b_λ оптического диапазона маловероятно. В то же время спектрометрическая информация (рис. 5.8) может быть эффективно использована для: а) определения полегания и соответственно площадей с полегшими посевами по b_λ во всем оптическом диапазоне; б) диагностики посевов, подвергшихся засухе (если при этом произошло уже пожелтение или изменилась ориентация фитоэлементов) по b_λ для красной области видимого диапазона. Так же, как и в предыдущие фенофазы, при определенных ρ_s весьма вероятны ситуации, когда по b_λ в каналах БИК-диапазона вообще нельзя выделить состояния нормально развитых посевов пшеницы.

Рассмотренные выше данные характеризуют общую тенденцию. В конкретные годы на определенной территории могут сложиться условия, при которых на основе b_λ возможно выделение более дробных единиц состояния за счет уменьшения изменчивости структурных параметров РП, ρ и ρ_s в пределах каждого из состояний. В то же время, справедливость теоретических выводов, полученных с привлечением многолетних данных по степным районам Украины, подтверждается результатами измерений яркости за один год (рис. 5.9 и табл. 5.10). Для сопоставимости результатов нами были рассчитаны отношения $b_{\lambda_{\text{пш}}}$ посевов пшеницы к $b_s \approx \rho_s$ с учетом реальных почвенных условий, а для снимка с ИСЗ — аналогичные отношения оптической плотности полей с пшеницей $V_{\text{пш}}$ к оптической плотности расположенных рядом полей под паром $V_{\text{поч}}$ (объем выборки — около 100 полей).

Очевидно, что значения $B_{\text{пш}}/B_{\text{поч}}$ из-за влияния яркости атмосферной дымки в красном канале ниже значений расчетного аналога $b_{\lambda_{\text{пш}}}/\rho_s$ (рис. 5.9).

Несмотря на количественные различия в значениях $B_{\text{пш}}/B_{\text{поч}}$ и $b_{\lambda_{\text{пш}}}/\rho_s$, общий вывод о достоверности распознавания посевов

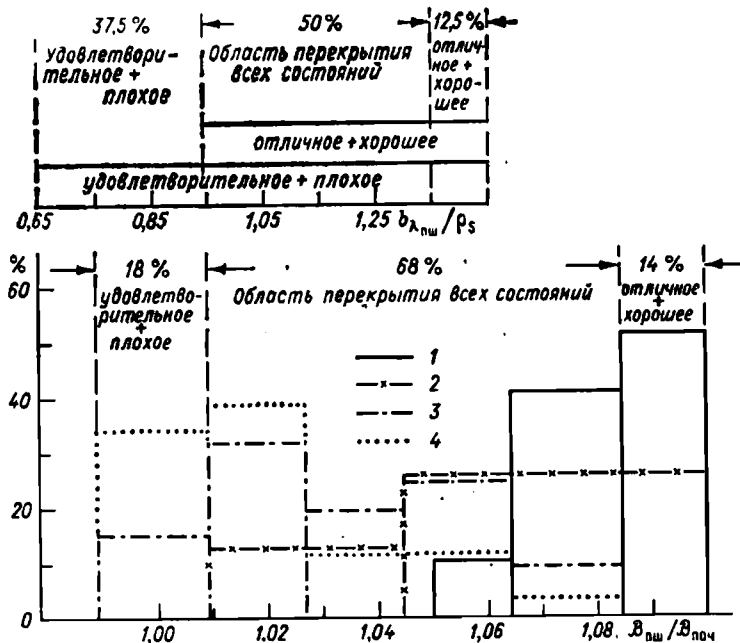


Рис. 5.9. Сопоставление рассчитанных по модели Гудриана $b_{\lambda_{\text{пш}}}/\rho_s$ и измеренных по снимку «Ландсат» $B_{\text{пш}}/B_{\text{поч}}$ относительных характеристик яркости в красной области видимого диапазона посевов озимой пшеницы в период молочно-восковой спелости. Степные районы Украины.

Общий объем выборки около 100 полей: 1 — посевы отличного состояния, 2 — хорошего, 3 — удовлетворительного, 4 — плохого.

только экстремальных состояний сохраняется и для космической информации. При этом на основе последней вероятность распознавания состояний в конкретный срок в целом даже ниже, чем по прогнозным расчетам. Не намного улучшается возможность индикации состояния посевов пшеницы при использовании TVI (табл. 5.10), а теснота связи между состоянием и TVI почти в 3 раза ниже ($K'=0,13$), чем между TVI и культурой [7].

Другой численный эксперимент был проведен с целью определения области перекрытия b_{λ} посевов пшеницы, приуроченных к почвам, которые типичны в пределах «озимого клина» страны. Расчеты b_{λ} с учетом $\bar{\rho}_s$ были выполнены на период выход в трубку — рост стебля при разных состояниях посевов, заданных следующими значениями L : менее 0,5 (плохое), менее 2 (удовлет-

Таблица 5.10

Распределение значений TVI по данным «Ландсат» для посевов пшеницы в период молочно-восковой спелости

Состояние посева	TVI			$P(b_j)$
	<0,67	0,67—0,71	>0,71	
Плохое	0,070	+0,410	+0,520†	0,260
Удовлетворительное	0,320	+0,430†	0,250	0,353
Хорошее	+0,580†	0,170	0,250	0,183
Отличное	+0,810†	0,140	0,050	0,204
$p(a_i)$	0,404	0,317	0,279	

Примечание. Объем выборки — 104 поля. Знаком плюс (+) отмечены вероятные состояния при $c > 1$, † — наиболее вероятные состояния, выбранные по максимальному значению c из совокупности $c > 1$ (см. разд. 2.1.2.2).

ворительное), менее 3 (хорошее), 3,5—4 (отличное), и на период колошение—цветение при L для тех же состояний: менее 2,1—4, 2—5 и 4—6. Так как плохое состояние выделяется достоверно в большинстве ситуаций, ниже приводим возможные перекрытия b_i посевов в диапазоне состояний от отличного до удовлетворительного в процентах от всего интервала значений для всех состояний при $\bar{p}_i$, соответствующих умеренно влажным почвам:

Почвы	Выход в трубку— рост стебля		Колошение—цветение		
	550 нм	670 нм	550 нм	670 нм	800 нм
Подзолистые	43	40	75	68	100
Серые лесные	42	42	66	75	70
Черноземы оподзоленные	49	42	73	81	67
Черноземы типичные	46	48	86	77	63
Черноземы обыкновенные, южные	56	48	73	81	67
Светло-каштановые	33	39	66	75	70

Очевидно, что из-за вынужденных приближений при параметризации состояний полученные оценки имеют более ориентировочный характер, чем рассмотренные выше для конкретной территории. Но в целом они также подтверждают неблагоприятный прогноз определения состояний по измерениям СКЯ в оптическом диапазоне при надирных углах визирования.

Сравнительно малая вероятность успешного выделения различных состояний получена на основе расчетов, проведенных для градаций, установленных с помощью методик наземных и аэро-

зуальных наблюдений, принятых в агрометеорологии [26, 27]. Хотя в дальнейшем эти градации были описаны через входные параметры модели, исходные предпосылки выделения состояний были сохранены. Полученные результаты, по нашему мнению, свидетельствуют о необходимости изменения существующего подхода к классификации состояний с учетом реальных возможностей современных и перспективных методов дистанционного зондирования. При интерпретации аэрокосмической информации представляется целесообразным сначала определить для конкретной территории достоверно различные градации яркостных характеристик, далее, установить их соответствие оптико-биологическим параметрам растительности на основе синхронных или квазисинхронных наземных (аэровизуальных) наблюдений, а затем найти эмпирические зависимости, связывающие оптико-биологические параметры (например, те, которые входят в ММРР) с хозяйственными показателями состояния. Вполне вероятно, что такой путь от обратного и отказ от традиционных методик выделения состояний является одним из резервов повышения эффективности использования данных оптического зондирования. Для иллюстрации приведем пример.

На фенофазе колошение—цветение часть посевов пшеницы по принятой методике была отнесена к посевам хорошего состояния. Однако из-за больших перекрытий СКЯ эти посевы не отличались от посевов отличного и удовлетворительного состояний и, следовательно, само понятие «хорошее состояние» не содержало какой-либо информации, полезной для тематической интерпретации. В то же время на основе СКЯ внутри указанной группы посевов достоверно выделялись две подгруппы (одна с $L > 5$ и $\gamma_3 > 74\%$, другая с $L \geq 4$ и $\gamma_3 = 56 \div 74\%$), которые по биологической урожайности объединялись с посевами соответственно отличного и удовлетворительного состояний.

В целом предложенный подход так или иначе применяется при обработке видеонизображений, когда распознавание ведется «без обучения». Для более рационального использования этого подхода представляется целесообразным (кроме унифицированной параметризации состояний) учет результатов численного моделирования (см. главу 3, разд. 5.1 и 5.2). Очевидно, что последние являются предпосылкой для выделения сочетаний значений оптико-биологических параметров, через которые может быть описано состояние посевов одной культуры (или посевы разных культур) и при которых формируются достоверные различия в b_d системы растительность—почва.

Помимо отказа от традиционной методики выделения состояний, существует еще ряд возможностей повысить эффективность использования каналов оптического диапазона. Во-первых, это широко применяемые в настоящее время различные линейные преобразования спектральных данных, трансформированных по методу Kauth—Thomas для 4-канальных измерений MSS «Ландсат-2» [113] или по методу Crist—Cicone [85, 86] для 6-канальных

измерений ТМ¹ (преобразования «Tasseled Cap» — «шапка с кисточкой»). Во-вторых, это поэтапное решение задачи, заключающееся: 1) в выделении классов посевов (в том числе культур) на основе общей кривой «спектрального профиля» («СП»), 2) в разделении классов на группы посевов на основе специфики левой ветви «СП», соответствующей началу вегетации, и продолжительности периода с максимальными значениями спектрального признака, 3) в выделении внутри групп более мелких классификационных единиц (в том числе и состояний посевов) на основе различий в амплитудах и других особенностей «СП» [125, и др.].

Не останавливаясь здесь на подробном описании указанных подходов (им посвящены многочисленные публикации в основном американских авторов), подчеркнем только несколько важных моментов. Как уже отмечалось в разд. 5.2.1, возможности «СП» разных разных признаков (отношений, сумм, разностей и других комбинаций яркостных характеристик, а также собственно СКЯ или яркости) логично связаны с фенологическим календарем. Поэтому выделение культур, состояний, фенофаз и т. п. возможно в тех случаях, когда существуют достоверные различия в структурных и оптических параметрах РП. Соответственно использование «СП» для какой-либо территории при решении различных задач распознавания и идентификации будет более эффективным при наличии предварительно систематизированных наземных и спектральных данных. Если подобная информация отсутствует, то искомые оценки состояния РП могут быть получены только в конце периода, во время которого собираются данные о «СП». В результате сводится на нет одно из основных преимуществ дистанционного зондирования — оперативность получения информации.

В связи с этим параллельно с развитием метода «СП» активно ведутся работы по выявлению отдельных сроков в течение вегетации, когда спектральные характеристики не менее информативны для определения искомых свойств растительности, чем проинтегрированные за какой-либо период значения этих характеристик или кривая «СП» в целом. Указанный подход используется в основном для прогноза урожайности с различным упреждением и базируется на зависимостях урожайности от фитометрических параметров, в том числе от L и m .² Например, для различных сортов пшеницы в разных условиях произрастания установлено, что общая сухая фитомасса и урожайность зерна на конец веге-

¹ В ТМ дополнительно используются каналы 5 и 7 среднего ИК-диапазона; для MSS область, занимаемая растительностью и почвой, является двухмерной, для ТМ — трехмерной (положение плоскости растительности определяется признаками «greenness» и «brightness», почвы — «brightness» и «thirdness»).

² По нашим наблюдениям, для озимой пшеницы запас зерна более тесно связан с общей сухой фитомассой на фенофазе молочно-восковой спелости ($r = 0,97$), чем в период восковая — полная спелость ($r = 0,88$), что объясняется снижением общей массы к концу вегетации при продолжающемся наливе зерна.

тации высоко коррелируют как со значениями ND (и/или P_8) и P_1 , полученными по измерениям в отдельные сроки от начала роста стебля до конца колошения ($r=0,78 \div 0,95$), так и с накопленными суммами этих спектральных параметров ($r=0,8$) за 55—95 дней после всходов (т. е. за период, включающий указанные выше фенофазы)¹. Равенство коэффициентов детерминации ($r^2=0,59 \div 0,6$) также выявлено для американских сортов кукурузы при анализе связей между яркостными характеристиками в БИК-диапазоне (760—900 нм) на 180—185-й день года и на-

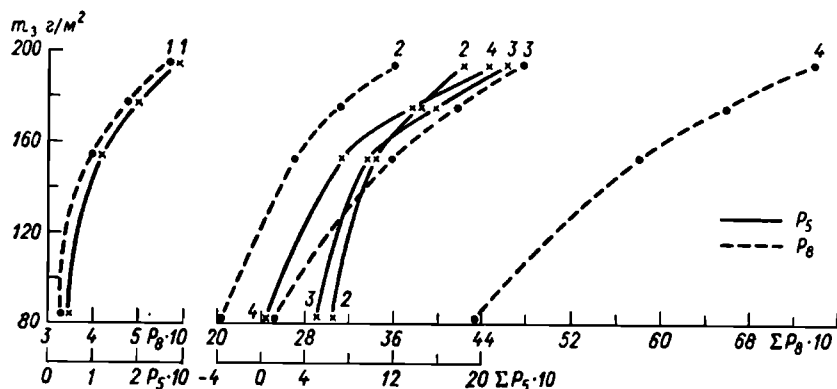


Рис. 5.10. Зависимость между P_5 , P_8 , их накопленными суммами ΣP_5 , ΣP_8 за различные периоды от фенофазы цветения до восковой спелости и запасами зерна m_3 в посевах яровой пшеницы. Степные районы Украины, $h_0 > 45^\circ$, ясная малооблачная погода, наземные измерения.

Число дней (сдвиг): 1) 0 (цветение), 2) 5, 3) 9, 4) 19 (восковая спелость).

копленными суммами ND за $178 \div 187 + 232 \div 242$ дня и урожаем зерна.² Аналогично для риса в условиях Индии³ одинаковые оценки r получены для ND и P_1 ($r=0,78$) на 65-й день после посадки и их суммами за 50—90 дней ($r=0,72$).

Хотя и очевидно, что выявленные сроки и периоды логично объясняются функциями роста и развития растительности, несомненное преимущество метода накопленных сумм определяется его меньшей зависимостью от погодных условий по сравнению с методикой, основанной на измерениях в конкретные моменты времени. В то же время однотипность связей позволяет в равной степени использовать обе методики исходя из той информации, которой располагает интерпретатор.

Из анализа литературы следует, что при прогнозе урожайности используются главным образом комбинации яркостных характеристик в красной области видимого диапазона и в БИК-диапазоне (в том числе ND и БИК/К, или в наших обозначениях P_8 и P_1). Очевидно, как видно из рис. 5.10, P_8 практически не обла-

¹ См. [64] и работу D. Kamat, A. Gopalan и др., 1985 г.

² По B. Markhams, D. Kimes, C. Tucker и др., 1983 г.

³ По N. Patel, T. Singh и др., 1984, 1985 гг.

дает какими-либо преимуществами перед P_5 и/или P_7 . При сохранении подобных зависимостей между показанными P_i и запасом зерна чувствительность накопленных за разные периоды от колошения—цветения до восковой спелости сумм P_8 ($\Delta \sum P_8$) более чем в 2 раза ниже аналогичных оценок для $\Delta \sum P_5$ и $\Delta \sum P_7$ ¹ (соответственно за 5 и 9 дней после цветения: 0,43—0,48, 0,91—0,94 и 0,92—0,95; за 19 дней после цветения: 0,42, 1,22 и 1,22).

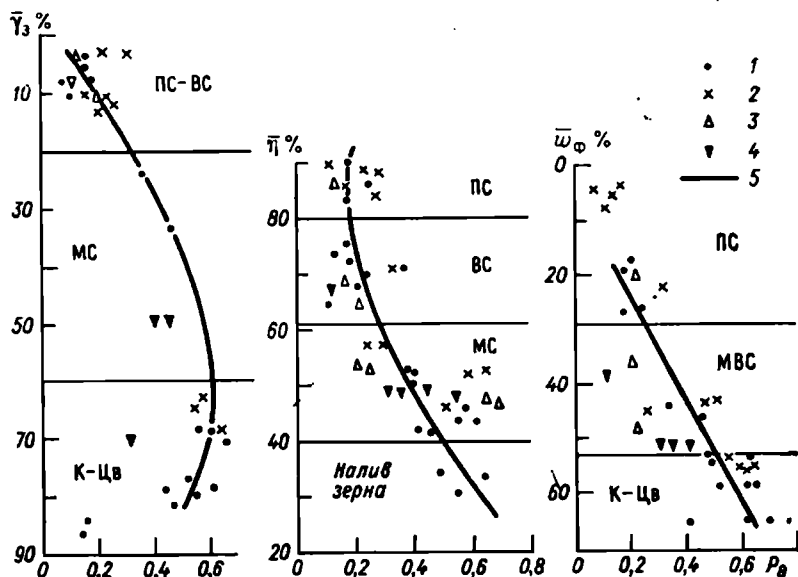


Рис. 5.11. Зависимость между P_8 и долей относительной поверхности фитоэлементов зеленого цвета γ_z , содержанием сухого вещества в зерне η и обводненностью фитоэлементов ω_{ϕ} для посевов озимой пшеницы в период фенофаз от колошения до полной спелости. Надир, полуденные часы, ясная малооблачная погода, наземные измерения.

1) $L > 5$, 2) $L = 3 \div 4$, 3) $L = 2 \div 3$, 4) $L < 1,5$; 5) зависимость для сомкнутых посевов; фенофазы: К — колошение, Цв — цветение, МС, МВС, ВС, ПС — молочная, молочно-восковая, восковая, полная спелость.

Также менее информативны в период колошения—цветения значения ΔP_8 по сравнению с ΔP_5 , ΔP_7 и ΔP_3 (0,44, 0,86, 0,86 и 0,54 соответственно), что объясняется показанными ранее особенностями изменения P_8 в зависимости от L , ρ_s и ρ . Опосредовано через эти зависимости проявляется и связь P_8 с запасом сухого вещества в зерне и ω_{ϕ} в течение всего периода после колошения (рис. 5.11), при этом реакция P_8 на созревание обусловлена его чувствительностью к изменению ρ (см. табл. 5.3—5.5).

В заключение этого раздела приводим рис. 5.12, который демонстрирует еще один возможный подход для повышения эф-

¹ $\Delta \sum P_i$ и ΔP_i определены как разность между $\sum P_i$ и P_i , соответствующих минимальной и максимальной урожайности, которая нормирована к максимальному из сравниваемых значений $\sum P_i$ и P_i (расчеты этих показателей выполнены Е. В. Фадеевой).

фективности данных оптического зондирования при диагностике состояния посевов. Как видно из этого графика, увеличение значений P_1 и P_8 до фенофазы колошения относительно их значений в период выхода в трубку четко дифференцируется по состояниям даже при сравнении удовлетворительных и хороших посевов пшеницы. В период колошение — конец молочной спелости

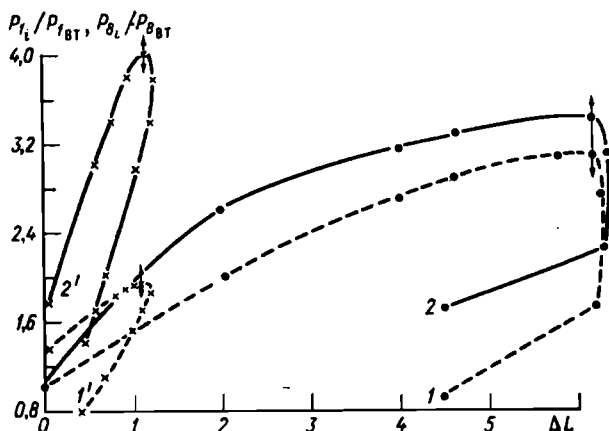


Рис. 5.12. Зависимость между отношением P_1 и P_8 в фиксированные сроки (P_{1i} и P_{8i}) к P_1 и P_8 для фенофазы выхода в трубку (P_{1BT} и P_{8BT}) и приращением относительной поверхности фитоземелентов ΔL за период от выхода в трубку до фиксированного срока для посевов озимой пшеницы разного состояния.

1, 1') P_1 , 2, 2') P_8 ; состояние посевов: 1, 2) хорошее, 1', 2') удовлетворительное; стрелкой показана фенофаза колошения.

значения P_1 и P_8 для хороших посевов резко снижаются при сохранении постоянного превышения L относительно L во время выхода в трубку за счет происходящего изменения цвета растительности, а для посевов удовлетворительного состояния это снижение практически не выражено. Понятно, что такой ход относительных характеристик P_1 и P_8 обусловлен различной продолжительностью периода с «плато» на графиках «СП» для этих комбинаций b_λ (см. рис. 5.5 и 5.6). Также показательны различия в спаде P_1 и P_8 при разных состояниях после молочной спелости.

Таким образом, теоретически выявляются три периода, по специфичным признакам которых можно определить состояние, если известны яркостные характеристики на момент начальных фенофаз и в какой-либо другой момент, когда получены спектрметрические данные. При этом предпочтительнее использовать P_8 , так как нормализованная разность менее чувствительна, чем простое отношение БИК/К, к изменениям яркости почвы и ориентации фитоземелентов.

*

* *

В целом материалы, представленные выше, свидетельствуют о целесообразности использования расчетных методов при решении вопросов постановочного характера, в том числе при оценках возможного разделения по спектральным признакам культур, состояний, восстановления отдельных параметров РП и т. п. Численное моделирование также может быть полезным для экспертной проверки эффективности любого способа установления связей яркостных характеристик непосредственно с урожайностью.

Заключение

Исторически сложилось так, что практическое внедрение пассивных методов дистанционного зондирования в оптическом диапазоне шло с опережением теоретических исследований процессов взаимодействия излучения с растительным покровом. Это, в свою очередь, породило излишне оптимистичные прогнозы возможностей дистанционных измерений, выполненных при надирных углах визирования, в интересах агрометеорологии, сельскохозяйственного производства, экологического мониторинга и т. п. Как показано в монографии, теоретические возможности оптического зондирования при решении различных задач распознавания и идентификации довольно ограничены. Во всяком случае, эффективность использования спектрометрических данных при восстановлении плотности и цвета полога растительности, запасов фитомассы, оценках состояний, разделении посевов разных культур и т. д. существенно зависит от сопутствующей информации о различных параметрах растительности, фенологическом календаре и яркости почвы. Тем не менее до сих пор в аэрокосмических исследованиях преобладают методы оптического зондирования. Поэтому представленные в монографии систематизированные результаты теоретического анализа могут быть полезны при интерпретации причинно-следственных связей между яркостными характеристиками (без учета влияния атмосферы) и свойствами растительных объектов, а также при выборе спектральных признаков, наиболее информативных с точки зрения восстановления искомых параметров.

Для расширения практических возможностей дистанционного зондирования в настоящее время интенсивно ведется поиск новых направлений. В том числе привлекаются каналы ИК- и СВЧ-диапазонов, используются наклонные углы визирования, поляризационные эффекты, активные методы зондирования. Кроме того, делаются попытки решить с помощью дистанционных измерений новый класс задач, а именно: определить газообмен, поглощенную фотосинтетически активную радиацию, транспирацию и суммарное испарение, т. е. характеристики, которые совместно с оценками относительной поверхности фитозлементов могут быть использованы в качестве входных параметров общих моделей продукционного процесса и энерго-массообмена. По нашему мнению, усилия, направленные на получение с помощью дистанционных исследований полезных для практики результатов, были бы более плодотворными при предварительной всесторонней проверке возможностей перспективных методов зондирования на основе различных теоретических моделей.

Список литературы

1. Абашина Е. В. Радиационный режим и структура посевов ячменя в агрометеорологических условиях центральных районов нечерноземной части ЕТ СССР.— Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. геогр. наук. Обнинск, 1973.— 29 с.
2. Абашина Е. В., Горбачев В. А. Ориентация листьев в посевах ячменя.— Труды ИЭМ, 1976, вып. 8 (67), с. 97—104.
3. Абашина Е. В., Федосеев А. П., Козинец Д. В. Геометрическая структура и радиационный режим ячменя различных норм посева.— Труды ИЭМ, 1974, вып. 5 (49), с. 58—82.
4. Андроников В. Л. Аэрокосмические методы изучения почв.— М.: Колос, 1979.— 280 с.
5. Анисимов О. А. Моделирование радиационного режима, газообмена и фотосинтеза растительного покрова.— Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук. Л., 1986.— 20 с.
6. Анисимов О. А., Менжулин Г. В. К статистической теории радиационного поля в растительности.— Метеорология и гидрология, 1985, № 10, с. 94—99.
7. Барвынь Г. И., Выгодская Н. Н., Горшкова И. И., Некрасов В. П. Применение комплексных спектральных параметров для оценки состояния посевов озимой пшеницы.— В кн.: Биосфера и климат по данным космических исследований.— Баку, 1982, с. 218—222.
8. Бихеле З. Н., Молдау Х. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги.— Л.: Гидрометеониздат, 1980.— 223 с.
9. Брандт А. Б., Тагеева С. В. Оптические параметры растительных организмов.— М.: Наука, 1967.— 301 с.
10. Виноградов Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем.— М.: Наука, 1984.— 320 с.
11. Вирченко О. В. Модель взаимодействия электромагнитного излучения с растительным покровом.— Труды ВНИИСХМ, 1984, вып. 14, с. 71—74.
12. Выгодская Н. Н. Радиационный режим и структура горных лесов.— Л.: Гидрометеониздат, 1981.— 260 с.
13. Выгодская Н. Н. Изменение проективного покрытия почв растительностью в зависимости от зенитного угла визирования.— Труды ГосНИЦИПР, 1983, вып. 13, с. 73—80.
14. Выгодская Н. Н. Требования к объему и типу выборок при фитометрических наблюдениях в посевах пшеницы.— В кн.: Биоценоз пшеничного поля.— М.: Наука, 1986, с. 28—40.
15. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И. Использование модели Гоудриана для изучения закономерностей отражения системы растительность—почва в оптическом диапазоне. I. Влияние фитометрических параметров на коэффициенты спектральной яркости.— Иссл. Земли из космоса, 1984, № 4, с. 61—70.
16. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И. Использование модели Гоудриана для изучения закономерностей отражения системы растительность—почва в оптическом диапазоне. II. Влияние условий освещения на коэффициенты спектральной яркости.— Иссл. Земли из космоса, 1984, 6, с. 69—77.

17. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И., Коваленко В. А. Звн-
симость между проективным покрытием и спектральными коэффициентами
яркости системы растительность — почва.— В кн.: Спектрофотометрические ис-
следования в почвоведении и геологии.— Л.: Изд. ЛГУ, 1984, с. 173—184.
18. Выгодская Н. Н., Горшкова И. И., Уханов А. С. Сравнение
рассчитанных по модели Гоудриана и измеренных спектральных коэффициентов
энергетической яркости сельскохозяйственных посевов.— Иссл. Земли из кос-
моса, 1987, № 1, с. 106—114.
19. Выгодская Н. Н., Фадеева Е. В., Горшкова И. И. Атлас
комплексных спектральных параметров.— Деп. ВИНТИ, № 5383-1386 от 22.07.
86. М., 1986.— 57 с.
20. Гойса Н. И., Олейник Р. Н., Рогаченко А. Д. Гидрометеоро-
логический режим и продуктивность орошаемой кукурузы.— Л.: Гидрометео-
издат, 1983.— 230 с.
21. Горшкова И. И. Оценка влияния яркости почвы на коэффициенты
спектральной яркости сельскохозяйственных посевов для территории Украины
и Молдавии.— Вест. МГУ, сер. V, геогр., 1985, № 4, с. 106—112.
22. Горшкова И. И. Влияние оптических свойств фитоэлементов на
яркость растительных сообществ.— Общая биология, 1986, т. XLVII, № 3,
с. 368—373.
23. Горшкова И. И., Труднева С. Н. Пространственная ориентация
листьев в посевах кукурузы и озимой пшеницы по материалам наблюдений
в Херсонской области.— Труды ГосНИЦИПР, 1983, вып. 13, с. 60—72.
24. Денисенко Е. А., Гаврилова Е. О. Дневная и сезонная дина-
мика ориентации листьев в фитоценозах.— В кн.: Исследование геосистем в це-
лях мониторинга.— М.: Изд. АН СССР, 1981, с. 107—115.
25. Ильчук Л. А., Ермолаева В. Н., Горшкова И. И. и др.
Дистанционная оценка сортовых различий картофеля по спектральным харак-
теристикам.— Плодоовощное хоз-во, 1985, № 8, с. 34—36.
26. Информационное обеспечение имитационных моделей состояния природ-
ных объектов для разработки методов тематической обработки данных дистан-
ционных измерений. Разработка технологии сбора опорных данных при экс-
плуатации АИИКов для сельскохозяйственных объектов, т. 1.— Фонды геогр.
ф-та МГУ, 1983.— 119 с.
27. Информационное обеспечение имитационных моделей состояния природ-
ных объектов для разработки методов тематической обработки данных дистан-
ционных измерений. Разработка информационного обеспечения имитационных
моделей состояния природных объектов.— Фонды геогр. ф-та МГУ, 1982.— 150 с.
28. Каневский В. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование
радиационного режима хвойного дерева методом Монте-Карло.— Препринт АН
ЭССР, Тарту, 1982.— 32 с.
29. Кондратьев Ю. М., Яковлев С. Г. Исследование вариаций отра-
жательных характеристик озимой пшеницы при полегании.— Труды Гос-
НИЦИПР, 1985, вып. 24, с. 41—45.
30. Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Федченко П. П.
Аэрокосмические исследования почв и растительности.— Л.: Гидрометеиздат,
1986.— 231 с.
31. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Влияние обработки на
спектральные отражательные свойства почвы.— Почвоведение, 1980, № 12,
с. 47—53.
32. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражатель-
ная способность и распознавание растительности.— Л.: Гидрометеиздат, 1982.—
216 с.
33. Кууск А. Эффект обратного блеска однородного растительного по-
крова.— Иссл. Земли из космоса, 1983, № 4, с. 90—99.
34. Молдау Х. А. Оптическая модель листа растения.— В кн.: Фитоак-
тинометрические исследования растительного покрова. Таллин: Валгус, 1967,
с. 89—109.
35. Мяги Х. Э., Росс Ю. К. Фитометрические характеристики и фото-
синтетическая продуктивность посева ячменя.— В кн.: Фотосинтетическая про-
дуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 83—143.

36. Нильсон Т. Расчет спектральных потоков коротковолновой радиации в растительном покрове.— В кн.: Режим солнечной радиации в растительном покрове. Тарту, 1968, с. 55—80.

37. Нильсон Т. Теория пропускания радиации неоднородным растительным покровом.— В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом. Тарту, 1977, с. 5—70.

38. Нильсон Т. Расчет эффекта обратного блеска для древостоев.— В кн.: Тезисы докл. XI Всес. сов. по актинометрии, ч. VII. Фитоактинометрия. Таллин, 1980, с. 117—120.

39. Нильсон Т. О приведении результатов измерения спектрального альбедо растительности к одинаковой высоте Солнца и влажности почвы.— В кн.: Тезисы докл. XI Всес. сов. по актинометрии, ч. VII. Фитоактинометрия. Таллин, 1980, с. 125—129.

40. Нильсон Т. А., Антон Я. А., Аплей В. Б. и др. Об оценке степени созревания зерновых культур дистанционными оптическими методами.— Иссл. Земли из космоса, 1982, № 1, с. 41—47.

41. Нильсон Т., Кууск А. Приближенные аналитические формулы для расчета коэффициентов спектральной яркости сельскохозяйственной растительности.— Иссл. Земли из космоса, 1984, № 5, с. 76—83.

42. Ничипорович А. А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах.— В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. М.: Изд. АН СССР, 1963, с. 5—36.

43. Обухов А. И., Орлов Д. С. Спектральная отражательная способность главнейших типов почв и возможности использования диффузного отражения при почвенных исследованиях.— Почвоведение, 1964, № 2, с. 83—89.

44. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1981.— 287 с.

45. Росс В. Определение фитомассы посевов.— В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 83—102.

46. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 344 с.

47. Росс Ю. К., Маршак А. Л. Расчет отражения солнечной радиации от растительного покрова методом Монте-Карло.— Исслед. Земли из космоса, 1984, № 5, с. 58—67.

48. Росс Ю. К., Нильсон Т. А. К теории радиационного режима растительного покрова.— В кн.: Исследования по физике атмосферы. Тарту, 1963, № 4, с. 42—64.

49. Росс Ю. К., Нильсон Т. А. Пространственная ориентация листьев в посевах и методика ее определения.— В кн.: Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966, с. 109—125.

50. Росс Ю., Росс В. Пространственная ориентация листьев в посевах.— В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 60—82.

51. Росс Ю., Росс В. Вертикальное распределение листовой поверхности в посевах.— В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 44—59.

52. Слепцова Т. Г. Характеристика общей адаптивности томатов в связи с различными типами устойчивости к фитофторозу.— Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. биол. наук. Кишинев, 1986.— 24 с.

53. ТИИЭР: Тематический выпуск. Дистанционное зондирование природных ресурсов из космоса. Пер. с англ.— 1985, т. 73, № 6.— 221 с.

54. Тимофеев Ю. В. Использование спектрофотометрической информации для оценки текущего состояния посева на конкретном поле.— В кн.: Радиационная климатология и прикладные аспекты актинометрии. Материалы XII сов. по актинометрии.— Иркутск, 1984, с. 187—191.

55. Тищенко А. П., Степанова Г. И. К вопросу о методике составления карт отражательной способности почвенного покрова.— Иссл. Земли из космоса, 1980, № 3, с. 34—39.

56. Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта.— Л.: Наука, 1974.— 252 с.

57. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 200 с.
58. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов.— Л.: Гидрометеиздат, 1984.— 264 с.
59. Фадеева Е. В. Теоретические оценки чувствительности комбинаций спектральных коэффициентов энергетической яркости к некоторым свойствам растительного покрова.— Вест. МГУ, сер. V, геогр., 1986, № 4, с. 75—79.
60. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв.— Л.: Гидрометеиздат, 1981.— 232 с.
61. Шульгин И. А. Морфофизиологические приспособления растений к свету.— М.: Изд. МГУ, 1963.— 74 с.
62. Шульгин И. А. Растение и Солнце.— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 251 с.
63. Яковлев С. Г., Доброзраков А. Д., Кондратьев Ю. М., Воякон С. Н. Вертолетный спектрометрический комплекс для подспутниковых экспериментов на полигонах изучения природных ресурсов Земли.— В кн.: Научное космическое приборостроение, 1983, вып. 2, с. 28—35.
64. Aase J. K., Siddoway F. H. Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements.— Remote Sens. Environ., 1981, v. 11, N 4, p. 264—277.
65. Aase J. K., Siddoway F. H., Millard J. P. Spring wheat leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and handheld radiometer measurements.— Int. J. Remote Sens., 1984, N 5, p. 771—781.
66. Allen W. A. Model of light penetration into a widerow crop.— Agron. J., 1974, v. 66, N 1, p. 41—47.
67. Allen W. A., Gayle T. V., Richardson A. J. Plant-canopy irradiance specified by the Duntley equations.— J. Opt. Soc. Am., 1970, v. 60, N 3, p. 372—376.
68. Allen W. A., Richardson A. J. Interaction of light with a plant canopy.— J. Opt. Soc. Amer., 1968, 58 (8), p. 1023—1031.
69. Badhwar G. D., Verhoef W., Bunnik N. J. J. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models.— Remote Sens. Environ., 1985, v. 17, p. 179—195.
70. Bartlett D. S., Klemas V. In situ spectral studies of tidal wetland grasses.— Photogr. Eng. and Remote Sens., 1981, v. 47, N 12, p. 1695—1707.
71. Blad B. E., Baker D. G. Orientation and distribution of leaves within a soybean canopy.— Agron. J., 1972, v. 64, N 1, p. 26—29.
72. Bowers S. A., Hanks R. J. Reflection of radiant energy from soil.— Soil Sc., 1965, v. 100, N 2, p. 130—138.
73. Bunnik N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties.— Wageningen, 1978.— 180 p.
74. Bunnik N. J. J. Review of models and measurements of multispectral reflectance by plant canopies: recommendations for future research.— Proc. SPIE, 1984, v. 475, p. 2—10.
75. Chance J. E., Le Master E. W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests.— Appl. Opt., 1977, v. 16, N 27, p. 407—412.
76. Chance J. E., Le Master E. W. Plant canopy light absorption model with application to wheat.— Appl. Opt., 1978, v. 17, N 16, p. 2629—2636.
77. Chance J. E., Le Master E. W. A test of Suits vegetative—canopy reflectance model with LARS soybean—canopy reflectance data.— Int. J. Remote Sens., 1985, v. 6, N 5, p. 665—672.
78. Chen J. The reciprocity relation for reflection and transmission of radiation by crops and other plane-parallel scattering media.— Remote Sens. Environ., 1983, v. 13, N 6, p. 475—486.
79. Chen J. Kubelka-Munk equations in vector-matrix form and the solution for bidirectional vegetative canopy reflectance.— Appl. Opt., 1985, v. 24, N 3, p. 376—382.

80. Cipra J. E., Frazmeier D. P. e. a. Comparison of multispectral measurements from some nonvegetated soils using Landsat digital data and a spectroradiometer.—*Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, v. 44, p. 80—84.
81. Collins W. Remote sensing of crop type and maturity.—*Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1978, v. 44, p. 43—45.
82. Colwell J. E. Vegetation canopy reflectance.—*Remote Sens. Environ.*, 1974, v. 3, p. 175—183.
83. Cooper K., Smith J. A., Pitts D. Reflectance of a vegetation canopy using the adding method.—*Appl. Opt.*, 1982, v. 21, N 22, p. 4112—4118.
84. Cowan J. R. The interception and absorption of radiation in plant stands.—*J. Appl. Ecology*, 1968, v. 5, p. 367—379.
85. Crist E. P., Cicone R. C. Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data.—*Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1984, v. 50, N 3, p. 343—352.
86. Crist E. P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data.—*Remote Sens. Environ.*, 1985, N 17, p. 301—306.
87. Curran P. J. Multispectral remote sensing for estimating biomass and productivity.—In: *Plants and the Daylight Spectrum*. London, Academic Press, 1981, p. 65—69.
88. Curran P. J., Williamson H. D. The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations.—*Int. J. Remote Sens.*, 1985, v. 6, N 10, p. 1637—1651.
89. Deering D. W., Rouse J. W. e. a. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data.—*Proc. 10th Int. Symp. Remote Sensing of Environ.*, 1975, v. 5, p. 1169—1178.
90. Duggin M. J. Likely effects of solar elevation on the quantification of changes in vegetation with maturity using sequential LANDSAT imagery.—*Appl. Opt.*, 1977, v. 16, N 3, p. 521—523.
91. Fukai S., Loomis R. S. Leaf display and light environment in row planted cotton communities.—*Agric. Meteorol.*, 1976, v. 17, p. 352—379.
92. Gates D. M. Biophysical ecology.—*Spring-Verlag*, N. Y., 1980.—611 p.
93. Gausman H. W. Visible reflectance, transmittance and absorbance of differently pigmented cotton leaves.—*Remote Sens. Environ.*, 1982, v. 3, p. 233—238.
94. Gausman H. W., Allen W. A. Optical parameters of leaves of 30 plant species.—*Plant Physiol.*, 1973, v. 52, N 1, p. 57—62.
95. Gausman H. W., Allen W. A. e. a. Reflectance distribution of cotton and corn at four stages.—*Agron. J.*, 1973, v. 65, N 2, p. 194—198.
96. Gausman H. W., Allen W. A., Wiegand C. L. e. a. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra and optical and geometrical parameters.—*USDA, Tech. Bull.*, 1973, N 14, p. 59—65.
97. Gerstl S. A. W., Zardecki A. Coupled atmosphere/canopy model for remote sensing of plant reflectance features.—*Appl. Opt.*, 1985, v. 24, N 1, p. 94—103.
98. Giovachini A., Mattioli L., Spallaci A. Multispectral data monitoring of temporal vegetation characteristics.—*Colloq. INRA*, 1984, N 23, p. 201—207.
99. Goudriaan J. Crop micrometeorology: a simulation study.—*Wageningen*, 1977.—250 p.
100. Hardisky M., Klemas V., Daiber F. Remote sensing salt biomass and stress detection.—*Adv. Space Res.*, 1982, v. 2, N 8, p. 219—229.
101. Hatfield J. L., Asrar G., Kanemasu E. T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance.—*Remote Sens. Environ.*, 1984, v. 14, p. 65—75.
102. Holben B. N., Schutt J. B., McMurtrey J. Leaf water stress detection utilizing thematic mapper bands 3, 4 and 5 in soybean plants.—*Int. J. Remote Sens.*, 1983, v. 4, N 2, p. 289—297.
103. Horler D. N. H., Barber J. e. a. Approaches to detection of geochemical stress in vegetation.—*Adv. Space Res.*, 1983, v. 3, N 2, p. 175—179.
104. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance.—*Int. J. Remote Sens.*, 1983, v. 3, N 2, p. 273—288.

105. Hunt G. R., Salisbury J. W. Visible and near infrared spectra of mineral and rocks. II. Carbonates.—*Mod. Geol.*, 1971, N 2, p. 23—30.
106. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, v. 23, N 5.
107. Isobe S. Preliminary studies of physical properties on plant communities.—*Bull. Nat. Inst. of Agricul. Sci., Ser. A.*, 1962, N 9, p. 29—66.
108. Isobe S. Theory of light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area.—*Bull. Nat. Inst. of Agricul. Sci., Ser. A*, 1969, N 16, p. 1—24.
109. Jackson R. D., Ezra C. E. Spectral response of cotton to suddenly indicated water stress.—*Int. J. Remote Sens.*, 1985, v. 6, N 1, p. 177—185.
110. Jackson R. D., Pinter P. J. e. a. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation and azimuth angle.—*Appl. Opt.*, 1979, v. 18, N 22, p. 3730—3732.
111. Jordan C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor.—*Ecology*, 1969, v. 50, p. 663—666.
112. Justice C. O., Townshend J. R. G., Holben B. N., Tucker C. J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data.—*Int. J. Remote Sens.*, 1985, v. 6, N 8, p. 1271—1318.
113. Kauth R. J., Thomas G. S. The tasseled-cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat.—*Proc. Symp. Machine Proc. of Remote Sens Data*, 6/29—7/2, LARS, Purdue, IEEE Cat., 1976, N 76, Ch. 1101-1 MPRSD, p. 41—51.
114. Kimes D. S., Kirchner J. A. Irradiance measurement errors due to the assumption of a Lambertian reference panel.—*Remote Sens. Environ.*, 1982, v. 12, p. 141—149.
115. Kimes D. S., Kirchner J. A. Diurnal variations of vegetation canopy structure.—*Int. J. Remote Sens.*, 1983, v. 4, N 4, p. 257—271.
116. Kimes D. S., Smith J. A., Ranson K. J. Vegetation reflectance measurements as a function of solar zenith angle.—*Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1980, v. 46, N 46, p. 1563—1573.
117. Kollenkark J. C., Vanderbilt V. C. e. a. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance.—*Appl. Opt.*, 1982, v. 21, N 7, p. 1179—1184.
118. Leamer R. W., Noriega J. R., Wiegand C. L. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars.—*Agron. J.*, 1978, N 70, p. 113—118.
119. Le Master E. W., Chance J. E. Further tests of Suits reflectance model.—*Proc. 11th Int. Symp. on Remote Sens. Environ.*, Univ. Michigan, Ann. Arbor, 1978, N 1, v. 1, p. 703—716.
120. Le Master E. W., Chance J. E., Wiegand C. L. A seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat.—*Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1980, v. 46, N 1, p. 107—144.
121. Lemeur R. A. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data.—*Agric. Met.*, 1973, v. 12, p. 229—247.
122. Lemeur R. A., Blad B. L. A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies.—*Agric. Met.*, 1974, v. 14, p. 255—286.
123. Markham B. L., Kimes D. S. e. a. Temporal relationships between spectral response and agronomic values of a corn canopy.—*Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1981, v. 47, N 11, p. 1599—1605.
124. Norman J. M., Jarvis P. G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong. Carr.) Carr.). Y. Radiation penetration theory and test case.—*J. Appl. Ecol.*, 1975, v. 3, N 3, p. 839—878.
125. Odenweller I. B. Crop identification using Landsat temporal spectral profiles.—*Remote Sens. Environ.*, 1984, v. 14, N 1—3, p. 39—54.
126. Park J. K., Deering D. W. Simple radiative transfer model for relationships between canopy biomass and reflectance.—*Appl. Opt.*, 1984, N 21, p. 303—309.
127. Pinter P. J., Jackson R. D. e. a. Diurnal patterns of wheat spectral reflectances.—*IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sens.*, 1983, v. 21, N 2, p. 156—162.

128. Pollock R. B., Kanemasu E. T. Estimating leaf-area index of wheat with Landsat data.— *Remote Sens. Environ.*, 1979, v. 8, N 4, p. 307—312.
129. Richardson A. J., Wiegand C. L. Distinguishing vegetation from soil background information.— *Photogr. Eng. and Remote Sens.*, 1977, v. 43, N 12, p. 1541—1552.
130. Schutt J. B., Kimes N. S., Newcomb W. W. Effect of heliotropism on the bidirectional reflectance of irrigated cotton.— *Remote Sens. Environ.*, 1985, v. 17, p. 13—25.
131. Schutt J. B., Rowland R. R., Hertly W. H. A laboratory investigation of a physical mechanism for the extended infrared absorption ("red shift") in wheat.— *Int. J. Remote Sens.*, 1984, v. 5, N 1, p. 95—102.
132. Sinclair T. R., Hoffer R. M., Schreiber M. M. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season.— *Agron. J.*, 1971, v. 63, N 6, p. 864—868.
133. Smith J. A., Oliver R. E. Plant canopy models for simulating composite scene spectroradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer region.— *Proc. 8th Int. Symp. Remote Sens. Environ.*, Univ. Mich., Ann. Arbor, Mich., 1972, v. 2, p. 1333—1353.
134. Steven M. D. Reflection in the red and near infrared bands by healthy and stressed crops.— *Proc. 9th Ann. Conf. Remote Sens. Soc.*, 1983, p. 152.
135. Stoner E. R., Baumgardner M. F. et al. Atlas of soil reflectance properties.— *LARS Techn. Rep. 111579*. Purdue Univ., 1980.— 94 p.
136. Stoner E. R., Baumgardner M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soil.— *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1981, v. 45, p. 1161—1165.
137. Suits G. H. The calculation of directional reflectance of a vegetative canopy.— *Remote Sens. Environ.*, 1972, N 2, p. 117—125.
138. Suits G. H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetative canopies.— *Remote Sens. Environ.*, 1972, N 2, p. 175—182.
139. Suits G. H. Extension of a uniform canopy reflectance model to include row effects.— *Remote Sens. Environ.*, 1983, N 13, p. 113—129.
140. Suits G. H., Safir G. R. Verification of reflection model for mature corn with application to corn blight detection.— *Remote Sens. Environ.*, 1972, v. 2, N 3, p. 183—192.
141. Tanaka S. Estimation of sunlit leaf in tobacco plant community by the Monte-Carlo method. Estimation on direct sunlight.— In: *Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III. Experiments*. Tokyo, 1968, p. 76—79.
142. Thomas J. R., Gausman H. W. Leaf reflection vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops.— *Agron. J.*, 1977, v. 69, N 5, p. 799—802.
143. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.— *Remote Sens. Environ.*, 1979, v. 8, N 2, p. 127—150.
144. Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model.— *Remote Sens. Environ.*, 1984, v. 16, N 2, p. 125—141.
145. Verhoef W. Earthobservation modelling based on layer scattering matrices.— *Remote Sens. Environ.*, 1985, v. 17, N 2, p. 165—178.
146. Verhoef W., Bunnik N. J. J. Influence of crop geometry on multi-spectral reflectance, determined by the use of canopy reflectance models.— In: *Proc. Int. Col. Signatures of Remotely Sensed Objects*, 1981, p. 273—290.
147. Wardley N. W., Curran P. J. The estimation of greenleaf area index from remotely sensed airborne multispectral scanner data.— *Int. J. Remote Sens.*, 1984, v. 5, N 4, p. 671—679.
148. de Wit C. T. Photosynthesis of leaf canopies.— *Agric. Res. Rep.*, Wageningen, 1965, N 663, p. 1—57.
149. Wooley J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves.— *Plant Physiol.*, 1971, v. 47, p. 656—662.
150. Wong C. L., Blevin W. R. Infrared reflectance of plant leaves.— *Austral. J. Biol. Sci.*, 1967, v. 20, p. 501—508.

Предметный указатель

Альbedo 9—11, 19, 24, 82, 97, 98, 112, 115, 144, 145, 164, 183

Вегетационные индексы 142, 151—163, 186—194, 209—214, 220—224, 232—236

Вегетационный ход фитометрических параметров 215—217, 221—224

Высота Солнца 16, 23, 51, 97, 98, 133—142, 147, 207, 209

 эффективная 144, 145, 147

Густота посева 61—68, 78, 80, 86, 89, 92, 166, 202, 216

Индикатриса рассеяния 9, 11—14, 18, 21, 23, 25, 49, 51, 138, 143, 150, 151, 170, 191, 195

Коэффициент вариации 28, 35, 38, 44, 48, 51, 168

 корреляции 29, 62, 74, 76, 191—193, 202, 233

 сопряженности 27, 28, 229

Коэффициент спектрального отражения почвы 10—12, 22, 23, 49

 влияние влажности 51, 55—57

 гумуса 50—55

 железа 50, 54, 55

 солей 50, 51, 54—56

 структуры 50, 51, 55—57

 текстуры 50, 51, 53—55

 дневной ход 51, 52, 55, 57

 классификация 52—55, 57

Коэффициент спектрального отражения фитозлементов 10—12, 19, 22—24, 59, 165, 178, 182

 влияние засоления 39—41

 обводненности 26, 28, 29, 30, 34, 37, 39, 47, 48

 пигментов 25—32, 34, 37, 39, 41, 48

 почвенного плодородия 39—43, 48

 структуры тканей 25, 26, 29, 30, 32—34, 39, 41, 47

 фенологического развития 26, 32—34, 36, 41, 48, 74, 176

 фитопатологического состояния 26, 33, 36—38, 48, 209

 группировка видов 43—47, 49

 комбинации 27, 28, 31, 37, 44, 47, 48

Коэффициент спектрального пропускания фитозлементов 10—12, 19, 22—25, 29, 47—49, 59, 101, 106, 107, 114, 122, 131, 137, 138, 178

Коэффициент спектральной энергетической яркости

 влияние оптических свойств фитозлементов

 непрозрачные фитозлементы 101—106

 прозрачные фитозлементы 106—109

 и отражения почвы 102—106, 108, 109

 и структуры растительного покрова 102—106, 108, 109

влияние относительной поверхности фитозлементов

 непрозрачные фитозлементы 119—121, 123, 124, 203

 прозрачные фитозлементы 121—124, 197, 198

 пороговые значения оптических свойств фитозлементов и почвы 119—124

 отражательные свойства почвы 121—124, 197, 198

 максимально возможные изменения 121, 203

 факторы 117—119

влияние отражательных свойств почвы и оптические свойства фитозлементов 113, 115

 и относительная поверхность фитозлементов 113—115

 и пространственная ориентация 113, 114

влияние пространственной ориентации фитозлементов

 и относительная поверхность фитозлементов 128—131

 и отражательные свойства почвы 128—132

 пороговые значения оптических свойств фитозлементов и почвы 130, 131

 и соотношения площадей затененных и освещенных участков почвы и растительности 127

 и способа задания ориентации 126

влияние соотношения площадей видимых участков почвы и растительности 114, 117—121, 125, 127, 128

 затененных участков почвы и растительности 114, 117—119, 121, 125, 127, 131, 135, 137, 182, 208

 освещенных участков почвы и растительности 114, 117—119, 121, 127, 129, 131, 135, 137, 208

влияние условий освещения

 высоты Солнца 133—142, 147, 207, 209

 амплитуда дневного хода 134, 135, 138, 142, 143, 153

 и оптические свойства фитозлементов и почвы 136—142

 и относительная поверхность фитозлементов 136—142

 и пространственная ориентация 138—142

 соотношения прямой и рассеянной радиации 143—147, 198

 почвы 50—52, 56, 57, 119, 165

 в посевах 57, 165, 174, 181

 практические рекомендации 196—215

 растительного покрова 10—13, 22, 23, 33, 44, 70, 82, 92, 97, 100

 экспериментальные данные 165—173, 176, 177, 179—184

- Метод Монте-Карло 14, 15
- Модели радиационного режима
 обращение 15, 196
 описание 7—23
 сопоставление с экспериментом 15, 18, 166—195, 220, 229
 сравнение 15—19, 23, 147—151, 163
- Номограммы 103, 109, 110, 119, 130, 132, 137, 139, 196, 203
- Оптическая толщина растительного покрова 135, 136, 178
- Ориентация фитоэлементов 10—12, 16, 18, 20—21, 81
 влияние сорта 23, 86—90, 92
 условий произрастания 88, 92, 93
 изменчивость временная 87, 89—93, 167, 183
 определение в полевых условиях 85, 86, 90, 92, 165, 185
- Относительная поверхность фитоэлементов 10—12, 16, 20—23, 53
 изменчивость временная 73—79, 81, 91, 216
 пространственная 61—68, 77, 81, 83, 84, 229
 коэффициент вариации 63, 65, 67, 76
 максимальная 72—74, 76, 80, 81
 определение в полевых условиях 60—63, 68—71, 166, 176, 185
 оптимальная 72, 73, 81
- Полевание 13, 33, 86, 93, 111, 126, 133, 170, 171, 191, 201, 202, 207, 209
- Проективное покрытие 58, 66, 68, 69, 88, 92, 94, 95, 102—105, 111, 114, 118, 121, 127, 151, 154, 155, 157, 195, 197, 204
- Распознавание посевов разных культур 44, 47, 48, 91, 111, 117, 119, 122, 198, 199, 206, 207, 216—221
 разных состояний 38, 61, 75, 76, 119, 122, 125, 133, 142, 196, 197, 205, 206, 224—235
- Спектральный контраст 105, 109, 111, 112, 121, 128, 131, 133, 137, 138, 144, 147, 201, 206, 218, 219, 226, 227
 профиль 217—220, 223, 231, 233
- Спектрофотометры 25, 71, 164, 165
- Средний зеленый лист 43—49, 155
- Типы выборок 64—68
 пространственного размещения 8, 9, 13, 94—97, 178, 183, 184, 195
- Угловое распределение яркости небосвода 9, 21, 22, 97—99, 143, 144
 радиации, рассеянной слоем растительности 128, 129
- Удельная поверхностная плотность листьев 69—70
- Фенологический календарь 98, 215—217, 223, 232
- Фитомасса 64, 65, 68, 73, 116, 151, 165, 201, 232—234
- Функция переходная 62, 65, 70, 74, 76, 202
 приведения 101, 113, 116, 138, 144, 145, 202
 пространственной ориентации дифференциальная 20, 21, 82—93, 126, 165, 215
 интегральная 20, 21, 83—85, 89—91, 93, 94, 126
- Яркость теней 115, 128, 131, 135

Оглавление

Предисловие	3
Основные сокращения и обозначения	4
Введение	5
1. Модели отражения радиации системы растительность—почва	7
1.1. Краткая характеристика моделей	—
1.2. Описание модели Гюдриана	19
2. Изменчивость значений входных параметров модели в природе	24
2.1. Оптические свойства отдельных фитоэлементов	—
2.2. Отражательные свойства почв	49
2.3. Относительная поверхность фитоэлементов	58
2.4. Пространственная ориентация фитоэлементов	81
2.5. Условия освещения	97
3. Теоретические оценки влияния входных параметров модели на яркостные характеристики системы растительность—почва	100
3.1. Общие замечания	—
3.2. Влияние оптических свойств отдельных фитоэлементов	101
3.3. Влияние отражательных свойств почвы	111
3.4. Влияние относительной поверхности фитоэлементов	116
3.5. Влияние пространственной ориентации фитоэлементов	124
3.6. Влияние высоты Солнца	133
3.7. Влияние соотношения прямой и рассеянной радиации	143
3.8. Сравнение результатов численных экспериментов, выполненных по разным моделям отражения	147
3.9. Зависимость комбинаций СКЯ от входных параметров модели	151
4. Проверка адекватности модели Гюдриана	164
4.1. Общие замечания	—
4.2. Сравнение теоретических и экспериментальных тенденций изменения СКЯ сельскохозяйственных посевов	166
4.3. Сравнение расчетных и измеренных значений СКЯ	173
4.4. Сопоставление тенденций изменения расчетных и измеренных комплексных спектральных индексов	186
4.5. Оценка адекватности различных математических моделей отражения	194
5. Использование результатов моделирования для решения практических задач дистанционных исследований растительных объектов	196
5.1. Восстановление отдельных параметров растительного покрова	—
5.2. Теоретические оценки возможности распознавания посевов сельскохозяйственных культур	215
Заключение	237
Список литературы	238
Предметный указатель	245

Content

Preface	3
List of main symbols	4
Introduction	5
1. Reflectance models of the "vegetative—soil" system	7
1.1. Brief review models	—
1.2. Goudriaan model description	19
2. Variability of model inputs values in nature	24
2.1. Optical properties of individual phytoelements	—
2.2. Reflective properties of soils	49
2.3. Relative surface area of phytoelements	58
2.4. Spatial orientation of phytoelements	81
2.5. Illumination conditions	97
3. Theoretical estimates of model inputs influence of reflectance features of "vegetation—soil" system	100
3.1. General remarks	—
3.2. Influence of individual phytoelements optical properties	101
3.3. Influence of soil reflective properties	111
3.4. Influence of phytoelements relative surface area	116
3.5. Influence of phytoelements spatial orientation	124
3.6. Influence of solar elevation	133
3.7. Influence of direct and diffuse radiation portion into illumination flux	143
3.8. Comparison of results of numerical experiments on different models	147
3.9. Dependence of spectral reflectances combinations on model inputs	151
4. Goudriaan model verification	164
4.1. General remarks	—
4.2. Comparison between theoretical and experimental tendencies of crops spectral reflectances modification	166
4.3. Comparison between predicted and measured spectral reflectances values modification	173
4.4. Comparison with tendencies of predicted and measured vegetation indexes modification	186
4.5. Assessment of different reflectance models adequacy	194
5. Modelling results application for solution of practical tasks of vegetation remote sensing	196
5.1. Plant canopy parameters estimation	—
5.2. Theoretical assessment of crop recognition possibility	215
Conclusion	237
Bibliography	238
Subject Index	245