

Академия наук СССР

**ЛАЗЕРНОЕ
ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ**



ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR
MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY

LAZER
REMOTE
SENSING
OF VEGETATION

Editor-in-chief: V. A. Roumyantsev

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

ЛАЗЕРНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Ответственный редактор В. А. Румянцев

Кондратьев К. Я., Каневский В. А., Росс Ю. К., Поздняков Д. В., Рязанцев В. Ф., Федченко П. П. Лазерное дистанционное зондирование растительности. — Л.: 1987. — 168 с., илл.

В монографии в едином контексте обсуждаются два основных, тесно связанных между собой вопроса: дистанционное лазерное зондирование высшей наземной растительности и фитоценозов внутренних водоемов и принципы построения и технические характеристики лидарных комплексов, используемых для указанных целей. Значительное внимание уделено анализу подготовительных лабораторных исследований, физико-теоретическим вопросам методологии лазерного зондирования растительных организмов и разработке статистических моделей, положенных в основу оптимизации практической реализации этого метода.

Монография предназначена специалистам, работающим в области экологии окружающей среды и прежде всего занимающимся разработкой и применением методов дистанционного мониторинга в решении народно-хозяйственных и природоохранных задач.

Библ. 221 назв. Ил. 81. Табл. 16.

The monograph deals with the two basic, closely related problems: (i) the laser sensing of land high vegetation and phytocenoses of inland waters; (ii) the constructive and technical characteristics of the applied lidar complexes. Emphasis is placed on analysis of preparatory laboratory studies, physico-theoretical aspects of the laser sounding of plants, as well as the development of statistical models which form the basis for the optimal practical realization of this technique.

The monograph is meant for the specialists in the field of environmental ecology and, first of all, for those dealing with the development and application of remote sensing techniques to solve the problems in economy and environmental protection.

Утверждено к печати Институтом озераведения АН СССР и
Научным советом по космическим исследованиям для народ-
ного хозяйства МКС АН СССР

Редакционно-выпускающая группа:
Л. С. Александрова, Л. Ф. Барышева,
Д. В. Поздняков

Сдано в набор 04.12.86. Подписано к печати 10.08.87. М-17248.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 1 офсетная. Гарнитура литератур-
ная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,1. Усл. кр.-отт. 14,7. Уч.-изд. л.
14,9. Тираж 800. Тип. зак. 155. Цена 1 р. 50 к. Фабрика «Детская
книга» № 2 Росглавополиграфпрома Государственного комитета
РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193036, Ленинград, 2-я Советская, 7.

ВВЕДЕНИЕ

В основе дистанционных методов исследования растительности лежит всестороннее изучение механизмов взаимодействия электромагнитного излучения оптического диапазона с геометрической и пигментной структурой растений. При этом в качестве источника излучения, как правило, выступает Солнце. Рассеяние света геометрической структурой (архитектоникой) растительного покрова (РП) — это макроуровень трансформации энергии Солнца, а поглощение света пигментной системой растений для использования его в процессе фотосинтеза — это клеточный микроуровень. Получение оперативной информации о взаимодействии световой энергии с растительностью на микро- и макроуровнях в реальных природных условиях открывает большие возможности для решения важных прикладных задач сельского и лесного хозяйства, геологии, охраны окружающей среды, океанологии.

До последнего времени методическую основу решения задач дистанционного зондирования РП составляли экспериментальные исследования отражательных и излучательных свойств растительности, при этом в качестве основного измеряемого параметра выступал коэффициент спектральной яркости (КСЯ) [1, 2].

Этот интегральный оптический параметр определяется большим числом оптических и геометрических характеристик системы растительность — почва и условиями освещенности. Поэтому методы определения какого-то одного параметра растительности (биомасса, проективное покрытие и т. п.) по данным измерений КСЯ представляют собой сложную и неоднозначную задачу. В связи с этим разработка новых, более однозначных методов, позволяющих дифференциально учитывать вклад различных параметров РП в измеряемую приборами величину, представляется важнейшей задачей дистанционных методов.

Развитие методов статистического моделирования (методов Монте Карло) переноса излучения в РП позволило перейти от моделирования РП слоем мутной жидкости к представлению растительности существенно дискретной средой, состоящей из листьев конечных размеров. Это позволило исследовать особенности механизма рассеяния света растениями, выявить особые направления индикатрисы рассеяния и обосновать целесообразность развития лазерных методов измерения индикатрис в этих направлениях для оценки геометрического строения РП [3, 4].

Успехи, достигнутые в лабораторных исследованиях люминесцентных характеристик растений [5, 6], и достижения лазерной техники послужили толчком для развития дистанционных люминесцентных методов изучения растительности [7, 8] с целью получения информации о физиологическом состоянии растений — качественно новом виде дистанционной информации.

Таким образом, активные методы зондирования РП Земли в оптическом диапазоне выдвигаются на первое место в дистанционных исследованиях растительности.

Глава 1.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРХИТЕКТониКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Дистанционные измерения геометрических параметров РП (индекс листовой поверхности, проективное покрытие, ориентация листьев) необходимы для получения оперативной информации о фазе развития растений, их биомассе, для правильной интерпретации изображений РП, получаемых с борта летательных аппаратов.

Пассивные спектрометрические методы, используемые до последнего времени для решения перечисленных задач, не позволяют достигнуть удовлетворительной точности измерений. Основной причиной этого является зависимость данных дистанционных спектрометрических измерений РП от многих внешних параметров: прозрачности атмосферы, угла наклона Солнца, экологических условий произрастания и т. п. В коэффициенте спектральной яркости (КСЯ) помимо информации о геометрии РП содержится еще информация не менее, чем о десятке других физических параметров среды обитания растений. Поэтому повышение однозначности метода определения геометрических параметров РП является актуальной задачей дистанционных исследований.

Для разработки такой новой методики необходимо глубокое теоретическое исследование процессов переноса электромагнитного излучения в РП с привлечением самых современных методов математического моделирования.

1.1. Теоретические основы процесса взаимодействия световой энергии с геометрической структурой растительности

1.1.1. Модель мутного слоя

Создание количественной теории переноса радиации в РП усложняется тем обстоятельством, что РП обладает сложной дискретной геометрической структурой (архитектоникой), не имеющей аналогов в известных физических задачах переноса излучения в жидких, газообразных и твердых средах. Поэтому в качестве первого приближения К. С. Шифрин выдвинул идею

применения теории переноса радиации в мутной среде для описания потоков радиации в РП подобно тому, как это делается в астрофизике и физике атмосферы [9]. В этом случае РП рассматривается как мутная среда, но из-за того, что рассеивающими элементами являются листья конечных размеров, мы не имеем права автоматически переносить математический аппарат, разработанный для описания переноса радиации в мутной среде на РП. Развитие идей К. С. Шифрина позволило Ю. К. Россу и его сотрудникам выдвинуть уточненную и обобщенную модель РП как мутной среды, согласно которой РП представляется пластинчатой мутной анизотропной средой, статистически горизонтально однородной [10]. В этой модели фитоэлементы представляют собой маленькие кусочки поверхности листьев, стеблей и других надземных органов растений, размещенных случайно в горизонтальных слоях и ориентированных в пространстве по заданному статистическому закону. Модифицированное уравнение переноса радиации в такой пластинчатой среде имеет вид:

$$\Delta i(P, \mathbf{r}) \cdot r = U_L(P) G(P, \mathbf{r}) i(P, \mathbf{r}) + U_L(P) \eta(P, \mathbf{r}) + \int_{4\pi} \frac{1}{\pi U_L(P)} \Gamma_L(P, \mathbf{r}, \mathbf{r}') i(P, \mathbf{r}') d\Omega' \quad (1),$$

где $G(P, \mathbf{r})$ — проекция единичной площади листьев на направление $\mathbf{r}$;

$U_L(P)$ — плотность листовой поверхности;

$\Gamma_L(P, \mathbf{r}, \mathbf{r}')$ — индикатриса рассеяния пластинчатой среды;

$\eta(P, \mathbf{r})$ — коэффициент излучения пластинчатой среды, отнесенный к единице объема.

Отличительной чертой основных радиационных характеристик, входящих в уравнение переноса лучистой энергии, является их зависимость не только от координаты среды P , но и от направления $\mathbf{r}$, что подчеркивает оптическую анизотропию пластинчатой среды.

Предполагается, что все функции, входящие в уравнение переноса (1), являются непрерывными по входящим в них переменным. Это предположение является одним из слабых мест модели — экспериментальные данные говорят об обратном: наблюдается скачкообразное и нерегулярное изменение функций $U_L(P)$ и $G(P, \mathbf{r})$ при изменении координаты P . Отсюда можно сделать вывод о том, что эти функции являются статистически случайными величинами. Но если мы в качестве первого приближения попробуем пренебречь статистическим характером и оперировать осредненными величинами, то учитывая тот факт, что лучистая энергия Солнца падает на РП, в основном, сверху, и наибольшие изменения радиации происходят в вертикальных направлениях, наиболее правильно будет провести осреднение в горизонтальной плоскости. В этом случае, входящие в уравнение переноса функции зависят только от вертикальной координаты z .

Следующим слабым местом при выводе модифицированного уравнения переноса лучистой энергии является предположение

о том, что, с одной стороны, отсутствует взаимное затенение между пластинками среды в достаточно малом объеме, а, с другой стороны, — выдвигается требование о достаточно большом числе пластинок внутри этого малого объема, что абсолютно необходимо для задания функций $U_L(P)$ и $G(P, r)$ с любой степенью точности. Нетрудно заметить, что это предположение выполняется достаточно хорошо для вертикального и близких к нему направлений, когда взаимное затенение листьев мало, но с приближением к горизонтальному направлению предположение об отсутствии взаимного затенения можно считать неверным. Если все же смириться с недостатками моделирования РП мутным слоем и получить решения уравнения переноса (1), то для целого ряда случаев результаты моделирования неплохо согласуются с экспериментальными данными.

Решение интегродифференциального уравнения (1) сталкивается с целым рядом трудностей, связанных, во-первых, с тем, что аргументом индикатрисы рассеяния мутного слоя $1/\pi\Gamma_L(P, r, r')$ является не угол между падающим и отраженным лучами r, r' , как обычно, а сами направления $\vec{r}$ и $\vec{r}'$, как самостоятельные аргументы, и, во-вторых, с тем, что функция $G(P, r)$ зависит от направления $\vec{r}$.

Эти обстоятельства предполагают анизотропность РП как мутной среды и для решения уравнения (1) не удастся выполнить разложение индикатрисы $1/\pi\Gamma_L(P, r', r)$ в ряд по полиномам Лежандра, чтобы перейти к независимой от направления оптической толщине, равной $\int_p K(z) dz$, где p — плотность мутного слоя, а $K(z)$ — массовый коэффициент ослабления.

Учитывая перечисленные выше трудности, возникает потребность в применении численных методов решения уравнения (1) на ЭВМ и получении приближенных решений. Наиболее распространенным численным методом является метод последовательных приближений [11] и метод сеток [12]. Для получения точных аналитических решений уравнения переноса необходимо сделать ряд допущений и упрощений, позволяющих получить точные решения для отдельных случаев. Основные допущения следующие:

1. Отсутствие многократного рассеяния. Это оправдано для области фотосинтетически активной радиации (ФАР) и позволяет устранить интегральные члены уравнения (1), сведя его к дифференциальному уравнению.

2. Предположение изотропности дополнительного поля рассеянной радиации (приближение Шварцшильда). Это выполняется для случая горизонтальных матовых листьев.

Применение аналитических и численных методов решения интегродифференциального уравнения переноса позволяет рассчитать радиационное поле прямой и рассеянной небом солнечной радиации внутри и вне РП, как в случае однократного рассеяния фотонов (ФАР), так и в случае многократного рассеяния ближней инфракрасной радиации (БИКР).

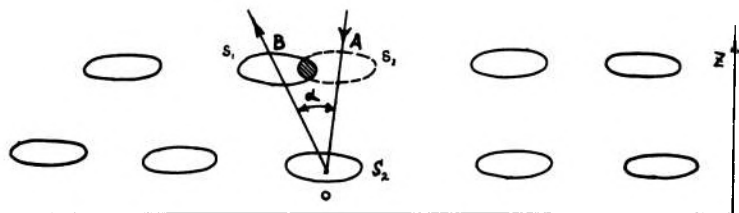


Рис. 1. Взаимодействие фотона Солнечной радиации с растительным покровом, состоящим из взаимодействующих листьев конечных размеров. $\vec{AO}$ — направление падения фотона; $\vec{OB}$ — направление рассеяния; S_1, S_2 — пара взаимодействующих листьев (косой штриховкой обозначена площадь перекрытия поверхности листьев).

Описанная выше количественная теория переноса лучистой энергии Солнца в РП основана на предположении о горизонтальной однородности мутного слоя, которым моделируется РП.

При этом пренебрегается тем фактом, что РП состоит из отдельных растений, между которыми есть свободное от фитоэлементов пространство: редкий лес, кустарник, посевы кукурузы и хлопчатника в ранний период развития. Применение в этом случае к РП модели однородного плоскопараллельного мутного слоя может привести к значительным ошибкам при расчете радиационного поля.

Возникшие сложности стимулировали развитие нового подхода в математическом моделировании радиационного режима РП. Новый подход заключался в моделировании РП геометрическими фигурами — шарами, цилиндрами, эллипсоидами вращения, конусами и т. п., для которых были заданы: закон размещения в пространстве, характерные геометрические размеры, пропускательные и отражательные свойства. При этом предлагается рассматривать РП как совокупность «мутных объемных элементов».

«Мутный объемный элемент» может соответствовать, например, кроне отдельного дерева. «Объемный элемент» заполняется чередующимися вертикальными столбами мутной среды с просветами между ними, что имитирует просветы в кроне. Энергообмен внутри столбов мутной среды осуществляется по законам оптики мутных сред, а в просветах внутри кроны и между кронами — по законам геометрической оптики.

По предложенной модели рассчитаны вертикальное распределение восходящих и нисходящих потоков суммарной солнечной радиации, инфракрасной (тепловой) радиации и радиационный баланс, а также альбедо РП. Результаты расчета хорошо согласуются с данными натурных измерений в случае лесной растительности [14]. Однако и в рамках этого подхода не представляется возможным корректно рассчитать угловую структуру поля отраженной от РП радиации, что представляет особый интерес для задач дистанционного зондирования. Одна из основных причин этого — неучет статистической зависимости прозрачности РП в направлениях падения и отражения солнечного излучения.

Первые попытки преодоления этой трудности были предприняты Нильсоном. В его модели [15] используются иные входные параметры архитектуры РП по сравнению с теми, что использовались для решения интегродифференциального уравнения переноса лучистой энергии в приближении РП плоскопараллельным мутным слоем. Так, помимо направления визирования $\vec{r}$, пропускание радиации РП, моделируемое отдельными геометрическими фигурами, определяется:

- 1) формой и размерами крон отдельных деревьев;
- 2) густотой стояния и характером размещения деревьев;
- 3) прозрачностью (ажурностью) кроны отдельного дерева;
- 4) характером взаимного затенения крон.

При этом доля просветов $m_a(z, r)$ при визировании верхней полусферы в любом заданном направлении $\vec{r}$ на высоте z определяет вероятность видимости неба в направлении $\vec{r}$ и является важнейшей характеристикой пропускания как прямой, так и рассеянной радиации. Эта характеристика РП в дальнейшем широко используется для теоретических расчетов процесса взаимодействия лазерного луча с архитектурой растений.

Если:

Θ — зенитный угол солнца;

$S(z, r)$ — площадь проекции модельного дерева под углом Θ , расположенной на горизонтальной плоскости на высоте z ;

$P_i(S)$ — вероятность наличия i стволов на площади S ;

$a_i(z, r)$ — вероятность видеть небо сквозь i крон сразу;

$a_1(z, r)$ — ажурность одной кроны, то для вероятности $m_a(z, r)$ видеть небо в направлении r на высоте z можно записать следующее выражение

$$m_a(z, r) = 1 \cdot P_0(S) + a_1 P_1(S) + a_2 P_2(S) + \dots \quad (2)$$

При этом учитываются отдельно как межкроновые просветы $P_0(S)$, так и внутрикроновые a_i . Применение описанной модели наиболее целесообразно в случае несомкнутых РП с густыми, малопрозрачными кронами. В этом случае обеспечивается быстрая сходимость ряда (2). Для сомкнутых РП пропускание радиации определяется, в основном, внутрикроновыми просветами (P_0 — мала) и в этом случае целесообразно применять модель однородного РП. Следует также отметить, что параметры, входящие в уравнение (2), определяются более легко, чем листовой индекс и угловое распределение нормалей фитоэлементов для уравнения (1). В данном подходе распределение нормалей и листовой индекс заменены параметром ажурности кроны a_1 для различных углов визирования.

Рассматриваемый теоретический подход позволяет произвести оценку целого ряда важных статистических характеристик прозрачности растительного полога. Знание хотя бы двоякого грубых оценок некоторых статистических характеристик (дисперсия, радиусы угловой и пространственной корреляции) коэффициентов пропускания прямой и рассеянной радиации дает возможность экс-

периментатору проводить как наземные, так и дистанционные измерения, избегая статистической зависимости результатов.

Так, построение угловых автокорреляционных функций прозрачности РП на фиксированных альмукантаратах [16] дает возможность оценить статистическую зависимость прозрачности полога в двух направлениях от разности азимутов визирования, а пространственные автокорреляционные функции прозрачности в горизонтальной и вертикальной плоскостях позволяют оценить статистическую зависимость показаний нескольких приемников радиации, удаленных друг от друга на некоторое расстояние. Оценка такой статистической зависимости оказалась чрезвычайно важной для разработки активных методов зондирования РП с помощью лазерных систем с двумя пространственно-разнесенными приемными каналами [17].

Описанные статистические характеристики межкроновой прозрачности полога необходимы также при расчетах отражения радиации от РП. Если в модели мутного слоя направления падения радиации на слой и направления обратного рассеяния (направление «обратного блеска») статистически независимы, то при новом рассмотрении имеет место полная статистическая зависимость указанных направлений, что обуславливает скачок в индикатрисе рассеяния в области обратного блеска. Основываясь на методах оценки статистических характеристик прозрачности полога в различных направлениях, можно ввести поправку в расчеты отражения радиации от РП за счет статистической зависимости направлений падающей и отраженной радиации в области обратного блеска [18]. Явление «обратного блеска», таким образом, может получить количественную оценку, чего не удавалось сделать в рамках модели плоскопараллельного бесконечного мутного слоя.

Дальнейшее развитие теоретические исследования по статистической зависимости различных направлений переноса излучения в РП получили в работах Кууска. При этом РП моделируется мутной средой, состоящей из маленьких тонких пластинок, заполняющих бесконечный слой. Статистическая зависимость прозрачности слоя в двух направлениях визирования учитывается с помощью корреляционной функции, построенной на основе специальной индикаторной функции, которая принимает значение 1 при наличии просвета и значение 0 при наличии пластины на линии визирования [19]. Развитый в работе математический формализм позволяет в принципе учитывать анизотропию индикатрисы рассеяния в области обратного блеска в случае однократного рассеяния. Однако и в этом случае используемая модель далека от реальной архитектуры растительности.

Приведенный выше краткий обзор математических моделей, основанных на представлении РП мутной пластинчатой средой вскрывает общие для них существенные недостатки:

- 1) предположение о пуассоновском распределении фитоэлементов, что не учитывает реальную архитектуру;
- 2) пренебрежение реальными размерами листа — в моделях

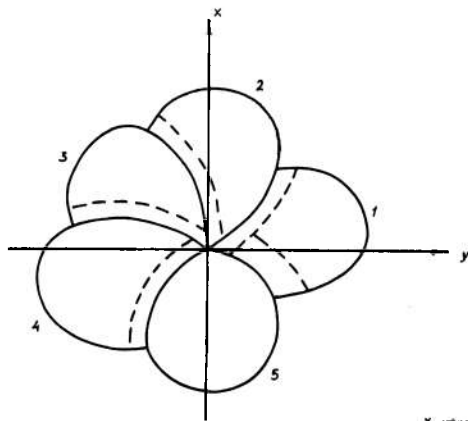


Рис. 2. Изображение проекции растения на горизонтальную плоскость xy . Цифрами 1—5 обозначены номера листьев в порядке их распускания на стебле. Пунктирной линией обозначены границы областей затенения траектории фотона, образованные парами взаимозатеняющихся листьев.

Рис. 3. Схема взаимодействия фотона, рассеянного в точке «А» с парой взаимозатеняющихся листьев.

свет взаимодействует либо с очень маленькими (в тысячу раз меньшими чем лист) пластинками, либо с целыми кронами, моделируемыми большими геометрическими телами (шар, конус, цилиндр), заполненными мутной жидкостью.

Эти недостатки обусловлены практической невозможностью применения математического аппарата интегродифференциальных уравнений для описания процесса переноса излучения в существенно дискретных средах, какими являются РП, состоящие из фитоэлементов конечных размеров. В качестве единственного примера рассмотрения РП на уровне отдельных листьев можно привести несколько простых узкоспециализированных геометрических моделей, построенных для объяснения механизма взаимодействия тонкого луча лазера с РП. Модели ориентированы на получение аналитических зависимостей, связывающих геометрические параметры РП с вероятностью затенения листьями конечных размеров двух близких направлений рассеяния из области обратного блеска.

Пусть модельный РП состоит из горизонтально расположенных листьев, имеющих форму круглых дисков, толщиной которых будем пренебрегать. Обозначим радиус листьев через r , а индекс листовой поверхности, как функцию вертикальной координаты РП, обозначим через L . Пусть на РП в направлении «АО» падает фотон света (рис. 1). Оценим вероятность того, что после рассеяния на каком-то листе внутри РП фотон беспрепятственно покинет РП в направлении «ОВ», которое составляет с направлением обратного рассеяния малый угол « α ». Так как угол α мал, то направление падения фотона «АО» и направление его рассеяния «ОВ» оказываются существенно зависимыми. Физически это значит, что один и тот же лист может одновременно участвовать сразу в двух событиях: затенять направление влета фотона в РП и направление его вылета. Нетрудно построить меру угловой зависимости направлений влета и вылета фотона в РП. В первом приближении эта мера

может задаваться как величина, пропорциональная общей площади проекций пары листьев, затеняющих выбранные направления, на горизонтальную плоскость. Из рис. 1 видно, что выбранная таким образом мера зависимости различных направлений движения фотона внутри РП зависит от расстояния, которое прошел фотон от точки рассеяния «О» до точки нахождения затеняющего листа: чем больше это расстояние, тем меньше общая площадь затенения листьев, тем меньше зависимость направлений падения и рассеяния. Нетрудно определить критическую минимальную глубину проникновения фотона в РП $h_{кр}$, при которой сохраняется зависимость направлений влета и вылета фотона:

$$h_{кр} = d / \operatorname{tg} \alpha,$$

где d — диаметр листа.

Если за начало координат выбрать точку рассеяния фотона, а проекцию длины пути, которую проходит фотон в направлении «ОВ» на ось z обозначить через l , то можно записать выражение для меры зависимости n направлений влета и вылета фотона из РП. При этом мера зависимости n может быть определена, как отношение проекции площади пересечения листьев S_1 и S_2 на горизонтальную плоскость к площади отдельного листа:

$$\rho(l, d, \alpha) = 2/\pi \arccos [l/d \cdot \operatorname{tg} \alpha] - l/d \times \times 2 \operatorname{tg} \alpha / \pi [1 - (l/d \operatorname{tg} \alpha)^2]^{1/2} \quad (3)$$

При этом легко заметить, что мера зависимости изменяется от 0 (при $l = d/\operatorname{tg} \alpha$) до 1 (при $l = 0$). Чем больше зависимость направлений влета и вылета, тем легче фотону двигаться в направлении вылета и тем меньше вероятность затенения его траектории со стороны соседних листьев.

До последнего времени в теоретических расчетах степени ослабления распространяющейся в РП радиации использовали формулу типа:

$$I/I_0 = l^{-KL} \quad (4),$$

где I/I_0 показывает отношение интенсивности прошедшей I радиации сквозь слой РП с листовым индексом L к интенсивности I_0 падающей. При этом зависимость различных направлений движений фотона до и после рассеяния в слое с листовым индексом L не учитывается. В случае, когда мы имеем дело с сильной зависимостью различных направлений движения фотона внутри слоя РП (рассеяние в области углов обратного блеска), можно пользоваться модифицированной формулой (4) для расчета ослабления потока радиации:

$$I/I_0 = l^{-kLR} = l^{-KL_{\phi}} \quad (5),$$

где $0 \leq R \leq 1$

$$R = 1 - \rho$$

$$L_{\phi} \leq L$$

Величину $L_{\phi} = RL$ можно назвать эффективным листовым индексом, который меньше или равен индексу листовой поверхности. Весовой множитель R при этом характеризует меру независимости

направлений движения фотона до и после рассеяния. Множитель R показывает эффективность участия листовой поверхности в затенении траектории фотона после акта рассеяния. Вернемся к формуле (3), которая определяет меру зависимости различных направлений движения фотона до и после рассеяния для фиксированной заранее точки рассеяния «О».

Если точку рассеяния заранее не фиксировать, то для оценки полной вероятности того, что фотон беспрепятственно покинет РП в направлении «ОВ» в области обратного блеска после рассеяния в произвольной точке внутри растительности можно воспользоваться следующим алгоритмом: 1) разбить РП на достаточно большое число подслоев, внутри которых отсутствует существенное изменение листового индекса; 2) оценить вероятность того, что фотон рассеялся на подслое с данным номером m , используя традиционные формулы пропускания типа (4); 3) оценить вероятность того, что фотон вылетит за пределы РП после рассеяния на подслое с номером m в малой области углов обратного блеска с использованием формулы (3), учитывающей зависимость направлений влета и вылета фотона; 4) перемножить вероятности, полученные в пунктах 2 и 3, и найти условную вероятность того, что фотон вылетит за пределы РП в малой области углов обратного блеска после рассеяния на подслое с номером m ; 5) просуммировать найденные условные вероятности по всем подслоям и найти полную вероятность того, что фотон беспрепятственно покинет РП в малой области углов обратного блеска после рассеяния внутри РП. Для реализации предложенного алгоритма разобьем РП на N подслоев и пронумеруем подслои сверху вниз. Пусть фотон, падающий на РП в направлении «АО», рассеялся на подслое с порядковым номером m , тогда выражение для вероятности p вылета фотона за пределы РП в направлении «ОВ» будет иметь вид:

$$p = \prod_{j=1}^{m-1} \exp - [R(l_j, \alpha, d) \cdot k \cdot L_{m-j}];$$

или:

$$p = \exp - \left[\sum_{j=1}^{m-1} R(l_j, \alpha, d) \cdot k \cdot L_{m-j} \right] \quad (6),$$

где:

$$l_j = \sum_{k=m-j}^{m-1} Z_k;$$

Z_k — толщина $K^{\text{го}}$ подслоя;

l_j — текущая координата фотона по оси z , которая задает положение фотона по мере удаления его от точки рассеяния «О» в направлении «ОВ».

Формулой (6) можно пользоваться, если мы заранее знаем номер подслоя, на котором произошло рассеяние фотона. Если мы хотим оценить вероятность вылета фотона за пределы РП еще до того, как произошло его рассеяние на одном из подслоев, мы должны воспользоваться алгоритмом из вышеприведенных пяти операций. Тогда искомая вероятность P будет иметь вид:

$$P(\alpha, d, L) = \sum_{i=2}^N \left\{ \left[\prod_{n=1}^{i-1} \exp(-\kappa L_n) \right] \cdot (1 - I^{-\kappa L_i}) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[- \sum_{j=1}^{i-1} R(l_{ij}, \alpha, d) \cdot \kappa \cdot L_{i-j} \right] + 1 - I^{-\kappa L_i} \right\} \quad (7),$$

- где $l_{ij} = \sum_{j=1}^{i-1} Z_m$ — текущие значения отрезков фотонной траектории;
- $\left[\prod_{n=1}^{i-1} \exp(-\kappa L_n) \right] (1 - I^{-\kappa L_i})$ — вероятность того, что фотон пролетит сквозь $i-1$ подслоев и отразится от подслоя с номером i , начиная со 2-го подслоя;
- $1 - I^{-\kappa L_i}$ — вероятность того, что фотон отразится от первого, встреченного на его пути подслоя;
- $\sum_{j=1}^{i-1} R(l_{ij}, \alpha, d) \cdot \kappa \cdot L_{i-j}$ — вероятность того, что фотон вылетит за пределы РП после рассеяния на подслое с номером i .

Параметр α во всех приведенных выражениях обозначает угол, который составляет направление рассеяния фотона с направлением обратного рассеяния. При этом угол α считается достаточно малым и лежащим в области углов обратного блеска. Таким образом, мы получили аналитическое выражение, связывающее угловое распределение вероятности рассеяния фотона в РП для области углов обратного блеска с основными параметрами архитектуры РП: размер листа, индекс листовой поверхности. Ориентация листьев в этом случае была фиксированной и не являлась параметром задачи. В общем случае произвольной ориентации листовых нормалей коэффициент экстинкции κ и весовой множитель R , определяющий характер взаимозатенения листьев, зависят от ориентации листовых нормалей. Таким образом, главные параметры архитектуры РП, определяющие индикатрису рассеяния в области обратного блеска для горизонтально однородного покрова следующие:

- 1) характерный размер листа;
- 2) распределение индекса листовой поверхности по высоте РП;
- 3) распределение ориентаций листовых нормалей.

В отличие от прежних моделей переноса излучения в РП, в данной модели размер отдельного листа выступает одним из основных параметров задачи.

Описанная выше математическая модель для оценки значений индикатрисы рассеяния РП дает завышенные результаты по сравнению с экспериментальными данными. Это обстоятельство объясняется тем, что мы не учитываем реальной архитектуры отдельных растений из которых состоит РП. Так, описывая закон пространственного размещения листьев по вертикали, мы используем понятие индекса листовой поверхности, который задается в виде непрерывной функции вертикальной координаты РП. Это допускает возможность того, что листья могут находиться на сколь-

угодно малом расстоянии друг от друга. Из этого вытекает возможность затенения фотона на сколь угодно малом расстоянии от листа, на котором произошло рассеяние. Однако в природе, как правило, наблюдаются заметные по величине свободные пространства вокруг листьев, соизмеримые с размерами листовых пластинок, т. е. лист «стареется уйти» от затенения со стороны соседних листьев. Известное в ботанике явление филотаксиса (спиралевидное расположение листьев вокруг стебля) — практическая реализация возможности избежать взаимного затенения.

Кроме того, построенная нами мера зависимости различных направлений движения фотона, как проекция на горизонтальную плоскость общей площади пары взаимозатеняющихся листьев, не совсем точно отражает ситуацию, которая имеет место в природе. Построенная таким образом мера, а также использование понятия индекса листовой поверхности как непрерывной функции вертикальной координаты РП допускают возможность существенного затенения траектории рассеянного в РП фотона на достаточно малом удалении его от листа, на котором произошло рассеяние. Это является главной причиной ошибок в численных расчетах индикатрисы рассеяния для малой области углов обратного блеска.

Основная ценность модели в том, что она учитывает дискретность РП и позволяет получить аналитическую зависимость между основными геометрическими параметрами РП и его индикатрисой. Для усовершенствования модели необходимо более детальное рассмотрение механизмов взаимодействия излучения с отдельным растением, т. к. архитекtonика отдельного растения выступает одним из главных факторов формирования поля рассеянной радиации в области углов обратного блеска. Одной из отличительных особенностей архитекtonики отдельного растения является наличие заметного расстояния между листьями, что позволяет фотону беспрепятственно перемещаться на значительные расстояния внутри РП.

Рассмотрим простую геометрическую модель, в которой геометрическое строение отдельного растения выступает в роли ведущего фактора формирования индикатрисы рассеяния в области обратного блеска. Для простоты рассмотрим культурную травянистую растительность (подсолнечник, кукуруза, пшеница и т. п.). Для данного типа растительности проекция отдельного растения на горизонтальную плоскость представляет собой центрально-симметричную фигуру, подобную розетке, при этом листья растения расположены вдоль стебля по спирали (рис. 2) и частично взаимозатеняют друг друга. Рассмотрим пару взаимозатеняющихся листьев, расположенных горизонтально (рис. 3). Пусть на пару листьев в надирном направлении падает тонкий пучок фотонов. Тогда на поверхности одного из листьев образуется светящаяся точка А, которая может быть не видна в некотором направлении визирования АВ ввиду наличия взаимного затенения со стороны соседних листьев. Из рис. 3 нетрудно заметить, что затенение светящейся точки А может произойти только при условии, что пучок

фотонов попал в некоторую область КФСД, именуемую в дальнейшем областью захвата (ОЗ) фотона. Длина КД этой области определяется длиной линии пересечения проекций пары перекрывающихся листьев на горизонтальную плоскость, а ширина СД области определяется углом визирования α и расстоянием между листьями h . Ширина области КФСД равна $h \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Тогда мы можем записать выражение для вероятности затенения P точки A , при условии попадания пучка фотонов на пару листьев с геометрическими параметрами системы, состоящей из пары взаимозатеняющихся листьев:

$$P = \gamma \cdot l \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha / S \quad (8),$$

где l — длина области захвата; S — площадь проекции пары листьев на горизонтальную плоскость; $l h \operatorname{tg} \alpha$ — площадь области захвата; γ — условная вероятность того, что попавшая в ОЗ точка A будет затенена в направлениях визирования, проходящих через дугу НЕМ, при условии, что азимут направления визирования АВ выбирается произвольно. Эта условная вероятность равна отношению длины дуги НЕМ к полной длине окружности. Вероятность γ изменяется от нуля до величины, примерно равной $1/2$, в зависимости от того, в какую точку области захвата попал пучок фотонов. Математическое ожидание условной вероятности γ при условии равновероятного распределения точки A в пределах области захвата равно $1/4$. В общем случае для растения, состоящего из N листьев, выражение для полной вероятности затенения P светящейся точки A можно представить в виде:

$$P = 1/4 \sum_{i,j=1}^N l_{ij} h_{ij} \operatorname{tg} \alpha / S \quad (9),$$

где N — общее число листьев; l_{ij} — длина границы, образованной пересечением проекции на горизонтальную плоскость i -го и j -го листа; h_{ij} — расстояние между i -м и j -м листом, измеряемое вдоль стебля; α — угол визирования; S — проекция листьев всего растения на горизонтальную плоскость.

Суммирование производится по всем парам взаимозатеняющихся листьев. Все величины параметров в правой части формулы (9) определены генетически для данного вида растения, для каждой фазы его развития. При этом надо иметь в виду средние значения параметров, вследствие того, что возможны отклонения в геометрии растения за счет экологических условий среды. Теперь мы можем теоретически оценивать зависимость P от числа листьев N для данного вида растений и для каждой фазы их развития. Зная теоретическую зависимость $P(N)$ и определяя экспериментально вероятность P затенения светящегося пятна, образованного пучком фотонов на поверхности листьев, можно определять фазу развития растения, число листьев и, следовательно, получать информацию о биомассе.

Приведенные наглядные геометрические модели качественно отличаются от модели мутного слоя. Главными недостатками этих

моделей являются их узкоспециализированная направленность на описание процесса рассеяния излучения в малой области углов обратного блеска и низкая точность количественных оценок параметров индикатрисы. В связи с этим, насущным остается вопрос о построении общей теории переноса излучения в РП, представленного листьями конечных размеров.

Это привело к новому вероятностному направлению в математическом моделировании, суть которого сводится к построению статистических имитационных моделей переноса радиации в РП, реализуемых с помощью быстродействующих ЭВМ. В основе этих моделей находится метод Монте-Карло, позволяющий в значительной мере устранить трудности, присущие моделям мутного слоя, основанным на решении интегродифференциального уравнения переноса излучения, и получить качественно новые результаты в теории рассеяния радиации дискретными средами, какими являются растительные покровы.

1.1.2. Метод Монте-Карло и моделирование переноса излучения в растительном покрове

Общие вопросы теории методов Монте-Карло в задачах переноса излучения. Под статистическим моделированием понимают воспроизведение с помощью ЭВМ функционирования вероятностной модели объекта. Цель моделирования — оценка среднестатистических характеристик модели. Идея статистического моделирования известна очень давно. Интенсивное развитие она получила в 50-х годах нашего столетия под названием «метода Монте-Карло» в связи с появлением быстродействующих ЭВМ.

Основными областями применения метода Монте-Карло являются теория массового обслуживания, задачи атомной физики, проблемы теории переноса излучения в атмосфере и океане [20—25].

Если обратиться к задачам переноса излучения в неоднородных средах, то процесс распространения света можно рассматривать как случайную марковскую цепь столкновений фотонов с веществом. Столкновения приводят либо к рассеянию, либо к поглощению фотонов. В моделировании траекторий марковской цепи на ЭВМ и заключается идея метода Монте-Карло для задач переноса излучения. Целью такого моделирования является нахождение среднестатистических характеристик процесса взаимодействия излучения с веществом.

Основными этапами решения задачи переноса излучения с помощью методов Монте-Карло являются, во-первых, получение на ЭВМ последовательности выборочных значений случайных величин с заданными законами распределения и, во-вторых, моделирование с помощью полученных случайных величин марковской цепи столкновений фотонов с веществом. Моделирование траек-

тории фотона, в свою очередь, сводится к моделированию длины свободного пробега, моделированию акта рассеяния и поглощения. Рассмотрим подробнее основные идеи моделирования процесса переноса излучения в веществе, основанные на методах Монте-Карло.

Если рассматривать процесс переноса, как марковскую цепь столкновений фотона с частицами вещества [26], то для плотности столкновений $f(\vec{r}, \vec{\omega})$, где $\vec{r}$ — пространственная координата, а $\vec{\omega}$ — единичный вектор направления пробега частицы, можно записать интегральное уравнение переноса:

$$f(\vec{x}) = \int_{\vec{x}} K(\vec{x}', \vec{x}) \cdot f(\vec{x}') d\vec{x}' + f_0(\vec{x}) \quad (10),$$

где $\vec{x} = \{\vec{\omega}, \vec{r}\}$; $K(\vec{x}', \vec{x})$ — переходная плотность вероятности;
 $f_0(\vec{x})$ — плотность первичных столкновений;
 если: $\Phi(\vec{r}, \vec{\omega})$ — поток частиц (интенсивность излучения);
 $\sigma(\vec{r})$ — полное сечение взаимодействия потока частиц со средой (коэффициент ослабления),

то
$$f(\vec{r}, \vec{\omega}) = \sigma(\vec{r}) \cdot \Phi(\vec{\omega}, \vec{r}) \quad (11)$$

для переходной плотности вероятности $K(\vec{x}, \vec{x}')$ можно записать выражение:

$$K(\vec{x}'; \vec{x}) = \frac{\sigma_s(\vec{r}) g(\omega', \omega, r', r) I^{(r', r)} \cdot \sigma(r)}{\sigma(\vec{r}') \cdot 2\pi \cdot |\vec{r} - \vec{r}'|^2} \delta(\omega - \frac{r' - r}{|r' - r|}) \quad (12),$$

где: $1/2 \pi g(\omega', \omega, r', r)$ — индикатриса рассеяния;
 $\tau(r', r)$ — оптическая длина пути;
 $\sigma_s(r)$ — сечение рассеяния.

Из интегрального уравнения переноса (10), принимая во внимание выражение (11), мы можем записать для потока частиц (фотонов) Φ в заданной точке $\vec{x}$ фазового пространства $\{\vec{r}, \vec{\omega}\}$ выражение:

$$\Phi(\vec{x}) = \int_{\vec{x}} \frac{K(\vec{x}', \vec{x})}{\sigma(\vec{r}')} \cdot f(\vec{x}') d\vec{x}' \quad (13).$$

Таким образом, поток фотонов $\Phi(\vec{x})$ формально представлен в виде линейного функционала от плотности столкновений $f(\vec{x}')$.

Оценка функционалов такого вида может быть произведена путем моделирования физической траектории фотонов, осуществляющих последовательное столкновение с элементами среды, и вычислении среднестатистических характеристик таких траекторий. При этом физические траектории полностью соответствуют марковскому процессу, описываемому интегральным уравнением (10) с вероятностной интерпретацией ядра $K(x', x)$ согласно выражению (12) для переходной плотности $K(x', x)$. Рассмотрим, каким образом строится «основная оценка» искомых функционалов типа:

$$(f, \varphi) = \int_{\vec{x}} f(x) \varphi(x) dx \quad (14).$$

Запишем интегральное уравнение переноса (10) в виде:

$$f = \widetilde{K} f + \psi \quad (15)$$

где K — интегральный оператор с ядром $K(x', x)$, а сопряженное к нему уравнение примет вид:

$$f^* = \widetilde{K}^* f^* + \psi \quad (16).$$

Тогда «основной оценкой» искомого функционала будет следующее равенство:

$$I_\varphi = (f, \varphi) = M\xi \quad (17),$$

где случайная величина ξ задается равенством:

$$\xi = \sum_{n=0}^N Q_n \varphi(x_n) \quad (18),$$

где $\{x_n\}$ — физическая цепь столкновений;

Q_n — соответствующие веса, выражающиеся в общем случае через начальную плотность столкновений $\psi(x)$, переходную плотность $K(x', x)$ и вероятность обрыва траектории (поглощение фотона) $p(x)$;

N — случайный номер последнего столкновения.

Таким образом, чтобы оценить функционал, задаваемый выражением (14) и численно равный потоку фотонов в точке $\vec{x}$ фазового пространства $\{\vec{r}, \vec{\omega}\}$, необходимо построить физическую цепь столкновений фотона с элементами вещества, вычислить значения Q_n и $\varphi(x_n)$ после каждого столкновения для данной траектории, найти сумму произведений $Q_n \varphi(x_n)$ по всем столкновениям и осреднить ее (найти математическое ожидание M) по всей совокупности разыгрываемых траекторий.

Найденное математическое ожидание и будет искомой несмещенной оценкой вычисляемых функционалов. С целью уменьшения дисперсии основной оценки применяют различные методы модификации оценок функционалов: оценка по поглощениям, идеальная оценка типа ξ , методы прямого моделирования, различные модификации локальных оценок потока частиц (двойная локальная оценка и универсальная модификация локальной оценки с логарифмической расходямостью дисперсии и т. д.). Сложные задачи переноса невозможно решить прямым моделированием с удовлетворительной точностью, поэтому перечисленным выше модификациям основной оценки и новым видам оценок уделено было большое внимание в последнее десятилетие [27].

Для определения целесообразности применения той или иной модификации оценки искомого функционала путем моделирования траекторий фотонов методом Монте-Карло с использованием ЭВМ используют понятие о трудоемкости методов Монте-Карло. Если через t обозначить среднее время расчета на ЭВМ одного выборочного значения ξ , а через $D\xi$ — дисперсию оценки функционала, то трудоемкость S задается выражением:

$$S = t \cdot D\xi \quad (19).$$

Если после модификации величина S уменьшилась, то рассмотренная модификация целесообразна.

Рассмотренные выше общие вопросы теории методом Монте-Карло для решения задач переноса излучения дают нам возможность приступить к исследованию возможности использования методов Монте-Карло для решения задач переноса излучения в растительном покрове.

Методы Монте-Карло и моделирование переноса излучения в растительном покрове (РП). Если мы обратимся к истории вопроса о математическом моделировании процессов переноса излучения в РП, то увидим, что в то время, как метод моделирования, основанный на представлении РП мутным слоем с решением соответствующего интегродифференциального, а часто просто дифференциального уравнения, отметил свое тридцатилетие [9], метод Монте-Карло имеет немногим более чем десятилетнюю историю [28]. Это вызвано, очевидно, прежде всего техническими причинами — отсутствием в недалеком прошлом широкого распространения быстродействующих ЭВМ, которые принципиально необходимы для получения удовлетворительных по точности результатов при статистическом моделировании процесса переноса излучения в РП.

Вышедшие за последние десять лет за рубежом работы, посвященные применению метода Монте-Карло (М-К) для моделирования взаимодействия радиации Солнца с РП, охватывают достаточно широкий круг задач, от моделирования взаимодействия со светом отдельного листа до моделирования переноса излучения в отдельной кроне и в целом растительном покрове [29—31]. Пионерами в этой области явились японские ученые.

Первые работы японских ученых посвящены исследованию светового микроклимата в посевах табака и хлопчатника в зависимости от различной архитектоники посевов. В моделях рассматривается два типа архитектоники посева: в первом случае РП моделируется бесконечным плоскопараллельным слоем, заполненным листьями конечных размеров; во втором случае — параллелепипедами конечных размеров, отстоящими друг от друга на значительном расстоянии, внутри которых размещены отдельные растения с заданным числом и пространственным расположением листьев, моделируемых эллипсоидными пластинами.

В модели рассчитываются вертикальные профили интенсивности солнечной радиации в приближении однократного рассеяния. Коэффициент поглощения листа принят за 1. Методом М-К разыгрываются фотонные траектории, заканчивающиеся либо поглощением при взаимодействии с первым же листом, либо пролетом в полог РП и поглощением почвой. Варьируются углы наклона листьев, характер размещения отдельных растений на земле, филотаксис листьев, густота посева. Если РП моделируется отдельными параллелепипедами, заполненными растениями, то максимальное число листьев, координаты и углы наклона которых хранятся в оперативной памяти ЭВМ, составляет 500 штук для

одного параллелепипеда. В случае, когда РП моделируется отдельными растениями, объединенными в группы по $10 \div 30$ растений, радиационный режим внутри такой группы характеризуется целым рядом особенностей, связанных с краевыми эффектами.

Так, начиная с некоторого уровня высоты РП, внутри группы растений (примерно $0,5 \div 0,7$ Н от земли; Н — высота растения) не наблюдается ослабления солнечной радиации, а изменение интенсивности радиации в горизонтальной плоскости на всех уровнях РП достигает значительных величин, что ставит листья одного уровня высоты в явно неодинаковые условия, обуславливая специфику конкурентных отношений между растениями одной группы.

Наряду с моделированием светового микроклимата для целого РП несомненный интерес представляет моделирование микроклимата кроны отдельного дерева, чему посвящена работа [30], в которой рассматривается крона дерева, моделируемая сферой, заполненной листьями конечных размеров. Пространственная функция распределения координат листьев внутри сферы считается заданной, что облегчает моделирование монте-карловских траекторий фотонов. Оптические свойства листьев также заданы. Задача решается для случая многократного рассеяния. Строится пространственная функция распределения интенсивности радиации внутри кроны. Показана возможность существования локальных максимумов интенсивности радиации внутри кроны, обусловленных эффектом многократного рассеяния фотонов.

Работа, вышедшая в США в 1977 г., посвящена применению метода М-К для моделирования взаимодействия излучения солнца с самым низким уровнем архитектуры РП — отдельным листом. Лист рассматривается как трехслойная платина конечных размеров. Первый слой представляет собой совокупность клеток эпидермиса листа, второй — клетки паренхимы, моделируемые цилиндрами, а третий слой — клетки мезофилла, моделируемые шарами с промежутками между ними. Оптические свойства слоев и механизм рассеяния света на клетках эпидермиса, паренхимы и мезофилла считаются заданными. Процесс взаимодействия фотона с различными клетками листа считается дискретным по времени стохастическим процессом и описывается с помощью марковской цепи с конечным числом состояний. Рассчитываются коэффициенты поглощения, рассеяния и пропускания листом солнечной радиации для области ФАР и БИКР через каждые 10 нм, начиная от 0,4 мкм и заканчивая 1,5 мкм.

Описанные выше статистические модели использовали, главным образом, для расчета светового микроклимата внутри РП при условии независимости различных направлений движения фотона. Однако целый ряд важных вопросов, связанных с задачами дистанционного зондирования РП оставались без должного внимания. Поэтому в начале 80-х годов в нашей стране появились первые работы, посвященные применению методов М-К для расчета отражательных характеристик РП в разных диапазонах спектра. На

примере кроны ели Каневским и Россом [32—34] была продемонстрирована эффективность применения статистического моделирования при расчете индикатрисы рассеяния кроны для интерпретации данных дистанционного зондирования. Результаты расчета индикатрисы в области обратного блеска впоследствии положили начало теоретическим основам дистанционных лазерных методов исследования архитектуры РП.

Рассмотрим структуру модели и основные результаты численных экспериментов, проведенных на ЭВМ.

Крона хвойного дерева (ели) моделируется конусообразной пирамидой, состоящей из круглых дисков-ярусов, заполненных хвойными веточками (рис. 4). Для каждого яруса центры веточек распределены в одной плоскости по закону Пуассона, а ориентация веточек — равновероятная по всем направлениям. Предполагается, что веточки имеют шарообразную индикатрису рассеяния. Коэффициенты поглощения и рассеяния веточек заданы.

Процесс распространения прямой солнечной радиации в кроне ели можно считать случайной последовательностью столкновений фотонов с препятствиями, которые представляют собой малые веточки ели. Моделирование этих случайных фотонных траекторий на ЭВМ и является процедурой М—К для рассматриваемой задачи. Описание блуждания фотона в кроне ели сводится к моделированию ряда элементарных случайных событий: выбор длины свободного пробега фотона до очередного столкновения, выбор направления полета фотона после акта рассеяния. Пересчет длин свободного пробега фотона и направлений

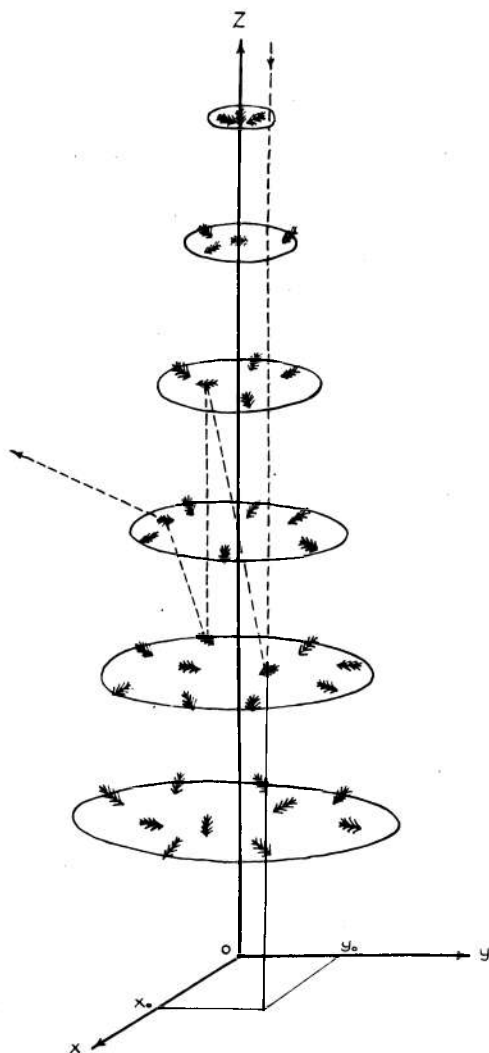


Рис. 4. Взаимодействие фотона с кроной хвойного дерева. — — — траектория движения многократнорассеянного фотона.

полета фотона после акта рассеяния. Пересчет длин свободного пробега фотона и направлений полета производится путем генерирования последовательности псевдослучайных чисел с соответствующими законами распределения, определяемыми геометрией растительного объекта. Рассмотрим подробнее структуру модели.

На крону ели падает параллельный пучок фотонов под заданным углом V' к ее оси. Оценивается вероятность того, что после случайного блуждания в кроне фотон вылетит за пределы кроны и попадет в датчик заданных размеров, размещенный на высоте z над поверхностью земли в направлении, составляющем с осью ели заданный угол φ , принимающий значения от 0 до 90° .

Возможны два подхода к решению данной задачи:

1. Методом «прямого моделирования» — непосредственным подсчетом числа фотонов, попавших прямо в датчик, оценивается вероятность попадания в датчик. Искомая вероятность равна отношению числа фотонов, попавших в область датчика, ко всему числу фотонов, падающих на крону. Применение подобного приема может привести к большим ошибкам ввиду малого телесного угла, под которым виден датчик для вылетающего из кроны фотона.

2. После каждого столкновения фотона с фитоэлементами кроны аналитически рассчитывается условная вероятность того, что следующее столкновение фотон испытывает в области датчика. При таком рассмотрении каждая фотонная траектория дает вклад в показания датчика, несмотря на то, что только некоторые из них заканчиваются прямым попаданием в область датчика. Искомая вероятность попадания в датчик состоит из четырех условных вероятностей: вероятности не поглотиться после рассеяния, условной вероятности рассеяться в заданном направлении под которым виден датчик, условной вероятности вылететь из кроны — долететь до датчика сквозь ярусы ели, заполненные хвоей.

Искомая вероятность получается путем осреднения условных вероятностей по всей совокупности разыгрываемых фотонных траекторий. Моделирование траектории фотона начинается с выбора координат $\{X_0, Y_0\}$ начальной точки попадания фотона в крону в соответствии с равномерным законом распределения начальных точек в области проекции ели на горизонтальную плоскость ХУ (рис. 4). Для перпендикулярного падения фотона эта область совпадает с окружностью нижнего яруса ели. В этом случае координаты $\{X_0, Y_0\}$ начальной точки задаются выражениями:

$$\begin{aligned} X_0 &= l_1 \sqrt{a_1} \cdot \cos(2\pi \cdot a_2) \\ Y_0 &= l_1 \sqrt{a_1} \cdot \sin(2\pi \cdot a_2) \end{aligned} \quad (20),$$

где α — случайная величина, равномернораспределенная на отрезке $(0,1)$, а α_1 и α_2 — два значения этой величины. В случае наклонного падения фотона применяется специальный алгоритм, позволяющий осуществлять равномерный выбор $\{X_0, Y_0\}$ из сложной области, представляющей собой совокупность взаимнопересекающихся эллипсов.

Построим уравнение прямой, проходящей через точку $\{X_0, Y_0\}$, по которой движется фотон, падающий на крону. Пусть p — вероятность пролета фотона сквозь один ярус. Найдем номера ярусов, которые пересекает данная прямая. Запишем последовательность значений вероятностей, определяющих реализацию одного из следующих событий: фотон рассеивается в первом, встречающемся на его пути ярусе, фотон пролетает сквозь первый ярус и рассеивается во втором и т. д., фотон пролетает сквозь все ярусы, расположенные на его пути и попадает в полог.

Соответствующие значения вероятностей имеют вид:

$$1-p, p(1-p), p^2(1-p), \dots, p^k \quad (21),$$

где k — число ярусов на пути летящего фотона.

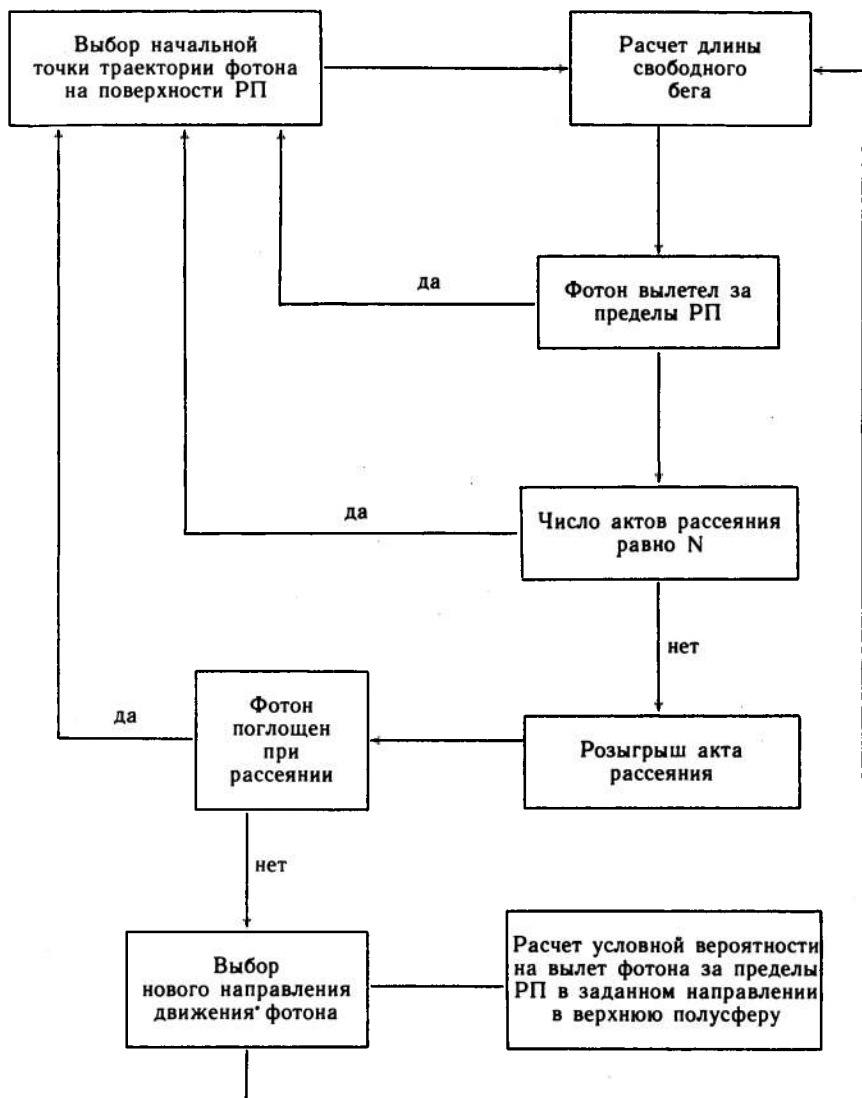
Сумма выписанных значений вероятностей равно «1» для любого k .

Описанная цепочка значений вероятностей задает распределение длин свободного пробега фотона. Генерируя теперь случайное число α , равномерно распределенное на отрезке $(0, 1)$ и определяя два соседних значения в построенной цепочке вероятностей, между которыми попало число α , мы тем самым выбираем случайное значение длины свободного пробега фотона. Определив длину свободного пробега фотона и номер яруса, в котором произошло рассеяние, приступаем к разыгрыванию акта рассеяния. Для случая равновероятного рассеяния фотона по всем направлениям, находим значения направляющих косинусов $\{\cos j_1, \cos j_2, \cos j_3\}$ движения фотона после рассеяния. Для этого генерируем новое случайное число α , тогда выражение для направляющих косинусов имеет вид:

$$\begin{aligned} \cos j_1 &= \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \Theta} \\ \cos j_2 &= \sin \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \Theta} \\ \cos j_3 &= \cos \Theta \end{aligned} \quad (22),$$

где: $\cos \Theta = 2\alpha_1 - 1$; $\varphi = 2\pi\alpha_2$.

После того, как рассеяние фотона разыграно и задано его новое направление движения в кроне, строится новая цепочка значений вероятностей, определяющих распределение длин свободного пробега фотона в новом выбранном направлении, и разыгрывается следующий акт рассеяния и т. д. После каждого очередного соударения учитывается вероятность выживания фотона (85% для БИКР и 5% для ФАР). Несмотря на то, что разыгрываемая случайная траектория может не закончиться прямым попаданием фотона в область датчика, подсчитываются условные вероятности попадания фотона в датчик после каждого очередного акта рассеяния. Суммируя условные вероятности после каждого акта рассеяния, получим полную условную вероятность для всей траектории. Таким образом, в описываемой модели все траектории, за исключением пролетов в полог, дают вклад в вероятность попадания в датчик (см. блок-схему алгоритма). Общее число разыгры-



Блок-схема алгоритма моделирующего траектории фотона при расчетах индикатрисы рассеяния

ваемых фотонных траекторий, по которым производится усреднение, составило 140 000.

В качестве примера практической реализации модели приведем результаты расчетов на ЭВМ индикатрис рассеяния всей кроны ели и отдельного ее яруса, представляющего собой круглый диск, заполненный веточками. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Индикатриса кроны ели существенно анизотропна и зависит от формы кроны (рис. 5). Индикатриса кроны имеет характерный минимум в области зеркального отражения. Положение минимума определяется углом при вершине конуса кроны.

2. Наличие эффекта обратного блеска сильно выражено в случае кроны, а в случае монослоя — нет (рис. 6). Это можно объяснить различным диапазоном углов области обратного рассеяния, внутри которой имеет место зависимость направлений падения и рассеяний фотона. Угловые размеры этой области определяют степень анизотропии, форму индикатрисы в области обратного блеска и зависят от линейных размеров рассеивающих фитоземента, их пространственного расположения и ориентации. Физический смысл зависимости различных направлений распространения излучения внутри РП заключается в возможности затенения одной и той же веточкой сразу нескольких направлений движения фотона.

Как видно из рис. 7, при блуждании фотона внутри монослоя имеет место существенная зависимость отдельных отрезков фотонной траектории. Поэтому при расчете вероятности вылета фотона в направлении ST после рассеяния в точке S необходимо учитывать историю фотона до попадания в точку S, т.е. принимать во внимание не все веточки, которые затевают направление вылета ST, а только те, которые затевают ST, но не перекрывают при этом предыдущие отрезки траектории PR и RS. В данном случае этому требованию удовлетворяет веточка 2, а веточка 1 — нет. Таким образом, речь идет о расчете условных вероятностей вылета фотона в случае, если индикатриса рассчитывается для области обратного блеска.

На рис. 8 представлены угловые зависимости вероятностей рассеяния фотона монослоем без учета зависимости различных направлений движения фотона (I) внутри монослоя и с учетом такой зависимости для случая однократного (II) и двухкратного (III) рассеяния. Как видно из рис. 6, диапазон углов рассеяния, в котором имеет место зависимость направлений падения и рассеяния, велик в случае монослоя и мал ($8-10^\circ$) в случае кроны ели. Именно этим объясняется отсутствие скачка в индикатрисе монослоя и наличие его для индикатрисы кроны. Один из основных геометрических параметров РП, определяющий степень анизотропии индикатрисы в области обратного блеска — это соотношение между средним линейным размером листа и средней длиной свободного пробега фотона внутри РП. Для монослоя эта величина порядка I, а для кроны значительно меньше I.

Таким образом, имитационное статистическое моделирование позволяет дать количественную оценку влияния геометрии РП на угловую структуру поля рассеянного излучения, найти наиболее чувствительные к изменениям геометрии направления индикатрисы.

Дальнейшее развитие статистическое моделирование отражательных характеристик РП получило в работах Маршака и Росса

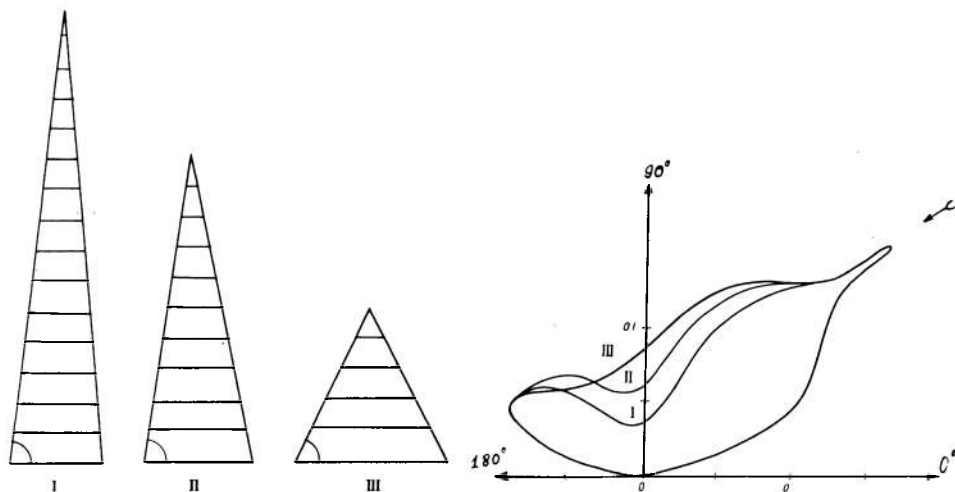


Рис. 5. Индикатрисы рассеяния (б) елей с разной формой кроны (а). $\leftarrow$ направление падения солнечных лучей.

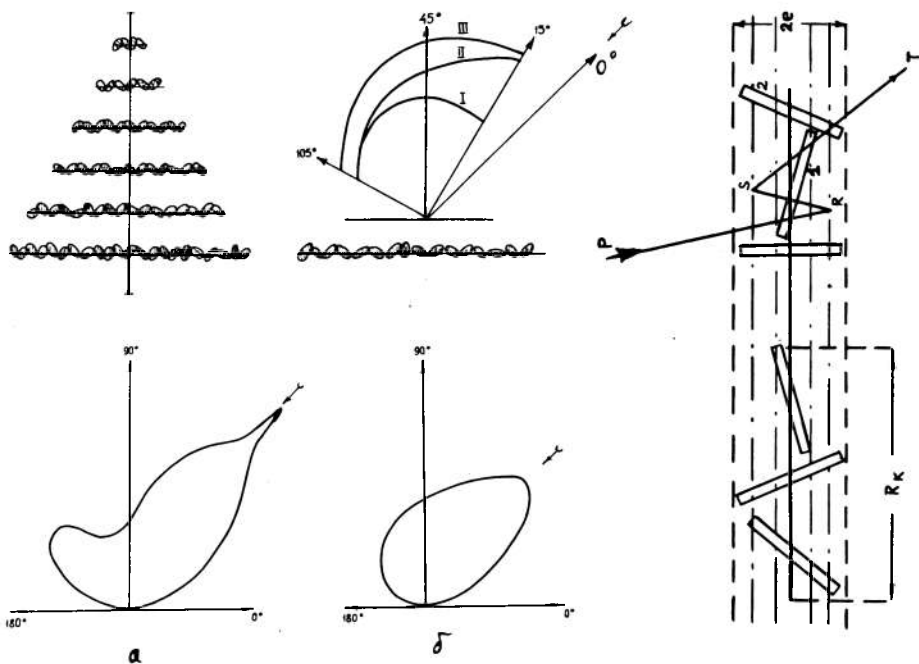


Рис. 6. Индикатриса кроны (а) и монослоя из листьев (б). $\leftarrow$ направление падения солнечных лучей.

Рис. 7. Схема «блуждания» многократнорассеянного фотона внутри яруса ели. Прямоугольниками условно обозначены малые веточки ели, а ломаной линией со стрелками — траектория движения фотона.

Рис. 8. Угловое распределение вероятности рассеяния фотона монослоем листьев. $\leftarrow$ направление падения солнечных лучей.

в применении к посевам сельскохозяйственных культур [35]. Растительный покров, для которого проводились расчеты, моделировался набором растений, посаженных квадратно-гнездовым способом и имеющих горизонтально расположенные круглые матовые листья на вертикальных непрозрачных стеблях. Основные параметры модели следующие: спектральный диапазон рассеиваемого растениями излучения: 380—710 нм; коэффициент спектрального отражения R листьев и стеблей — 0,1; почва абсолютно черная; расстояние между соседними растениями $A=10$ см; густота посева — 100 раст./м²; высота посева $H=100$ см; расстояние между соседними листьями на стебле $Z_r=10$ см; среднее число листьев на растении $N_L=10$ см; угол поворота на генетической спирали расположения листьев на стебле $\alpha_r=120^\circ$; диаметр листа $d_L=6$ см; диаметр стебля $d_s=0,02$ см; индекс листовой поверхности посева $L_L=2,69$; индекс поверхности стеблей посева $L_s=0,02$. Приведем основные результаты расчета индикатрис рассеяния РП в плоскости солнечного вертикала для различных значений параметров архитектуры РП.

Влияние высоты посева и расстояния между соседними листьями на стебле. Классическая теория переноса излучения, базирующаяся на рассмотрении РП как анизотропной пластинчатой мутной среды, в принципе не в состоянии учитывать высоту посева или расстояние между соседними листьями на стебле. Однако из общих соображений ясно, что если в посеве с горизонтальными листьями, имеющими конечные размеры, расстояние между листьями приближается к нулю, то посев переходит в монослой [36]. В случае мутного слоя КСЯ не зависит от направления визирования, а в случае густого посева яркость монослоя в два раза превышает яркость толстого мутного слоя. Эту тенденцию и подтверждают численные эксперименты, проведенные по алгоритму метода $M-K$, описанному в [35].

На рис. 9 изображена зависимость КСЯ посева $b(V)$ от зенитного угла визирования при $\varphi=\varphi_0$ и $\varphi=\varphi_0+180^\circ$ и $V_0=0$, т. е. Солнце находится в зените. Расчеты проведены при $\alpha_r=60^\circ$. В рассматриваемом случае имеет место перекрытие как листьев одного растения, так и листьев соседних растений. Друг над другом находятся первый и седьмой, второй и восьмой и т. д. листья. Расчеты проведены для случаев, когда расстояния между листьями изменялись от 2,5 см (рис. 9, кривая 1) до 40 см (рис. 9, кривая 4). Соответственно высота посева изменялась от 30 см до 480 см.

Из анализа рис. 9 вытекает, что при постоянной фитоплощади посева уменьшение высоты посева приводит к увеличению его яркости, причем это особенно заметно в области обратного блеска. Высота посева существенно влияет и на ширину области обратного блеска: в случае высокого посева обратный блеск очень узкий и посев приближается к мутному слою. В случае низкого посева отличие индикатрисы отражения модельного посева от индикатрисы отражения мутного слоя существенное и ширина обратного блеска распространяется до расстояния 60° от надира. Круг

с радиусом 0,05 на рис. 9 соответствует КСЯ мутного слоя.

Вне зоны обратного блеска индикатриса модельного посева соответствует индикатрисе матовой поверхности (мутного слоя). Резкий спад яркости в околонадирных направлениях в случае высокого посева (рис. 9, кривая 4) обусловлен тем, что при увеличении зенитного угла Солнца в направлении визирования резко растет доля затененных друг другом листьев и соответственно уменьшается доля освещенных листьев, за счет которых и формируется обратный блеск. При низком посеве увеличение доли затененных листьев происходит медленнее. То обстоятельство, что КСЯ нашего модельного посева, как правило, больше чем КСЯ мутного слоя, означает, что размещение листьев в посеве не подчиняется закону Пуассона, а отклоняется в сторону регулярного размещения.

Влияние размера листа. Одним из принципиальных различий между нашим модельным посевом и мутным слоем является конечный размер листьев. Для оценки влияния диаметра d_L круглого листа на индикатрису отражения была проведена серия экспериментов, в которых с увеличением d_L уменьшалось расстояние между растениями A таким образом, что высота посева и индекс листовой поверхности оставались постоянными. Тогда в случае малых листьев густота посева большая и роль растения как структурного элемента уменьшается, а сам посев приближается к мелкодисперсному мутному слою. В случае больших листьев густота посева малая, но роль растения как структурного элемента также уменьшается и посев приближается к крупнодисперсному слою.

Из анализа рис. 11, на котором приведены результаты описанных выше расчетов, вытекает, что при увеличении диаметра листа яркость посева растет, а область обратного блеска существенно увеличивается. Вне области обратного блеска индикатриса отражения близка к индикатрисе матовой поверхности. Сравнение рис. 10 и 11 показывает, что увеличение диаметра листа или расстояния между соседними листьями одинаково увеличивает размеры обратного блеска. Это сходство обусловлено тем, что при взаимном затенении листьев существенны угловые размеры листьев, причем не столь важно, происходит ли увеличение угловых размеров путем увеличения диаметра листа или уменьшения расстояния между соседними листьями. В случае мутной среды угловые размеры листа $\Omega = d_L/z_r \rightarrow 0$ и телесный угол, характеризующий размеры обратного блеска $\Omega_n \rightarrow 0$. В случае монослоя $\Omega \rightarrow 2\pi$ и $\Omega_n \rightarrow 2\pi$.

Влияние структуры посева. Для оценки влияния формы растения на индикатрису отражения при постоянной высоте посева и индексе листовой поверхности был уменьшен диаметр листа и соответственно уменьшено расстояние между соседними листьями на стебле. При малых значениях диаметра листа эффективный диаметр растения также мал, листья находятся на стебле близко друг к другу и растение соответствует тонкому цилиндру, плотно наполненному малыми листьями. Межкроновое пространство между растениями сравнительно большое. В таком посеве в максимальной мере доминирует индивидуальное растение и посев далек от пред-

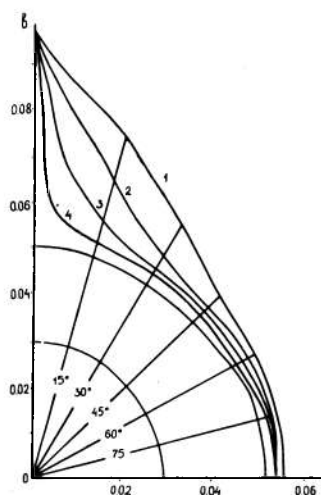


Рис. 9. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования при различных высотах посева. Зенитный угол Солнца $V_0=0$, угол генетической спирали $\alpha_r=60^\circ$, $N_r=12$, $L_r=3,25$; остальные параметры стандартные.

Кривая	1	2	3	4
Расстояние между листьями на стебле Z_r	2,5	5	10	40
Высота посева H , см	30	60	120	480

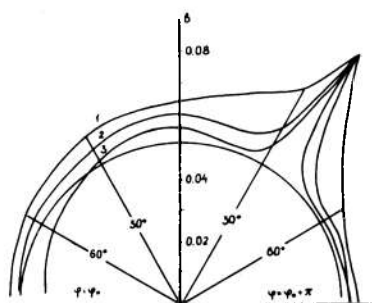


Рис. 10. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования при различных высотах посева. Параметры стандартные.

Кривая	1	2	3
Расстояние между листьями на стебле Z_r , см	2,5	5	20
Высота посева H , см	25	50	200

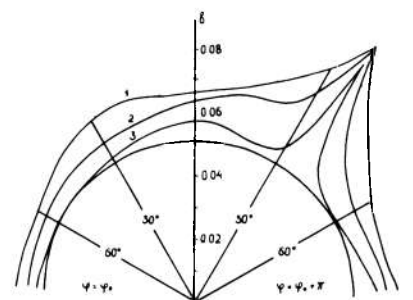


Рис. 11. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различных значениях диаметра листа

Кривая	1	2	3
Диаметр листа d_L , см	16	4	2
Расстояние между растениями в рядке A , см	27	7	3

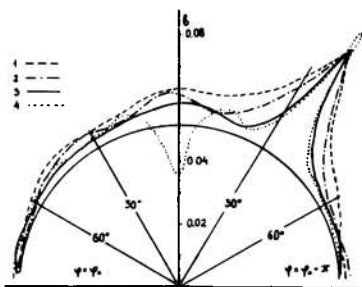


Рис. 12. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различном количестве ярусов посева

Кривая	1	2	3	4
Диаметр листа, d_L , см	12,5	9	6	4
Расстояние между листьями на стебле, Z_r , см	40	20	10	5
число ярусов в посеве	2,5	5	10	20

ставления его мутным слоем. Наоборот, при больших значениях диаметра листа растение имеет лишь несколько крупных листьев, роль индивидуального растения в архитектуре посева мала и посев состоит из нескольких слоев крупных листьев.

Таким образом, крайние значения диаметра листа соответствуют крайним вариациям архитектуры посева. Влияние этого на индикатрису отражения показано на рис. 12. Эффект обратного блеска сильнее всего выражен в случае слоистой структуры посева (кривая 1) и слабее всего на цилиндрической структуре растения (кривая 4). Широкий и глубокий минимум индикатрисы в надири при цилиндрической структуре обусловлен влиянием черной почвы, доля которой велика. Вторичный минимум при $V=20^\circ$, $\varphi=\varphi_0+180^\circ$, по-видимому, обусловлен конкретным значением азимута солнца $\varphi_0=30^\circ$, при котором взаимное затенение цилиндров — растений максимальное.

Влияние формы листа. Преобладающее большинство численных экспериментов проведено с листьями, имеющими круглую форму. Однако круглые листья не свойственны многим с.-х. культурам, особенно злакам. Поэтому представляет интерес изучить влияние формы листа на индикатрису отражения посева. Для этой цели нами были проведены расчеты для листьев, имеющих эллиптическую форму. Рассчитаны три варианта: а) круглые листья диаметром 3 см, 2) умеренный эллипс, длина полуосей 6 и 1,5 см и в) длинный эллипс, длина полуосей 9 и 1 см. Рассмотрение результатов расчетов, изображенных на рис. 6, показывает, что с увеличением эллиптичности листьев яркость посева убывает, особенно в области обратного блеска. Уменьшается и ширина блеска, а околозенитный минимум КСЯ обусловлен тем, что при расчетах $b_n=0$, т. е. почва черная. На основе рис. 13 можно сделать общее заключение, что посев с длинными узкими листьями лучше соответствует модели мутного слоя, чем посев с круглыми листьями той же площади.

Влияние угла поворота на генетической спирали. Угол поворота на генетической спирали α_r является важным формообразующим параметром растения и определяет расположение листьев на стебле. От этого параметра зависит и вероятность того, что в заданном направлении мы сможем увидеть нижние листья или почву. Например, в теоретическом, в природе нереализуемом случае, все листья на стебле находятся по одну сторону от стебля, точно друг над другом. В этом случае в направлении надира мы видим только самый верхний лист и взаимное затенение листьев максимальное. Если $\alpha_r=180^\circ$, то в одной стороне от стебля находятся все нечетные листья, а в противоположной — все четные и тогда в направлении надира мы видим только два верхних листа, а все остальные листья одного растения находятся под ними.

В надирном направлении при $\alpha_r=360^\circ$ и 180° в пределах одного витка спирали круглые листья не затеняют друг друга, но при дальнейшем уменьшении α_r начинается взаимное затенение листьев одного витка. Значение угла поворота α_r вместе с расстоянием между листьями z_r определяет и толщину верхнего активного слоя посева

$z_s = 360 \alpha_r / \alpha_n$, где взаимное затенение листьев минимальное. В направлении надир листья, находящиеся ниже активного слоя, уже не видны и в формировании КСЯ они не участвуют.

На рис. 14 изображен разрез индикатрисы посева в плоскости солнечного вертикала. Яркость посева минимальная при $\alpha_r = 360^\circ$, когда на фоне черной почвы освещен только самый верхний лист растения, а все остальные листья растения находятся в тени. Индикатриса посева соответствует индикатрисе матовой поверхности, т. е. индикатрисе верхнего листа. При $\alpha_r = 180^\circ$ освещены два верхних листа и зависимость $b(V)$ определяется тем, в какой степени вышестоящие первые листья затеняют вторые. В околзенитных направлениях наблюдается слабо выраженный обратный блеск. При дальнейшем уменьшении α_r яркость в зените растет, т. к. на одном витке генетической спирали растет число листьев, каждый из которых вносит свой вклад в яркость посева. Одновременно с этим убывает вероятность увидеть черную почву. Положение усложняется при других направлениях визирования. В связи с уменьшением α_r растет число освещенных листьев, но и увеличивается глубина местонахождения последних освещенных листьев. Поэтому вероятность увидеть эти листья уменьшается из-за их затенения вышестоящими листьями. В результате двух противоположно действующих факторов — увеличения числа освещенных листьев и уменьшения вероятности увидеть нижние из них, яркость в боковых направлениях при уменьшении α_r сначала растет, достигая максимума около $\alpha_r = 90^\circ$, а затем начинает убывать.

На рис. 15 изображен разрез индикатрисы в солнечном вертикале при $V_0 = 36^\circ$. Мы видим, что обратный блеск ярко выражен, но поведение индикатрисы в этой области мало зависит от угла поворота α_r . Влияние α_r на вид индикатрисы максимально в направлении надир. Наименьшая яркость достигается при $\alpha_r = 360^\circ$. Это обусловлено тем, что мы видим только самые верхние листья, а остальные находятся в тени, хотя часть из них и освещена. При $\alpha_r = 180^\circ$ мы, кроме верхнего листа, видим и вторые сверху листья, часть которых освещена. При дальнейшем уменьшении α_r в образовании яркости посева опять начинают действовать два противоположных фактора. В связи с увеличением числа листьев на одном витке генетической спирали по-прежнему растет вероятность увидеть в надир нижние листья. Но одновременно увеличивается и вероятность их затенения вышележащими листьями соседних растений, находящимися на пути солнечного луча. Первый фактор преобладает до $\alpha_r = 90^\circ$, когда КСЯ в надире достигает максимума. При дальнейшем же уменьшении α_r начинает доминировать второй фактор и КСЯ в надире убывает. Из сравнения рис. 14 и 15 можно сделать существенный вывод о том, что индикатриса в околсолнечных направлениях существенно зависит от зенитного угла Солнца V_0 . Индикатриса наиболее чувствительна к изменению угла поворота генетической спирали α_r в направлении надир, но характер зависимости неоднозначен при различных зенитных углах Солнца V_0 .

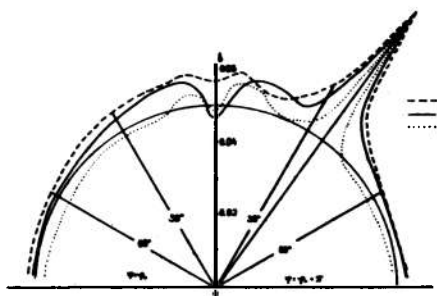


Рис. 13. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различной степени эллиптичности листа. Яркость почвы $b_{\Pi}=0,1$, остальные параметры стандартные, 1 — круглый лист $d_{L1}=d_{L2}=3$ см., 2 — умеренно эллиптический лист $d_{L1}=6$ см, $d_{L2}=1,5$ см; 3 — сильно эллиптический лист $d_{L1}=9$ см, $d_{L2}=1$ см.

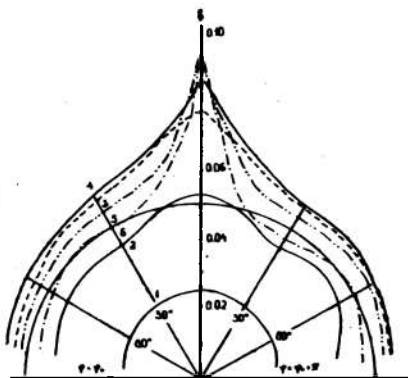


Рис. 14. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различных значениях угла поворота генетической спирали d_r . Солнце в зените $v_0=0^\circ$, остальные параметры стандартные. 1 — $\alpha_r=360^\circ$; 2 — $\alpha_r=180^\circ$; 3 — $\alpha_r=120^\circ$; 4 — $\alpha_r=90^\circ$; 6 — $\alpha_r=60^\circ$; 5 — $\alpha_r=45^\circ$.

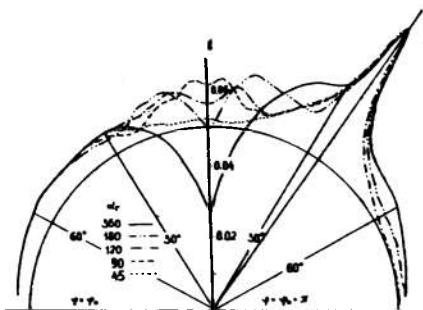


Рис. 15. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различных значениях генетической спирали.

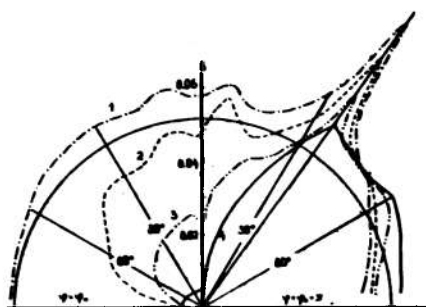


Рис. 16. Зависимость КСЯ посева $b(v)$ от зенитного угла визирования v при различных долях индекса площади вертикальных стеблей в общем листовом индексе фитоповерхности посева

Кривая	1	2	3	4
Индекс площади стеблей L_s	0	1	2	2,71
Индекс листовой поверхности L_L	2,71	1,71	0,71	0
Диаметр листа d_L , см	3,0	2,4	1,5	0

Роль стеблей в КСЯ посева. Для оценки влияния стеблей на индикатрисы отражения был проведен следующий численный эксперимент: при стандартных значениях параметров посева увеличивалась эффективная площадь стеблей и соответственно уменьшалась площадь листьев таким образом, чтобы их суммарная площадь осталась постоянной. Кривая 1 на рис. 16 соответствует случаю, когда стебли отсутствуют. При увеличении площади стеблей начинается вырождение левой стороны индикатрисы. Это обусловлено тем, что вертикальные стебли непрозрачны и при азимуте $\varphi = \varphi_0$ не вносят вклад в КСЯ. Если весь посев состоит только из стеблей (кривая 4), то яркость при азимуте $\varphi = \varphi_0$ образуется только за счет верхнего торца цилиндра. Другим эффектом, вызванным увеличением площади стеблей, является уменьшение величины и ширины обратного блеска.

Проведенные для с.-х. посева численные эксперименты позволили исследовать чувствительность индикатрисы рассеяния посева к вариациям его геометрических параметров.

Как в случае модельного посева сельхозкультур, так и для кроны отдельного дерева, имеет место существенная зависимость индикатрисы рассеяния от геометрического строения РП. Особенно сильно эта зависимость проявляется в области обратного рассеяния. Поэтому одним из основных выводов главы I, имеющих важное практическое приложение, является обоснование целесообразности измерения параметров индикатрисы РП в области обратного блеска для получения информации об архитектонике растительности. Именно эта область индикатрисы наиболее полно отражает дискретное строение растений и наиболее чувствительна к пространственному размещению листьев, что непосредственно связано с такими важными параметрами РП, как фаза развития, биомасса растений, листовой индекс, проективное покрытие. Поэтому практическая реализация выводов теоретических исследований и разработка дистанционных методов измерения индикатрисы в области обратного рассеяния становится актуальной задачей дистанционных методов.

Перейдем к рассмотрению экспериментальных исследований, проведенных в этом направлении.

1.2. Дистанционные измерения индикатрис растительности.

В течение многих десятилетий проводятся измерения спектральных и интегральных угловых характеристик отражения основных типов подстилающих поверхностей [36—38].

Одним из главных стимулов развития этих исследований была необходимость решения задач спутниковой метеорологии, связанная с расчетом потока уходящей коротковолновой радиации за пределами атмосферы [39]. В схеме расчетов допускался изотропный характер рассеяния радиации, хотя многочисленные измерения [40], проведенные с использованием аэростатов, самолетов и спутников, говорили о наличии существенной анизотропии отра-

жения. Использование ламбертовой модели отражения приводило в ряде случаев к большим ошибкам в расчетах потоков уходящей коротковолновой радиации. В дальнейшем широкое применение космической и аэрофотосъемки для целей народного хозяйства столкнулось с большими методическими трудностями при интерпретации изображений земной поверхности, получаемых с помощью фотокамер и сканирующих систем в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра [41]: при обработке материалов космической и аэросъемки необходима информация об угловой структуре поля рассеянной подстилающей поверхностью солнечной радиации. Кроме того, теоретические исследования в области математического моделирования процессов переноса солнечной радиации в РП, описанные в главе I, обосновали целесообразность дистанционного измерения индикатрис рассеяния для получения информации о геометрической структуре растительности. Расчеты показали, что для растительности наиболее информативная область индикатрисы, характеризующая ее геометрическое строение, — область обратного блеска. Практическая невозможность измерения тонкой структуры индикатрисы в малой области углов обратного рассеяния с помощью традиционных методов спектрометрирования явилась причиной развития лазерных методов измерения.

Таким образом, экспериментальные исследования индикатрис отражения разных типов подстилающей поверхности стали актуальной задачей дистанционного зондирования.

1.2.1. Пассивные дистанционные методы измерения индикатрис растительности

В нашей стране первые систематические дистанционные измерения индикатрис растительности и почв были проведены сотрудниками Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) с помощью спектрального индикатометра, устанавливаемого на борту самолета ИЛ-18 [42]. Индикатометр — узкоугольный сканирующий фотометр, сопряженный со спектральным альбедометром и датчиком положения Солнца [43]. Индикатометр позволяет измерять относительную индикатрису яркости f — отношение яркости B объекта в заданном направлении к яркости в надире:

$$f_i(\theta, \varphi) = b(\theta, \varphi) / b(0) \quad (23),$$

где θ и φ — зенитный и азимутальный угол визирования. Индикатриса коэффициента отражения $R(\theta, \varphi)$ рассчитывается по формуле [42]:

$$R(\theta, \varphi, i) = A(i) / F_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \quad (24),$$

где: A — альbedo поверхности, измеренное альбедометром;
 i — зенитное расстояние Солнца;

$$F_i = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} f_i(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (25)$$

Коэффициент спектральной яркости $b(\theta, \varphi)$ (отношение яркости объекта к яркости эталона в тех же условиях освещения) связан с коэффициентом отражения $R(\theta, \varphi)$ соотношением:

$$b(\theta, \varphi) = \pi R(\theta, \varphi) \quad (26)$$

Таким образом, комплекс аппаратуры, состоящий из узкоугольного фотометра, альбедометра и датчика угла Солнца позволяет измерять такие угловые характеристики отражения, как относительную индикатрису яркости, индикатрису коэффициента отражения и коэффициента яркости поверхности при заданном положении Солнца.

В 70-х годах с помощью такого комплекса аппаратуры были выполнены измерения угловых отражательных характеристик лесных насаждений с борта самолета ИЛ-18 [42]. На рис. 17 даны индикатрисы яркости тайги, состоящей из хвойно-лиственных пород с проективным покрытием 90%.

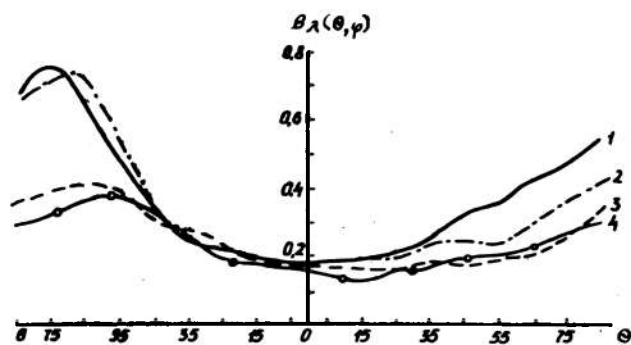


Рис. 17. Индикатрисы коэффициента яркости сплошной тайги в плоскости солнечного вертикала для двух спектральных диапазонов λ и для двух высот Солнца h_0 :

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| 1 — $\lambda = 1,24$ мкм | $h_0 = 18,3^\circ$ |
| 2 — $\lambda = 0,99$ мкм | $h_0 = 18,3^\circ$ |
| 3 — $\lambda = 0,99$ мкм | $h_0 = 35,1^\circ$ |

Результаты первых измерений, проведенных с борта самолета — лаборатории ГГО, позволили выявить лишь общие закономерности формирования индикатрис рассеяния лесной растительности. Основные из них сводятся к следующему:

1) Для индикатрис яркости древесных лесных насаждений характерно наличие максимума обратного отражения, в котором коэффи-

циент яркости может более чем в два раза превышать свое значение в надире;

2) Индикатрисы относительной яркости лесного массива в разных спектральных интервалах 0,96—1,38 мкм практически неизменны в широком диапазоне изменений угла визирования. Средний разброс величины яркости не превышает 13%;

3) Индикатрисы относительной яркости сплошного леса для различных лесных районов Якутской АССР и Красноярского края практически одинаковые. Различия не превышают 6% по всем углам θ ;

4) Коэффициент яркости падает с ростом проективного покрытия леса;

5) Для большинства углов визирования относительная яркость и коэффициент яркости растительности с преобладанием травяного покрова значительно выше, чем для сплошного леса;

6) Для большинства углов визирования с уменьшением высоты Солнца угловая анизотропия отражения леса увеличивается.

Полученные данные положили начало исследованию связи индикатрис рассеяния растительности с ее геометрическим строением. Однако результаты проведенных измерений не позволяют полностью объяснить особенности механизмов взаимодействия солнечной радиации с растительностью, которые формируют угловую структуру поля рассеянной радиации. Результаты математического моделирования радиационного режима РП и расчеты индикатрис рассеяния растительности с помощью методов Монте-Карло, описанные в главе 1, дают ценные рекомендации для совершенствования методики измерения индикатрис с целью получения информации о геометрической структуре и оптических параметрах растительности. Дальнейшее развитие экспериментальных исследований проводилось с учетом этих рекомендаций, что существенно повлияло на качество и информативность измерений. Основные рекомендации теоретических исследований сводились к следующему:

1. Измерение индикатрис необходимо проводить не только в области БИКР, как это делалось в вышеописанных работах, но и в видимом, фотосинтетически-активном диапазоне спектра. Это связано с высоким коэффициентом отражения и пропускания листьев в области БИКР, что приводит к эффектам многократного рассеяния радиации внутри РП и сглаживанию особенностей угловой структуры поля рассеянной радиации, обусловленных геометрическим строением растений. В красной (670—690 нм) области спектра преобладает однократное рассеяние радиации и эффекты, связанные с взаимным затенением листьев и другими особенностями их пространственного размещения, проявляются более наглядно.

2. Целесообразно измерение тонкой структуры индикатрисы в области малых ($3-10^\circ$) углов обратного рассеяния в плоскости солнечного вертикала. Эта область углов рассеяния обладает наибольшей информативностью с точки зрения геометрии растительности. Принимая во внимание большие технические сложности таких измерений с помощью традиционно используемой узкоугольной пассивной фотометрической аппаратуры, целесообразна разработка принципиально новых методов измерений. Это могут быть активные методы зондирования РП в оптическом диапазоне с использованием лазерной техники.

3. Принимая во внимание высокую чувствительность индикатрисы к изменению геометрического строения РП, методические исследования необходимо проводить на горизонтально однородных растительных объектах, что облегчит интерпретацию полученных

данных. Поэтому приведенные выше индикатрисы рассеяния смешанных лесных насаждений трудно интерпретируемы.

Экспериментальные работы, проводившиеся в последние годы с учетом рекомендаций теоретических исследований, позволили получить ценный систематизированный материал по индикатрисам отражения различных типов растительного покрова в природных условиях.

Особого внимания в этом плане заслуживают работы, проводимые с конца 70-х годов сотрудниками Института астрофизики и физики атмосферы Эстонской Академии наук (ИАФА АН ЭССР) [44,45].

В результате проведенных ими работ были получены угловые зависимости коэффициента спектральной яркости как древесной, так и травянистой растительности в видимой и близкой инфракрасной области спектра. Измерения проводились с помощью узкоугольного [угол зрения $20'$] самолетного телеспектрофотометра ТСФМ-4М [46] с борта вертолета Ка-26.

Угловые характеристики отражения измерялись с высоты 50 м двумя способами: ручным сканированием и при фиксированном надирном угле фотометра. В комплекс бортовой аппаратуры входят оптический визир, электрический датчик надирного угла и записывающий магнитофон для регистрации данных. Неточность определения надирного угла и азимута фотометра порядка $3-5^\circ$ обусловлена отсутствием гиropлатформы и неустойчивостью вертолета.

Угловые характеристики отражения объектов измерялись в вертикале Солнца ($\varphi = \varphi_0$, $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$) и в перпендикулярной к вертикалу Солнца плоскости ($\varphi = \varphi_0 \pm 90^\circ$) в мае—июне 1981 г. для озимой ржи и в июле—августе 1982 г. для остальных объектов расположенных на территории ЭССР. Рассмотрим некоторые результаты.

Березовый лес низинно-болотный, формула состава 10Б, бонитет IV, запас $140 \text{ м}^3/\text{га}$, полнота 1,24, средний возраст 45 лет, средний диаметр стволов на уровне груди 12 см, средняя высота деревьев 13 м, среднее расстояние между стволами 2,2 м, число стволов 2290 шт./га, размеры однородного участка $1 \times 1 \text{ км}$. Представляются данные измерений ручным сканированием в вертикале Солнца 26.VII.1982 г.

Сосновый лес вересково-беломошниковый, формула состава 10С, бонитет III, запас $270 \text{ м}^3/\text{га}$, полнота 0,8, средний возраст 110 лет, средний диаметр стволов на уровне груди 28 см, средняя высота деревьев 21,5 м, среднее расстояние между стволами 4,0 м, число стволов 640 шт./га, размеры леса $500 \times 700 \text{ м}$. Представляются данные измерений ручным сканированием в вертикале Солнца 20.VIII.1982 г.

Редкий сосновый лес на болоте, в дальнейшем «болото». Сосновый лес сфагновый, формула состава 9С + 1Б, максимальный возраст 200 лет, средняя высота деревьев 3 м, диаметр кроны 1,5 м, число деревьев 510 шт./га, среднее расстояние между деревьями

4,3 м, размеры болота 1×1 км. Представляются данные измерений, выполненных с помощью ручного сканирования в вертикале Солнца 24 и 26.VII.1982 г.

Культурные травы — посев ежи сборной и тимopheевки, проективное покрытие 100%, высота травостоя 80 см, размеры поля 300×1000 м. Представляются результаты измерений ручным сканированием в вертикале Солнца 11.VII.1982 г.

Посев ячменя, сорт «Лийса» в фазе молочной спелости, индекс листовой поверхности зеленых листьев 0,3, проективное покрытие 67%, высота посева 85 см, размеры поля 400×1000 м. Ручное сканирование в вертикале Солнца 26.VII.1982 г.

Посев озимой ржи, сорт «Кустро». Размеры поля 500×1500 м. Измерения проведены ручным сканированием при ясной погоде в вертикале Солнца 19.VI.1981 г. На том же поле проведены и многократные измерения с фиксированным надирным углом фотометра в период с 14.V по 19.VI.1981 г. За этот период рожь прошла фазы выхода в трубку, колошения и цветения.

Результаты измерений в красной и ближней инфракрасной (БИК) областях спектра ручным сканированием приведены на рис. 18 и 19. По оси абсцисс на диаграммах отложен надирный угол фотометра, левая сторона каждой диаграммы соответствует азимуту $\varphi = \varphi_0$, правая — $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$ где φ_0 — азимут Солнца, φ — азимут плоскости сканирования. По оси ординат отложен коэффициент спектральной яркости (КСЯ).

Вертикальная штриховая линия на диаграммах обозначает зенитный угол Солнца V_0 . В некоторых случаях при сканировании в поле зрения фотометра попадала тень вертолета, тогда на индикатрисе КСЯ виден глубокий узкий минимум, $V = V_0$. Угловой размер тени вертолета с высоты 50 м примерно 2° . Каждая ломаная линия на диаграммах соответствует одному скану. Каждая точка на этих кривых является средним значением 20—40 последовательных отсчетов показаний фотометра.

В вертикале Солнца все измерения индикатрисы сильно асимметричны. В полосе поглощения хлорофилла ($\lambda = 0,675$ мкм) доминирует однократно рассеянная радиация и роль теней в формировании углового хода на обратной стороне индикатрисы ($\varphi = \varphi_0$) существенно превышает яркость зеркальной стороны ($\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$). У краев тени вертолета, где вероятность наблюдения теней фитоэлементов наименьшая, яркость естественных РП в 2—3,5 раза превышает яркость объектов в надире. Минимум яркости березового леса приходится на 10 — 15° , у болота и соснового леса — примерно на 30° от надира в зеркальную сторону.

На обратной стороне индикатрисы яркость уменьшается от направления обратного блеска к горизонту; уменьшение яркости наибольшее у соснового леса. Разрезы индикатрис березового, соснового лесов и болота имеют различия, которые в основном объяснимы различиями структуры объектов. Основными рассеивающими элементами сосняка являются хвоя и побеги, размеры которых по сравнению с глубиной рассеивающего слоя малы. Большин-

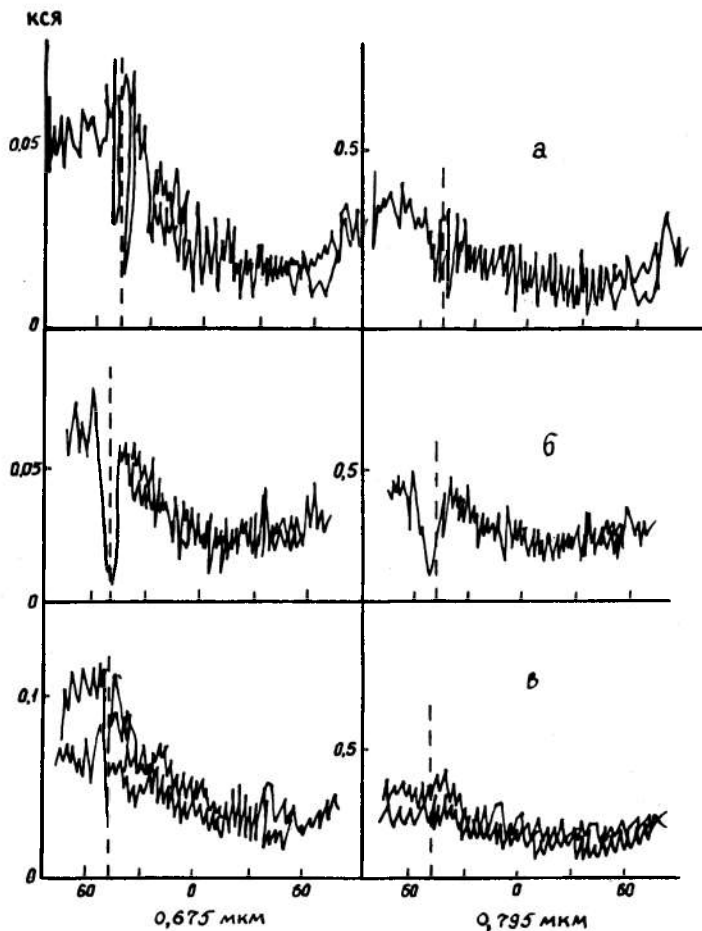


Рис. 18. Угловая зависимость КСЯ в вертикале Солнца; а — сосновый лес, $v_0=48^\circ$; б — березовый лес, $v_0=50^\circ$; в — болото, $v_0=42-49^\circ$; v_0 — высота Солнца.

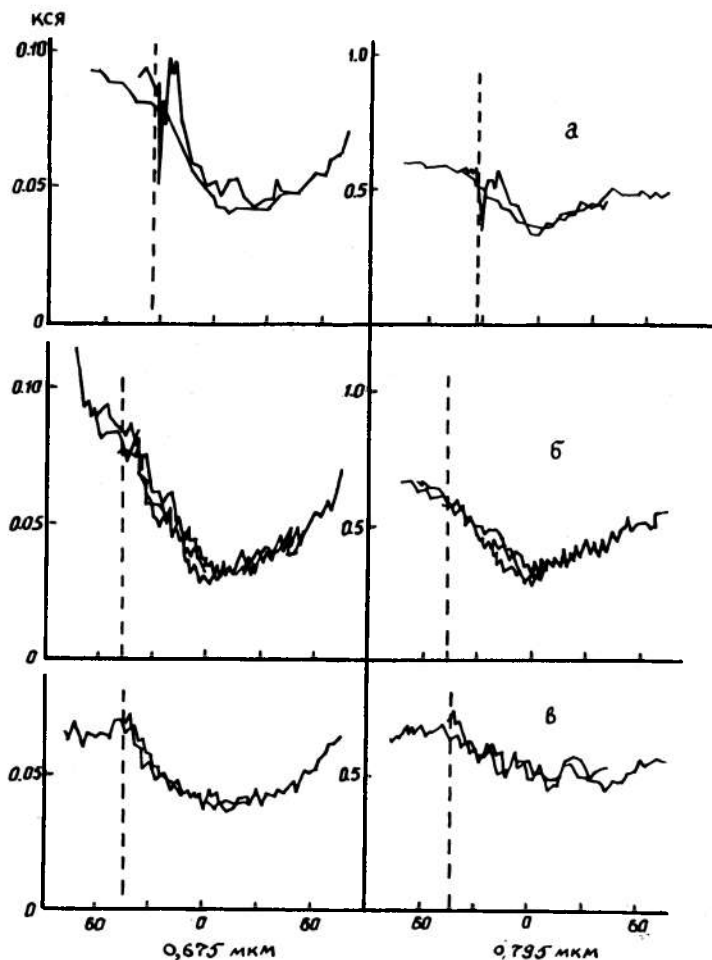


Рис. 19. Угловая зависимость КСЯ в вертикале Солнца; а — посев ржи, $v_0=35^\circ$; б — посев ячменя, $v_0=47^\circ$; в — культурные травы, $v_0=43^\circ$; высота Солнца — v_0 .

ство фитоповерхности соснового леса находится высоко над земной поверхностью, но в пологом сосняке много небольших просветов. Как следует из теоретической работы [18], такие черты структуры РП способствуют образованию четко выраженного обратного блеска.

Поле отраженной от болота радиации формируется преимущественно на уровне земной поверхности; проективное покрытие кроны деревьев на болоте меньше 9%. Хотя элементы болотной растительности — разные травы и мхи — также малы по сравнению с глубиной рассеивающего слоя, отношение характерного размера фитоэлементов к высоте растительности на болоте значительно больше, чем у соснового леса. Это уменьшает скорость спада яркости болота от обратного блеска к надиру и к горизонту в вертикале Солнца по сравнению с сосняком. Приведенные на рис. 18b разрезы индикатрисы болота позволяют сделать вывод, что на профиле индикатрисы болота в вертикале Солнца существует острый гребень: значения КСЯ на обратной стороне скана, который прошел точно через тень вертолета, в полтора раза превышают КСЯ сканов, которые не попали точно в вертикал Солнца. Одной из причин этого эффекта может являться наличие редких карликовых сосен на болоте. Как только линия визирования фотометра отклоняется от вертикала Солнца, происходит значительное увеличение вероятности наблюдения теней деревьев на земной поверхности.

Листья березы крупнее, чем хвоя сосны, и кроны берёз менее прозрачны, чем кроны сосен. Оба эти свойства делают обратный блеск березового леса более пологим, чем у соснового. Минимум яркости березового леса ближе к надиру, чем у соснового или болота, причем наблюдается более заметный рост яркости от надир к горизонту при азимуте $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$. В значительной степени это обусловлено зеркальным отражением радиации от блестящей поверхности листьев березы.

Разрезы индикатрис посевов ржи, ячменя и культурных трав в вертикале Солнца, измеренные ручным сканированием, приведены на рис. 19. Видно, что индикатрисы сельскохозяйственных угодий значительно отличаются от индикатрис естественных РП. Асимметрия индикатрис в вертикале Солнца все же значительная, но обратный блеск выражен менее рельефно, особенно у злаковых, по-видимому из-за влияния их вертикальной структуры.

Измеренные в зеленой области спектра индикатрисы всех объектов исследования являются промежуточными между индикатрисами в красной и БИК-областях спектра. Качественно они являются более близкими к индикатрисам в красной области спектра.

Анализ разрезов индикатрис показал, что различные растительные покровы (хвойный лес, лиственный лес, болото, злаковые, культурные травы) имеют существенно различающиеся индикатрисы рассеивания. Все описанные эффекты структуры растительного покрова, затенения, экранирования и зеркального отражения радиации более наглядно проявляются в красной области спектра, где доминирует однократное отражение, а пропускание

листьев незначительно. В области БИКР многократное отражение радиации и большое пропускание и отражение листьев сглаживают и ослабляют все эти эффекты и тем самым уменьшают информативность индикатрис.

Проведенные эксперименты, однако, не позволили измерить наиболее информативную часть индикатрисы, находящуюся в области обратного рассеяния. Тень самолета, сложность точной фиксации надирного угла визирования и курса полета не позволили получить надежные данные по тонкой структуре индикатрисы в этой области углов рассеяния. Эти же методические трудности отмечены и в работе, выполненной сотрудниками Института ботаники им. Н. Г. Холодного АН УССР с целью измерений относительных индикатрис яркости одновозрастных еловых насаждений (рис. 20) с помощью узкоугольного спектрографа РСС-2 с борта самолета АН-2 [47]. Результаты экспериментальных исследований индикатрис рассеяния РП, выполненных за рубежом, также не позволяют сделать какие-либо выводы относительно тонкой структуры углового распределения КСЯ в области обратного блеска.

Поэтому в 1983 г. в Институте ботаники АН УССР были нанаты работы по разработке активных методов измерения отражательных характеристик РП в области обратного блеска с использованием лазерных систем для исследования архитектоники РП.

1.2.2. Активные дистанционные методы исследования отражательных характеристик растительности в оптическом диапазоне.

Сущность обсуждаемых методов заключается в экспериментальной оценке вероятности затенения лазерного пятна на поверхности РП для двух близких направлений визирования в области обратного рассеяния. Измерения проводятся с помощью лазерной системы с двумя пространственно-разнесенными фотоприемниками, устанавливаемой на борту вертолета (рис. 21). Теоретическое обоснование метода дано в § 1.1. Обратимся к рис. 21. Один из фотоприемников устанавливается непосредственно рядом с лазером и его оптическая ось должна быть параллельна лазерному лучу. Второй фотоприемник отстоит от первого на некотором расстоянии так, чтобы его оптическая ось составляла с направлением распространения лазерного луча некоторый малый угол α . Такое расположение фотоприемников обеспечивает синхронное отслеживание ими лазерного пятна на поверхности РП. Если высота полета 30—40 м, а расстояние между фотоприемниками 1,5 м, то угол α равен 3—4°.

Основной целью экспериментов было установление зависимости между отражательными характеристиками РП для двух близких направлений визирования из области блеска и геометрическими параметрами растительности. В главе 1 на простых геометрических моделях было показано, как связана вероятность зате-

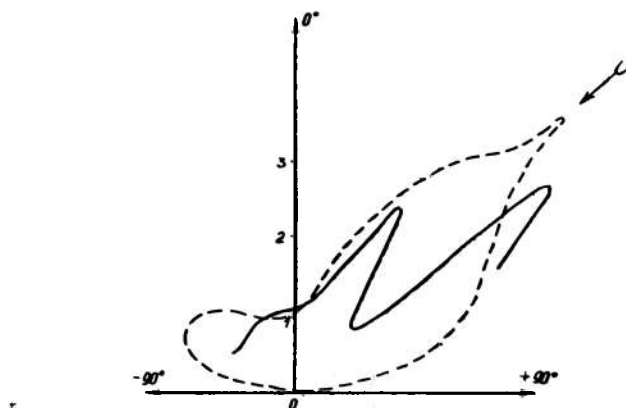


Рис. 20. Индикатриса елового насаждения, рассчитанная на ЭВМ (— — —) и измеренная с самолета (————); ← направление солнечных лучей.

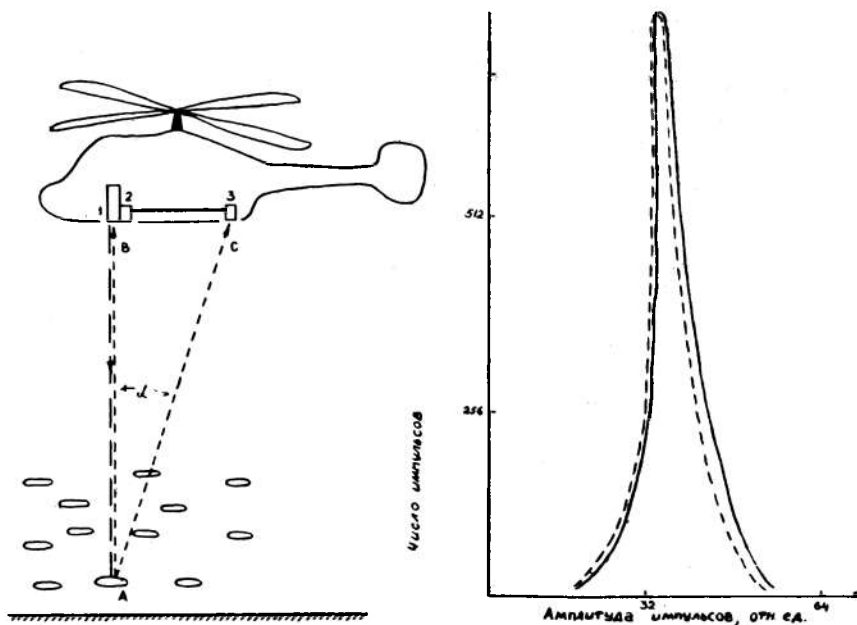


Рис. 21. Схема эксперимента по лазерному зондированию растительности с помощью двухканальной вертолетной системы с двумя пространственно-разнесенными фотоприемниками. 1 — лазер, 2—3 — приемные объективы, $\vec{AB}$ и $\vec{AC}$ — направления визирования точки А.

Рис. 22. Гистограммы распределения амплитуд отраженных от гладкой бетонной плиты импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния (————) и составляющим с ним угол 3° (— — —).

нения Р лазерного пятна для заданного направления визирования с геометрическими параметрами РП и архитектурной формой отдельного растения. Экспериментальная оценка вероятности Р, которая определяет степень анизотропии и форму индикатрисы в области обратного блеска была основной целью экспериментов.

Для проведения измерений использовалась лазерная система, описанная в главе 3, которая устанавливалась на вертолете Ка-26. Полеты проводились на высоте 30 м, как в облачную, так и в ясную погоду. Система обеспечивает синхронное отслеживание лазерного пятна диаметром 20 мм на поверхности РП двумя фотоприемниками. На цифровой магнитофон производится запись амплитуды отраженного от растительности лазерного излучения в двух выбранных направлениях визирования АВ и АС для каждого зондирующего лазерного импульса. Частота зондирующих импульсов лазерного излучения — 100 гц, длительность импульса — 10 нс, мощность — 5 Квт. Изменение уровня электрического сигнала на выходе первого фотоприемника, который всегда наблюдает пятно, обусловлено ориентацией листьев, микрорельефом почвы и вариациями коэффициента отражения листьев и почвы. Электрический сигнал на выходе второго фотоприемника по величине практически всегда совпадает с сигналом на выходе первого, за исключением тех моментов времени, когда происходит полное, либо частичное затенение пятна листьями растений в направлении визирования АС второго фотоприемника (рис. 21).

Отношение уровней электрических сигналов на выходах двух фотоприемников при каждом лазерном импульсе равно отношению яркостей лазерного пятна в двух выбранных направлениях визирования области обратного рассеяния. Измеряемое отношение не зависит от вариаций отражательной способности листьев, на которые попадает лазерное пятно, а определяется только их взаимным расположением и ориентацией в пространстве. Так как угол α между направлениями визирования мал, то можно считать, что основным фактором, влияющим на изменение указанного отношения является взаимное затенение листьев, обусловленное их пространственным расположением.

Результаты измерений представлены в виде гистограмм распределения числа отраженных световых импульсов по их амплитудам для каждого типа подстилающей поверхности в двух выбранных направлениях визирования пятна. Изменения амплитуд отраженных световых импульсов определяются геометрическим строением участков РП, в которые попадает луч лазера и оптическими параметрами фитоэлементов, на которых происходит рассеяние. При этом изменения амплитуда, связанные с вариациями отражательной способности листьев, могут быть практически устранены выбором соответствующей длины волны зондирующего луча. В нашем случае это 337 нм. В этом диапазоне имеет место сильное поглощение излучения клетчаткой листьев и у большинства растений коэффициент поглощения равен 95—97% и более, а отражение листьев большинства растений в этом диапазоне варьирует слабо

и составляет величину порядка 2—5% [48]. Кроме того, малые значения коэффициента отражения листьев обеспечивают однократное рассеяние фотонов в УФ-диапазоне, что важно для четкого выделения особенностей угловой структуры рассеянного светового поля, связанных с геометрическим строением РП. В методическом плане удобство использования УФ-диапазона для проводимых измерений связано также с низким уровнем отраженной от растений фоновой радиации Солнца в этой области спектра, которая является помехой. Все это оправдывает выбор длины волны зондирования растительности в УФ-диапазоне спектра.

Перейдем к рассмотрению результатов дистанционных измерений [4]. На рис. 22—27 представлены гистограммы распределения числа световых импульсов по амплитудам для разных типов РП.

Как показывает анализ результатов измерений, форма гистограмм определяется в основном ориентацией рассеивающих элементарных поверхностей, на которые падает луч лазера. В качестве таких поверхностей могут выступать листья растений, малые площадки почвы, формирующие микрорельеф, размер которых соизмерим с диаметром лазерного пятна. Если в качестве рассеивающей поверхности выступает гладкая бетонная плита взлетной полосы, то гистограммы имеют вид узких колоколообразных кривых гауссовского типа (рис. 22). Все значения амплитуд световых импульсов, отраженных от ровной горизонтальной поверхности бетона, группируются возле некоторой заданной величины, определяемой отражательной способностью бетона. Разброс величин мал и обусловлен, в основном, качанием корпуса вертолета относительно вертикальной оси. В случае пашни форма «гауссианов» сохраняется, но разброс данных значительно больше, что определяет полуширину «гауссиана».

Обратимся к гистограммам сельскохозяйственных полей. Так для посева пшеницы (рис. 23) в фазе молочной спелости гистограмма также имеет гауссообразную форму, что свидетельствует о наличии преимущественной ориентации нормалей листовой поверхности листьев пшеницы, соответствующей максимуму гистограммы. Литературные данные [10] подтверждают этот вывод. Гистограмма, соответствующая наклонному направлению визирования лазерного пятна, имеет меньший максимум, что объясняется наличием случаев затенения пятна в этом направлении визирования. Полегание посева существенно изменяет ориентацию листьев и делает структуру посева близкой к диффузно-рассеивающей поверхности, что находит свое отражение в гистограмме, приведенной на рис. 23.

Аналогичные выводы можно сделать относительно формы гистограмм посева люцерны в разных фазах развития: функция распределения нормалей листовых поверхностей люцерны в фазе цветения имеет характерный максимум в области 50° от вертикали, что обуславливает форму гистограммы для посева в этой фазе (рис. 24). Увеличение высоты посева люцерны от 15 до 50 см приводит к увеличению расстояния между максимумами гистограмм для

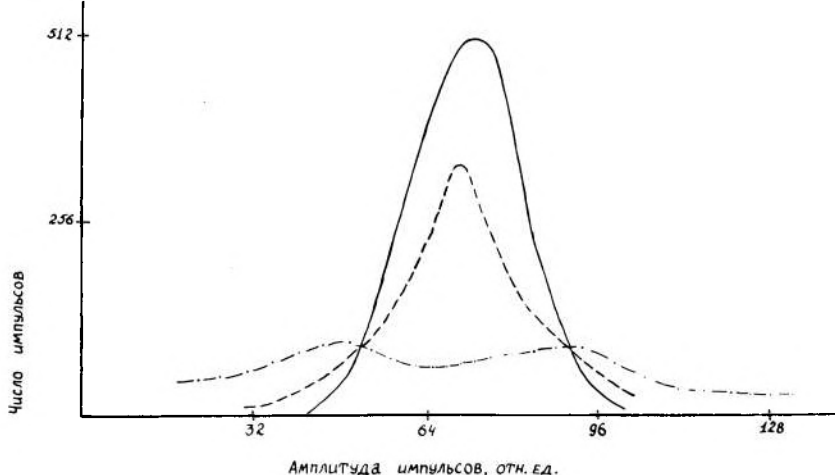


Рис. 23. Гистограммы распределения амплитуд отраженных от посева озимой пшеницы в фазе молочной спелости импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния (—) и составляющим с ним углом 3° (— — —). Гистограмма для посева с 40% полеганием в случае обратного рассеяния дана прерывистой линией с точками (— · — · —), остальные гистограммы соответствуют посеву без полегания.

двух направлений визирования в сторону меньших значений амплитуд (рис. 24б). Интересные результаты получены для посевов кукурузы, отличающихся густотой. Увеличение густоты посева приводит не только к изменению расстояния между максимумами гистограмм, но и к изменению соотношения величин этих максимумов (рис. 25). Изменение проективного покрытия посева гороха от 70 до 100% приводит к заметному смещению максимума гистограммы для надирного визирования в сторону больших амплитуд (рис. 26). В заключение приведем в качестве примера двугорбую гистограмму посева ячменя (рис. 27). Посев ячменя в фазе выхода в трубку имеет две области углов преимущественной ориентации листьев с максимумами вблизи 0° и 70° . При этом доля листьев с ориентацией, близкой к горизонтальной (70°), выше, чем в случае вертикальной (0°), что находит свое отражение в различной ширине соответствующих максимумов гистограммы.

Приведенные результаты по лазерному зондированию сельскохозяйственных культур показывают целесообразность каталогизации описанных гистограмм различных типов посевов для всех фаз их развития. Это позволило бы в дальнейшем определять их фазу развития, проективное покрытие, степень полегания, густоту и другие важные параметры их архитектоники.

При этом, информативными, дистанционно измеряемыми параметрами, могли бы быть отношение величин максимумов гистограмм для двух направлений визирования и расстояние между максимумами.

Приведенные в главе 1 результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают перспективность применения активных методов зондирования РП в оптическом диапазоне

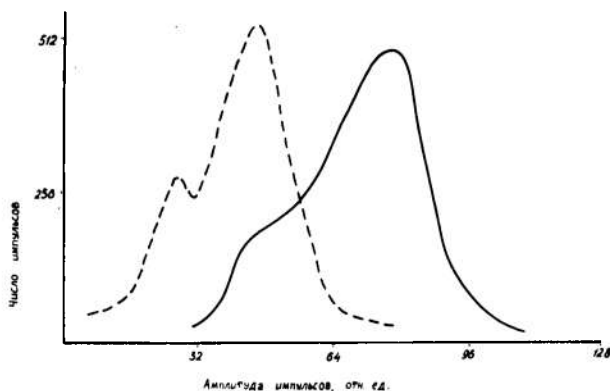
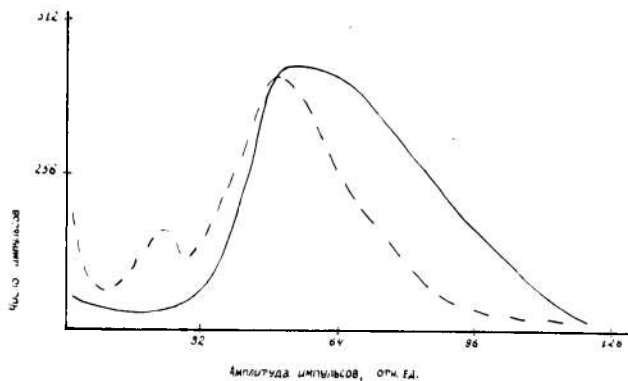


Рис. 24. Гистограммы распределения амплитуд отраженных от посева люцерны импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния (—) и составляющим с ним угол 3° (---); а — высота посева 10—15 см; б — высота посева 60 см.

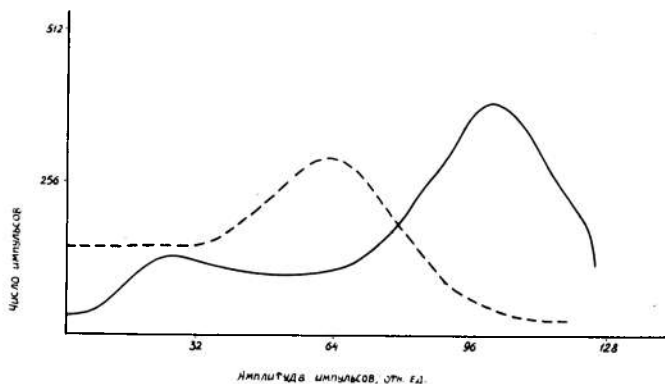
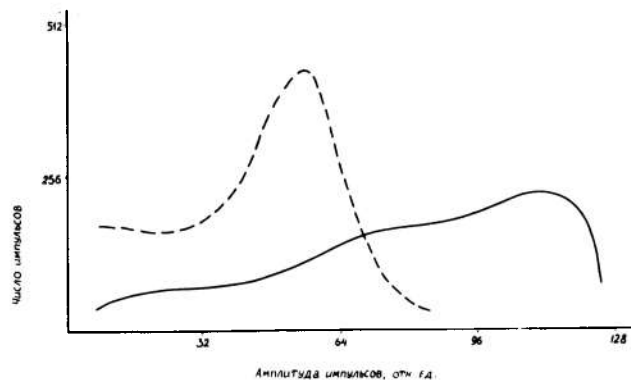


Рис. 25. Гистограммы распределения амплитуд отраженных от посева кукурузы импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния (—) и составляющим с ним углом 3° (— — —); а — высота посева 70 см; густота — 9 растений/ м^2 ; б — высота посева 70 см, густота — 16 растений/ м^2 .

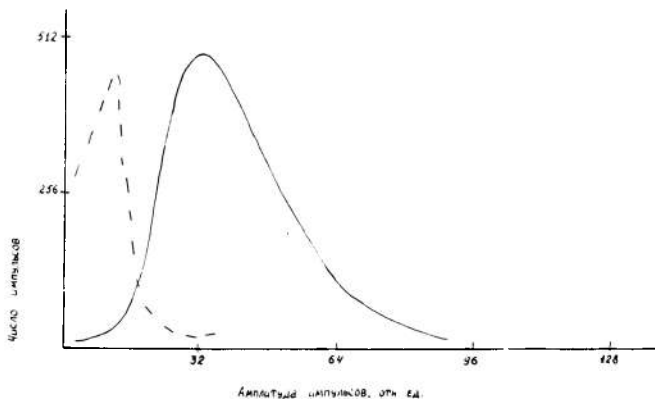


Рис. 26. Гистограммы распределения амплитуд отраженных от посева гороха импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния; проективное покрытие 100% (—), проективное покрытие 70% (— — —).

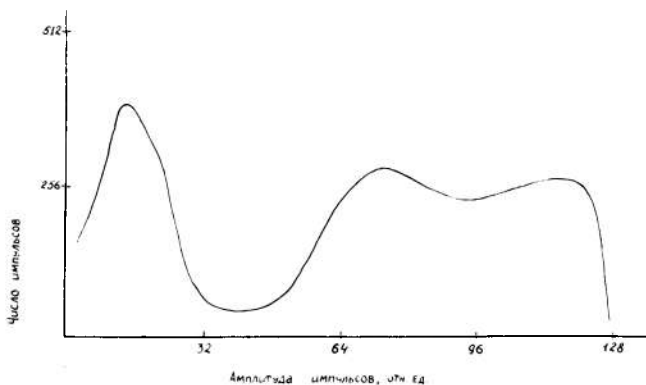


Рис. 27. Гистограмма распределения амплитуд отраженных от посева ячменя в фазе молочной спелости импульсов лазерного излучения для направления обратного рассеяния.

с целью получения информации о его геометрической структуре. Однако применение лазеров не ограничивается только этим кругом задач дистанционного зондирования растительности. Лидары могут составить основу бортовых систем для диагностики физиологического состояния растений по их люминесцентным характеристикам, что чрезвычайно важно для решения большого числа народнохозяйственных задач.

Глава 2.

ДИСТАНЦИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВЫСШЕЙ НАЗЕМНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЕЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Дистанционные исследования растительности на основе измерения ее отражательных характеристик пассивными и активными методами проявляют свою эффективность при оценке параметров РП, связанных с геометрическим строением растений: проективным покрытием, густотой, биомассой, листовым индексом и т. п. Использованию отражательных характеристик растений для оценки их физиологического состояния уделялось значительно меньшее внимание [49]. Это объясняется низкой информативностью отражательных свойств листьев растений относительно физиологических процессов, проходящих в клетках растений.

Вместе с тем известно, что основные физиологические процессы, протекающие в клетках растений, тесно связаны с таким явлением, как люминесценция. Люминесценция — излучение световой энергии при переходе фотовозбужденной молекулы из первого возбужденного состояния в основное, невозбужденное. Спектральные характеристики люминесцентного излучения клеток растений непосредственно отражают физиологическое состояние растения и тесно связаны с основными внутриклеточными процессами: фотосинтезом и дыханием. Изменения физических параметров среды обитания растений — недостаток элементов минерального питания, дефицит влаги, загрязнения среды промышленными отходами, сказываются на их физиологическом состоянии и находят свое отражение в изменении спектральных люминесцентных параметров растительности [50, 54].

Первые дистанционные измерения люминесценции растений в природных условиях с подвижной наземной платформы, установленной на высоте 10 м, были проведены в США в 1969 г. [51] в интересах сельского хозяйства.

В 1976 г. в США были проведены аналогичные эксперименты с использованием авианосителей [55].

В нашей стране дистанционные люминесцентные измерения наземной растительности с борта вертолета начали проводиться с 1983 г. [8, 52].

Последние годы отмечены бурным развитием дистанционных люминесцентных измерений с применением как активных лазерных методов [53, 58], так и пассивных — основанных на измерении люминесценции растений, возбуждаемой солнечным излучением и регистрируемой с помощью дискриминатора фраунгоферовых линий Солнца (ДФЛ) [50, 55].

2.1. Теоретические основы люминесцентных методов.

При фотовозбуждении молекулы из основного электронного состояния с наибольшей вероятностью образуется синглетное возбужденное состояние, в котором спин возбужденного электрона остается антипараллельным спину его бывшего партнера. Время жизни в таком состоянии порядка 10^{-8} с. Испускание люминесцентного излучения при обратном переходе в этом случае называется флуоресценцией. Однако, возможен и менее вероятный процесс — переход электрона из основного в триплетное возбужденное состояние с изменением направления спина электрона. Время жизни электрона в таком состоянии — порядка 10^{-3} с., а возврат электрона в основное состояние сопровождается испусканием кванта фосфоресцентного излучения. В дальнейшем нас будет интересовать флуоресценция, т. к. фотохимические процессы фотосинтеза происходят с участием синглетного возбужденного состояния хлорофилла, а не триплетного [56].

Клетки растений обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовой и видимой части спектра. При воздействии на клетку излучения с длиной волны 280 нм наблюдается наиболее коротковолновая полоса люминесценции с максимумом в области 330—350 нм. Ответственными за эту область люминесценции являются белки. Основные процессы жизнедеятельности клеток растений — процессы фотосинтеза и дыхания связаны с флуоресценцией в видимой области спектра. Флуоресценция в сине-зеленой области характеризуется наличием двух основных полос излучения: первой, с максимумом в интервале 440—480 нм и второй, с максимумом в области 510—540 нм [5, 6]. Основными веществами, ответственными за эту область, являются восстановленные пиридиннуклеотиды (НАДФ · Н, НАД · Н) и окисленные флавопротенины. Эти вещества находятся во всех без исключения клетках растений и тесно связаны с энергопроводящими системами клетки: гликолизе, пентазофосфатном цикле, цикле Кребса и др. Восстановленные формы НАД и НАДФ обладают характерными полосами поглощения на 260 и 340 нм и полосой флуоресценции с максимумом в области 440—480 нм. В окисленном состоянии эти вещества теряют полосу поглощения 340 нм и способностью к флуоресценции не обладают. Окисленные флавопротенины обладают полосами поглощения 350 и 450 нм и флуоресцируют в области 510—540 нм. Восстановленные формы флавопротенинов не флуоресцируют. Соотношение окисленных и восстановленных

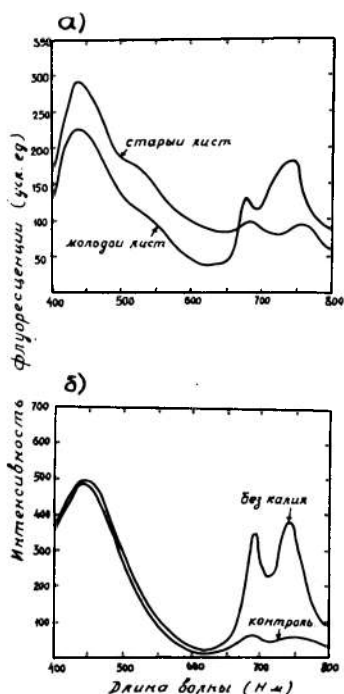


Рис. 28. Зависимость спектров флуоресценции лимонных деревьев от изменения режима полива (а) и спектров бобовых растений (б) от воздействия гербицидов [54].

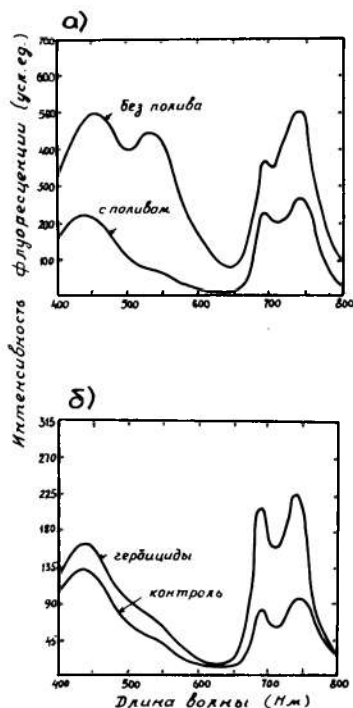


Рис. 29. Спектры флуоресценции зеленых листьев растений в зависимости от их физиологического состояния: а — возрастные изменения [54]; б — недостаточность элементов минерального питания [57].

форм указанных веществ тесно связано с функциональной активностью клеток растений, которая находит свое отражение в изменении флуоресценции клеток в сине-зеленой области спектра. Изменение внешних условий роста влияет на физиологию растений, что сказывается на изменении флуоресценции в сине-зеленой области (рис. 28). В спектрах люминесценции стареющих растений появляется полоса излучения в желтой области спектра 560—570 нм, ответственными за которую являются каротинсодержащие вещества, накапливающиеся в стареющих клетках как растений, так и животных (рис. 29а).

Основной объем работ по флуоресценции растений посвящен исследованию флуоресценции в красной области спектра с характерными максимумами в интервалах 670—690 и 720—740 нм. Ответственными за красную флуоресценцию клеток растений являются основные пигменты фотосинтеза — хлорофиллы. Флуоресценция растений в этой области спектра связана с эффективностью фотосинтетического процесса и определяется механизмами переноса световой энергии в пигментных системах [6, 56]. Световая энергия поглощается специальными антенными комплексами, состоящими из молекул хлорофилла и по резонансному механизму, как одному из основных, передается по цепи молекул различных форм хлорофилла к реакционному центру, в котором происходят основные реакции фотосинтеза [57]. Изменение физических параметров внешней среды может сказаться на эффективности миграции световой энергии между молекулами различных форм хлорофилла. Если эффективность миграции световой энергии по цепям фотосинтетического аппарата высока, то диссипация энергии в виде флуоресценции мала. Если эффективность фотосинтеза в результате внешних воздействий падает, то это влечет за собой рост диссипации энергии в виде флуоресцентного излучения. При этом следует отметить, что изменения флуоресценции могут наблюдаться при неизменной концентрации хлорофилла и других пигментов. Изменение эффективности миграции световой энергии по пигментным цепям — одна из главных причин изменения флуоресцентных характеристик растений.

2.2. Дистанционные исследования флуоресценции растительности суши.

Дистанционные исследования флуоресценции наземной растительности имеют почти двадцатилетнюю историю. Все проводимые дистанционные исследования наземной растительности, как в наземных условиях [54, 50], так и с использованием летательных аппаратов [7, 8, 58] были направлены в основном на решение трех типов задач:

1. Раннее прогнозирование стрессовых состояний растительности.

2. Определение биомассы и фазы развития растений.

3. Идентификация типов растительного покрова.

Рассмотрим подробно каждое из перечисленных направлений исследований.

2.2.1. Раннее прогнозирование стрессовых состояний растений.

Диагностика недостаточности элементов минерального питания. Дистанционные наземные исследования спектров люминесценции основных зерновых культур, произрастающих в усло-

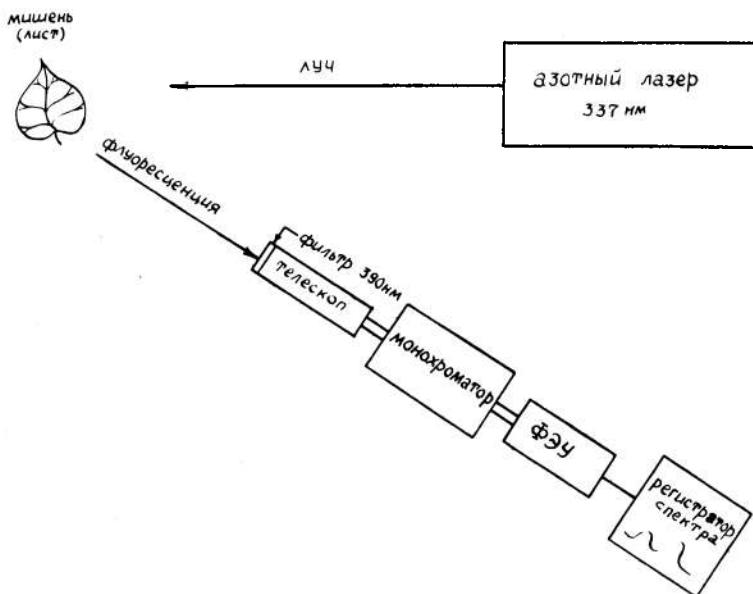


Рис. 30. Функциональная схема лабораторных измерений спектров флуоресценции живых растений.

виях недостаточности различных питательных элементов были проведены по заказу NASA министерством сельского хозяйства США [58]. Схема эксперимента представлена на рис. 30. В ходе экспериментов проводилось возбуждение флуоресценции листьев растений в видимом диапазоне с помощью лазера, работающего в ультрафиолетовом (337 нм) диапазоне спектра. Показано, что спектр люминесценции зерновых имеет три характерных максимума: 440, 690 и 740 нм. Основные результаты, полученные на кукурузе, сводятся к следующему:

1) Недостаток калия увеличивает более чем втрое интенсивность флуоресценции на длинах 690 и 740 нм по сравнению с небольшим ее ослаблением на 440 нм (рис. 29б).

2) Недостаток кальция, серы, магния не приводит к существенным изменениям в спектре флуоресценции.

3) Дефицит азота и железа ведет к слабому уменьшению интенсивности флуоресценции на 440 нм и существенному ее ослаблению (более чем в три раза) на длинах 690 и 740 нм.

4) Недостаток фосфора ослабляет интенсивность флуоресценции на длинах 690 и 740 нм в два раза, по сравнению с незначительным уменьшением на длине волны 440 нм.

Отмечено, что в экспериментах с использованием летательных средств целесообразно проведение измерений отношения интенсивности флуоресценции на двух длинах волн, например, 690 и 440 нм, что делает результаты измерений независимыми от эффек-

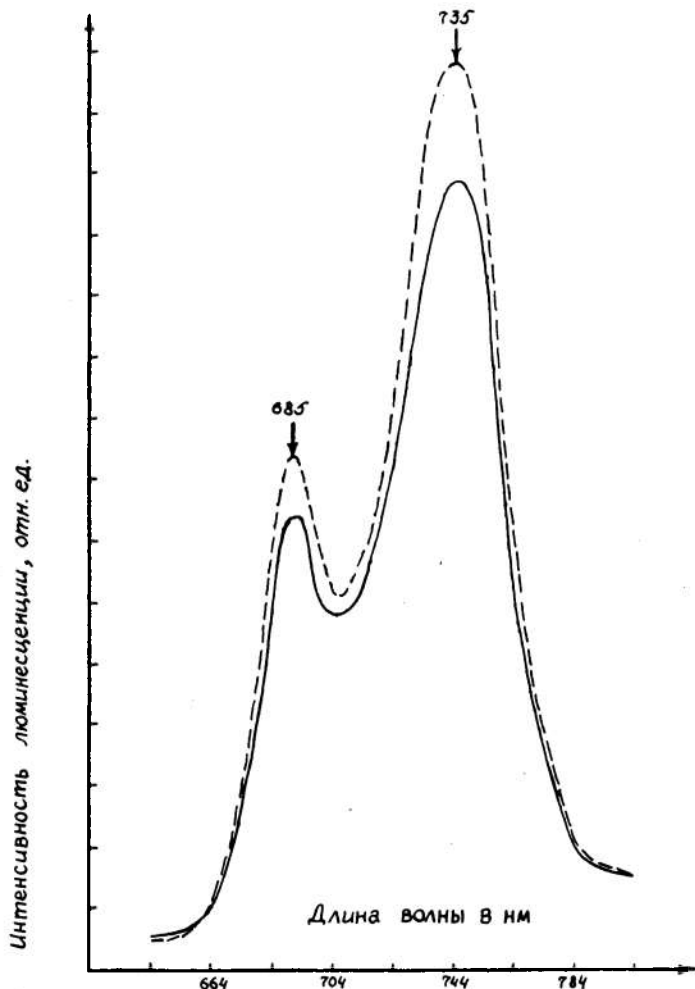


Рис. 31. Спектры люминесценции листьев свеклы:
 — — — питательная смесь с нормой азота;
 ————— питательная смесь с недостатком азота (1/10 от нормы).

тов, связанных с колебанием мощности лазера, вариациями геометрической структуры растительности, изменением ее проективного покрытия. Результаты исследований говорят о слабой корреляции изменений интенсивности люминесценции с изменением концентрации хлорофилла, что свидетельствует о влиянии недостатка элементов питания, прежде всего, на эффективность миграции световой энергии в биохимических цепях.

С начала 80-х годов в нашей стране проводятся дистанционные флуоресцентные исследования растительности в интересах сельского хозяйства. В 1983 г. на территории Молдавской ССР лабораторией дистанционных исследований Института ботаники АН УССР были проведены измерения интенсивности флуоресцен-

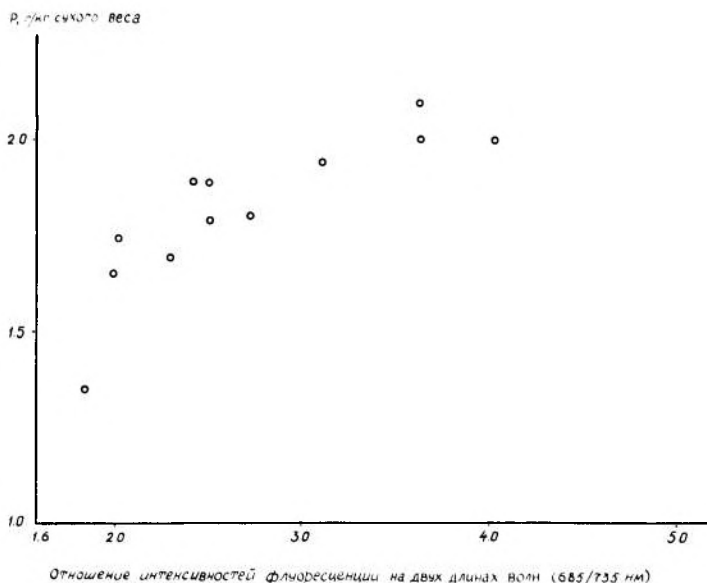


Рис. 32. Зависимость флуоресцентных характеристик озимой пшеницы от содержания фосфора в ее листьях.

ции посевов райграса и озимой пшеницы, выращенных на почвах с разными дозами внесения удобрений. Флуоресценция возбуждалась лазером, установленным на борту вертолета «Ка-26» [52], работающим на длине волны 442 нм.

Дистанционные наземные и лабораторные измерения флуоресценции листьев сахарной свеклы, выращенной в вегетационном опыте при разных дозах азотных удобрений, были проведены в 1982 г. Институтом ботаники и Институтом физиологии растений АН УССР [8]. На рис. 31 даны спектры флуоресценции листьев свеклы, выращенной с недостатком и нормой азота. На рис. 32 представлены результаты измерений с борта вертолета отношения интенсивности флуоресценции посевов озимой пшеницы для двух длин волн — 685 и 735 нм в зависимости от содержания фосфора в листьях растений. В таблице 1 приведены результаты флуоресцентных дистанционных измерений, полученных для райграса в разных фазах развития [52].

Анализ полученных данных свидетельствует о существенной зависимости отношения интенсивности флуоресценции на выбранных длинах волн от степени усвоения минеральных удобрений.

Для получения экспресс-информации на качественном уровне в полевых наземных лабораториях о степени усваиваемости растениями минеральных удобрений достаточно эффективным может быть применение электронно-оптических преобразователей (ЭОП), позволяющих получить флуоресцентные фотонизображения

Таблица 1.

Изменение интенсивности люминесценции листьев райграса в зависимости от степени усвоения удобрений.

(Числитель — отношение интенсивностей люминесценции листьев райграса на двух длинах волн I_{685}/I_{735} нм, знаменатель — содержание N, P, K в листьях (% от сухого веса)

Фаза развития	Участок		
	№ 1	№ 2	№ 3
Кущение	0,31	0,45	2,33
	2,02; 0,22; 3,00	3,03; 0,26; 3,42	3,06; 0,29; 3,61
Начало цветения	0,13	0,22	0,31
	1,37; 0,19; 2,03	2,13; 0,19; 3,04	1,42; 0,20; 3,24
Полное цветение	—	0,08	0,18
	1,04; 0,15; 2,23	1,91; 0,16; 2,72	2,37; 0,25; 3,00

отдельных растений, облучаемых лазером. Результаты таких исследований [8] показывают наличие заметных различий в фототоне флуоресцентного изображения листьев кукурузы, выращенной на почвах с разной дозой фосфорных удобрений. Листья кукурузы облучались синим (442 нм) лазером, а флуоресцентное изображение листьев фиксировалось с помощью ЭОП через интерференционный фильтр с максимумом пропусканий 685 нм и полушириной 10 нм (рис. 33). Проведенные дистанционные эксперименты закладывают основу для дистанционной диагностики степени усваиваемости растениями удобрений с целью оптимизации их режима подкормки.

Водный стресс растений. Значительное внимание в дистанционных флуоресцентных исследованиях уделено диагностике водного стресса растений. В 1980 г. в США были проведены дистанционные исследования люминесценции деревьев лимона, произрастающих на почвах с разными режимами полива [50]. Деревья были разбиты на две группы: одна группа деревьев не испытывала дефицита почвенной влаги, а полив другой группы был прекращен за три недели до измерений флуоресценции. Интенсивность флуоресценции измерялась на 3-х длинах волн: 486, 589 и 656 нм с помощью дискриминатора фраунгоферовых линий (ДФЛ), установленного на подвижной платформе на высоте 12 м над уровнем Земли. Параллельно с дистанционными флуоресцентными измерениями, водный стресс растений диагностировался с помощью наземных измерений водного потенциала и устьичного сопротивления листьев лимонных деревьев (рис. 28а).

Проведенные исследования показали достоверные различия в интенсивности флуоресценции на 3-х выбранных длинах волн для двух групп деревьев. Следует также отметить, что во время проведения эксперимента визуальные признаки стресса растений отсутствовали. Проведенные исследования демонстрируют эффектив-

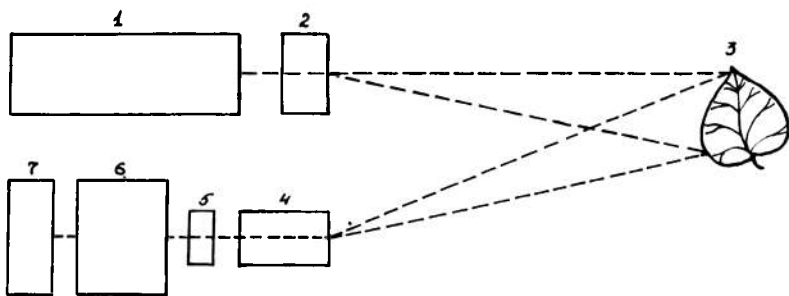


Рис. 33. Схема эксперимента по получению флуоресцентных фотоизображений живых растений в полевой лаборатории. 1 — лазер ЛПМ-11 (441 нм); 2 — расфокусирующая линза; 3 — растение; 4 — объектив; 5 — интерференционный фильтр (685 ± 5 нм); 6 — двухмодульный электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с волоконными шайбами на входе и выходе; 7 — фоторегистратор.

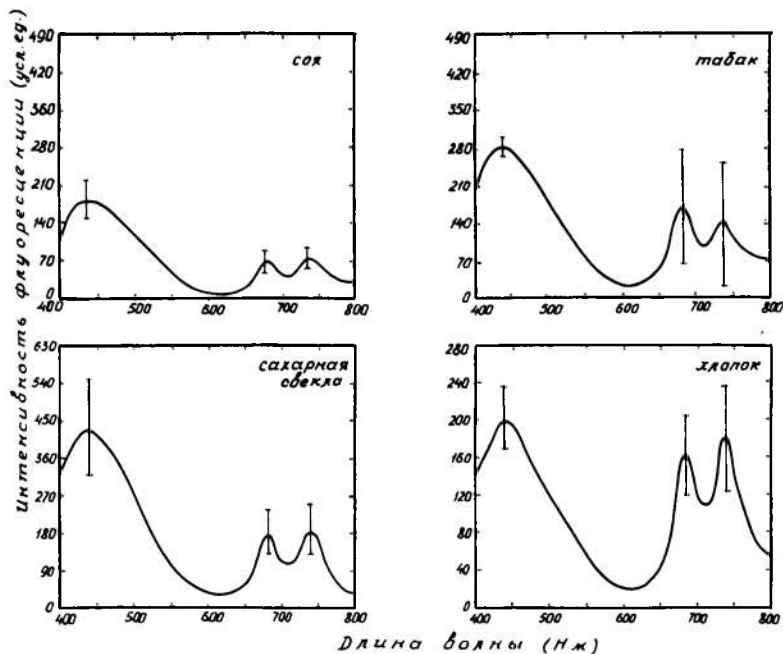


Рис. 34. Спектры флуоресценции травянистых двудольных растений [58].

ность дистанционных люминесцентных методов для идентификации стрессового состояния растений с целью оптимизации режима полива.

Диагностика действия гербицидов. Представляют большой интерес данные по спектрам флуоресценции бобовых растений, подвергшихся действию гербицидов [54]. На рис. 286 показано существенное увеличение интенсивности флуоресценции в красной области спектра у растений бобовых, простоявших 6 часов в растворе гербицидов, по сравнению с растениями, стоявшими в чистой воде. Этот эффект связан с тем, что гербициды блокируют определенные участки цепи фотосинтеза, что нарушает эффективность миграции световой энергии в пигментных системах растений и приводит к увеличению диссипации энергии в виде флуоресценции.

Идентификация типов растительности. Если генетические различия растений включают в себя различия в тех факторах, которые лимитируют эффективность фотосинтеза и различия в концентрациях пигментов растений, то тогда можно ожидать дифференциацию видов растений по их люминесцентным характеристикам. С середины 70-х годов в США начали проводиться исследования, направленные на выяснение возможности дистанционного распознавания типов и видов растительности по их спектральным флуоресцентным характеристикам [59].

Эти исследования могут расширить уже имеющийся арсенал дистанционных методов распознавания типов РП с помощью пассивных спектрометров, работающих в видимом и ИК диапазонах спектра.

В 1984 г. Министерством сельского хозяйства США совместно с NASA был проведен комплекс исследований, направленных на каталогизацию спектров флуоресценции основных типов травянистой, древесной и водной растительности, представляющей коммерческий интерес [59]. Для исследований было выбрано пять типов растений: травянистые однодольные (кукуруза, пшеница, ячмень), травянистые двудольные (соя, хлопок, свекла, табак), древесные хвойные (сосна, ель, кедр), древесные лиственные (дуб, орешник, клен) и водоросли. Свежесрезанные листья выбранных растений облучались азотным (337 нм) лазером с расстояния 1 м. Люминесцентное излучение фиксировалось с помощью телескопа на входной щели монохроматора. Спектр люминесцентного излучения измерялся в пределах от 400 до 800 нм (рис. 34).

Измерения показали наличие 4-х характерных максимумов в спектрах люминесценции исследуемых растений: 440, 525, 685, 740 нм, хотя не все они обязательно присутствуют у всех растений (рис. 34—37). Разброс получаемых данных обусловлен видовым разнообразием каждой из представленных групп растений. Все без исключения растения демонстрируют флуоресценцию на длине волны 440 нм. Только древесные растения имеют характерный максимум на 525 нм. Хвойные отличаются отсутствием максимума на 685 нм. Все исследуемые растения имеют максимум на 740 нм. Присутствие или отсутствие максимума на 525 нм отличает древес-

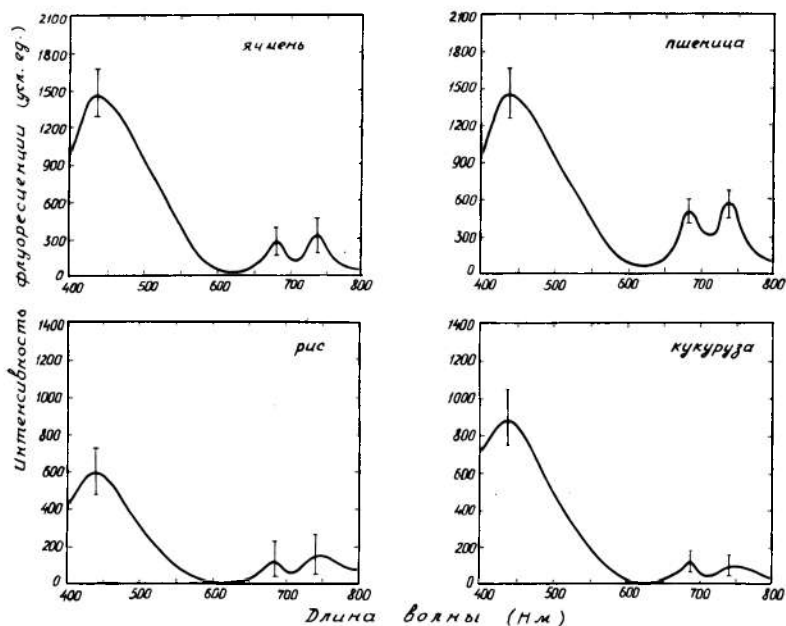


Рис. 35. Спектры флуоресценции травянистых однодольных растений [58].

ные растения от травянистых и от водорослей. Присутствие максимума на 685 нм отличает листовые деревья от хвойных. Водоросли имеют ярко выраженный максимум на длине волны 685 нм и слабо выраженные на 440 и 740 нм. Величина синего (440 нм) максимума травянистых однодольных значительно больше, чем у двудольных. Величина, равная отношению квадрата интенсивности излучения на 440 нм к интенсивности люминесценции на 685 нм существенно отличается у двудольных и однодольных травянистых растений.

Анализ приведенных спектров показывает принципиальную возможность идентификации выбранных пяти типов растений по их спектрам флуоресценции. Дальнейшие исследования должны проводиться в направлении изучения вариативности спектральных флуоресцентных характеристик растений в зависимости от экологических условий роста, различия в возрасте, виде и т. п.

Измерение биомассы наземной растительности. В 1983 г. была проведена серия вертолетных флуоресцентных измерений суммарной концентрации хлорофиллов «а» и «b» в листьях озимой пшеницы, густоты посевов и их биомассы [52]. Для того, чтобы сделать результаты дистанционного зондирования независимыми от геометрии эксперимента, измерялось отношение интенсивности флуоресценции хлорофилла посевов на двух главных максимумах: 685 и 735 нм. Это отношение являлось флуоресцентным параметром.

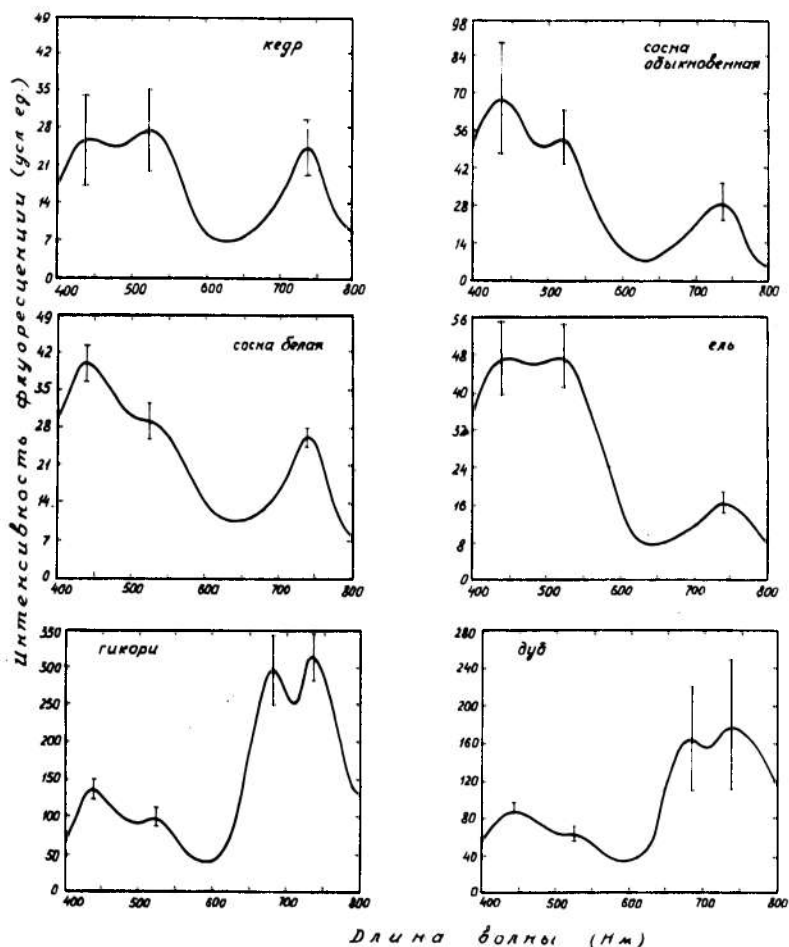


Рис. 36. Спектры флуоресценции древесной растительности [58].

ром в экспериментах с наземными растениями и обозначено в дальнейших описаниях буквой К.

Для измерения флуоресцентного параметра посевов пшеницы использовался лазер с длиной волны генерации 441,6 нм. Полеты проводились в раннеутренние часы на вертолете Ка-26 на высоте 30 м

На рис. 38 представлена зависимость параметра К от концентрации хлорофиллов «а» и «b» в листьях озимой пшеницы, выращиваемой на 16 опытных участках. Параллельно с дистанционными измерениями проводились лабораторные измерения концентрации хлорофиллов в листьях по методу Годнева. Для выяснения зависимости флуоресцентного параметра озимой пшеницы от густоты

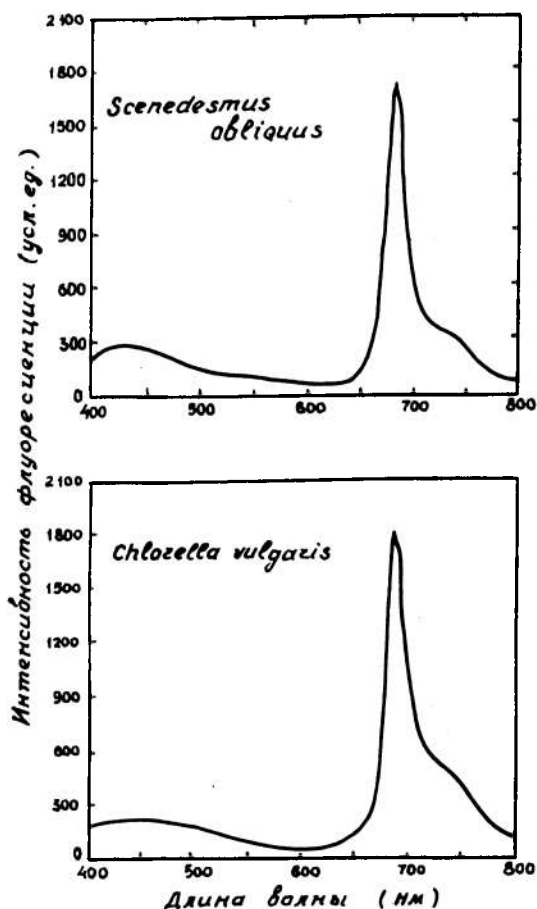


Рис. 37. Спектры флуоресценции водорослей [58].

и биомассы посева были проведены дистанционные измерения на пробных профилях, вдоль которых имеются существенные изменения биомассы и густоты посева. На рис. 39 представлены результаты этих измерений.

В методическом плане следует отдать предпочтение раннеутренним часам для дистанционной люминесцентной съемки, по сравнению с поздневечерними, с целью получения максимальных значений люминесцентного сигнала. Аналогичные выводы делают в своей работе и американские ученые.

При проведении подобных исследований целесообразно выби-

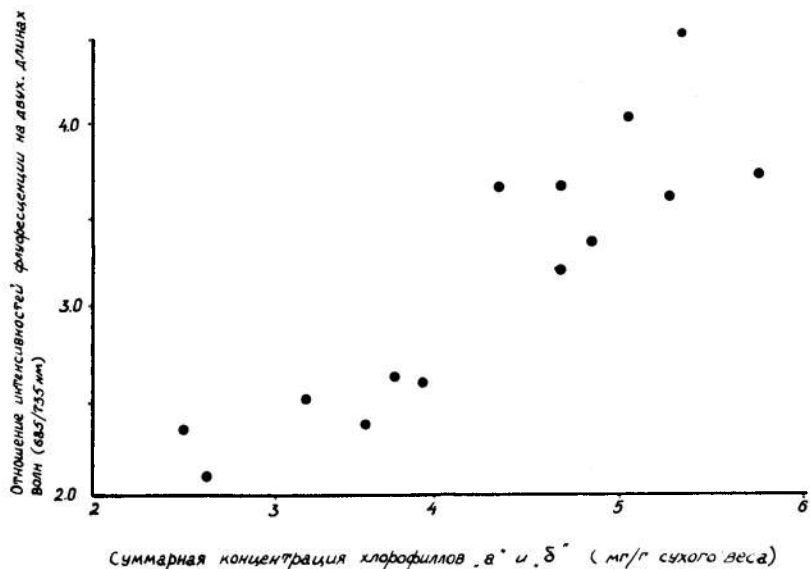


Рис. 38. Зависимость флуоресцентных характеристик озимой пшеницы от концентрации хлорофилла в ее листьях.

рать оптимальную длину волны возбуждения флуоресценции разных типов РП. На рис. 40 представлены результаты работ американских ученых по эффективности возбуждения разных типов растительности разными лазерами [7].

Дальнейшие исследования по оценке биомассы с/х посевов необходимо продолжить с учетом влияния различных экологических факторов на люминесцентные характеристики посевов: дозы вносимых удобрений, влажность почвы, повреждение растений гербицидами и вредителями и т. п.

Приведенные результаты дистанционных люминесцентных исследований растительности суши показывают эффективность использования бортовых лидаров для решения задач сельского, лесного хозяйства, охраны окружающей среды. Вместе с тем, первоначально эти методы получили наибольшее развитие в исследованиях продуктивности водных экосистем. Поэтому вопрос дистанционных люминесцентных исследований морей и океанов заслуживает особого внимания.

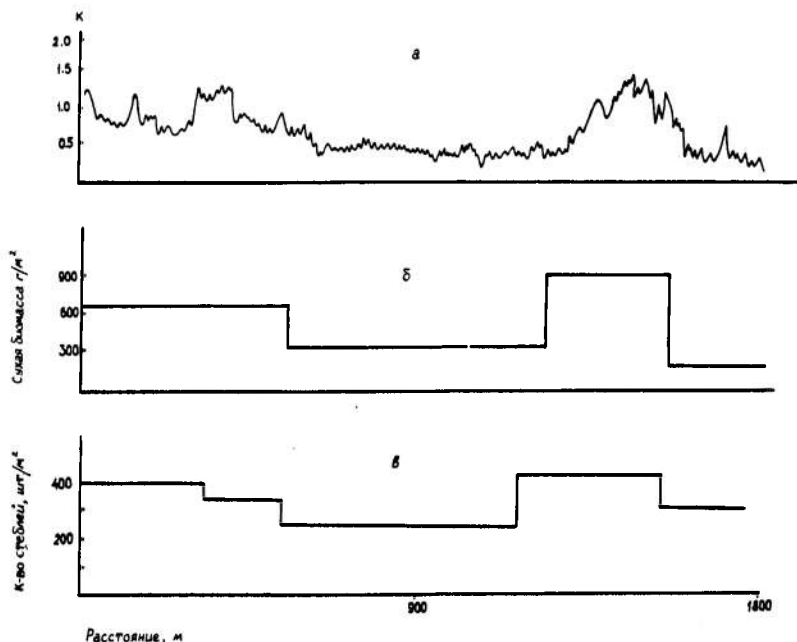


Рис. 39. Изменение флуоресцентных характеристик посева пшеницы в зависимости от густоты и биомассы посева: а — изменение отношения интенсивностей флуоресценции на двух длинах волн — 684 и 735 нм (K); б — изменение биомассы; в — изменение густоты.

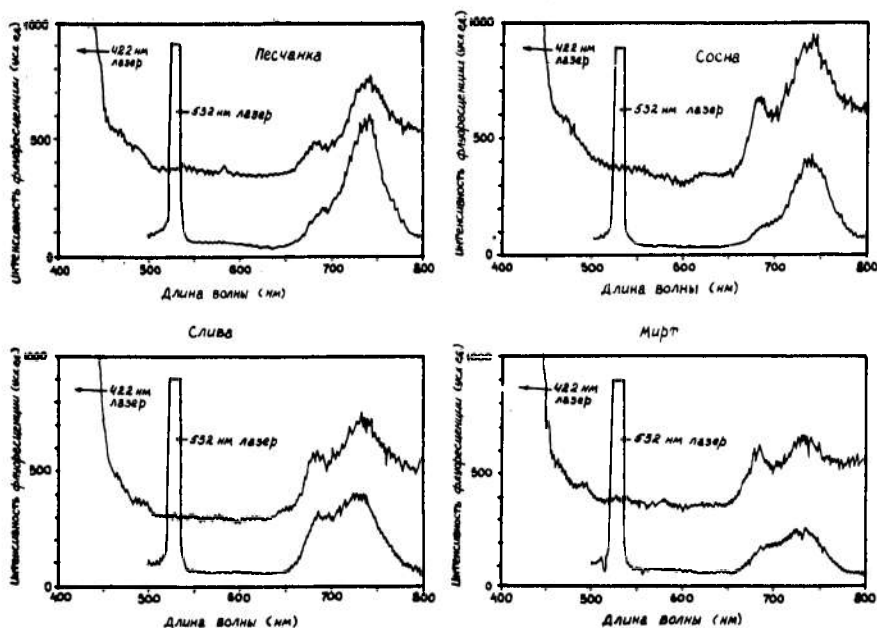


Рис. 40. Спектры флуоресценции разных типов растений при возбуждении лазерами на разных длинах волн [59].

Глава 3.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОЕМАХ

В океано- и лимнологической практике исследование процессов эвтрофирования природных вод в значительной мере опирается на изучение тенденций изменения численности и видового состава фитопланктона (ФП) как основного индикатора биологической продуктивности водоемов [61].

Пристальное внимание к ФП объясняется присущей ему способностью многообразно и глубоко влиять на экологический режим среды обитания, а в конечном счете и на глобальную экологию [61]. Являясь основным источником питания зоопланктона, ФП представляет собой важнейшее звено в трофической цепи водоемов. Большое содержание жиров, углеводов, белков, а в некоторых случаях и витаминов, делают ФП весьма перспективным с точки зрения возможности его переработки в пищу человека. ФП оказывает значительное влияние на регуляцию химических и оптических свойств среды обитания. Благодаря своей способности фиксировать азот, ФП обогащает водную среду соединениями этого элемента; он обогащает атмосферу и Мировой океан продуктом фотосинтеза — кислородом. Некоторые типы ФП могут поглощать как растворенные органические вещества (увеличивая тем самым прозрачность вод), так и вредные радиоизотопы — продукты радиоактивного распада. Существуют популяции ФП, способствующие самоочищению водоемов и биофильтров на очистных сооружениях. Поскольку каждая группа ФП характеризуется присущим ей набором физико-химических и гидрологических условий в среде обитания и поэтому имеет свою область распространения, ФП может служить биоиндикатором течений, апвеллингов, даунвеллингов, его можно использовать и в качестве биоиндикатора для районирования морей, для оценки дрейфа льдов и ледового режима. Благодаря флуоресценции и звукорассеивающим свойствам слоев популяций водорослей ФП, индикация последнего широко используется в гидролокации и эхолотировании, в том числе и при поисках высокопродуктивных районов Мирового океана.

С ФП нередко связаны и определенные негативные явления: в соответствующих условиях (особенно в периоды так называемых

«цветений воды») значительно снижается прозрачность воды, отмечается гибель рыб (вследствие обволакивания икры рыб и забивания жабер моллюсков), нарушается работа очистных сооружений и предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. В результате выделения ФП специфических ароматических веществ, вода в водоеме может приобретать самые разнообразные привкусы и запахи (болотный, рыбный, мышиный, лекарственный и др.) и таким образом становится практически непригодной для питья. ФП может быть причиной заморов рыб в результате снижения концентрации растворенного кислорода в воде (при разложении ФП) и выделения таких веществ как H_2S , NH_3 , H_2CO_3 и др., а также токсинов (в процессе метаболизма или распада ФП). Существуют также ядовитые виды ФП. Во время так называемых «бурокофейных» и «красных приливов» отмечается массовое отравление рыб. Использование такой рыбы в пищу домашних животных и скота вызывает их гибель.

Разумеется этим не исчерпываются все последствия присутствия ФП в водных бассейнах. В действительности они значительно многообразнее и обнаруживают многочисленные глубинные обратные связи, превращая этот, казалось бы частный вопрос, в одну из актуальнейших проблем современной экологии.

В качестве общепринятой и отработанной методической основы изучения ФП вплоть до настоящего времени выступают измерения *in situ*. Между тем результаты теоретических разработок и статистически достоверные экспериментальные данные (см., например, [62, 63, 64]) свидетельствуют о весьма значительных пространственно-временных вариациях распределения ФП (имеется в виду распределения численной и весовой концентрации, а также флористической принадлежности ФП). Так в озерах характерные масштабы изменчивости распределений ФП варьируют (для размерностей см и мин) от 1 до 10^6 [64]. Отсюда следует, что контактные, точечные измерения *in situ* с судов, помимо прочих, присущих им недостатков, часто могут оказываться нерепрезентативными [65].

Указанное обстоятельство естественным образом объясняет все возрастающее внимание к разработке и внедрению дистанционных методов индикации, обладающих преимуществами оперативности и естественного пространственного осреднения.

Обычно в работах, посвященных дистанционной индикации ФП, почти не обсуждаются вопросы, касающиеся ФП как такового, со всеми особенностями его микрофизических и оптических свойств, полей распределения ФП и их пространственно-временных вариаций и т. п. Между тем представляется, что четкое понимание природы и свойств ФП должно способствовать более адекватному подходу к проблеме в целом. Поэтому мы сочли уместным предварить обсуждение вопросов собственно дистанционного зондирования ФП рассмотрением такого рода информации. Этому посвящен первый параграф главы 3.

3.1. Некоторые характеристики ФП

Обратимся к вопросу о полях концентрации ФП. Вся сумма экспериментальных данных, накопленных к настоящему времени, свидетельствует о значительной пространственно-временной изменчивости поля концентрации ФП. Схема на рис. 41 иллюстрирует характерные масштабы временной и пространственной изменчивости поля концентрации ФП для озер. При определенном расширении верхних границ этих масштабов [63], ее можно считать репрезентативной и для морских акваторий. Среди факторов, определяющих широкий спектр изменчивости полей распределения ФП можно выделить: механические (куда входят вариации вертикального профиля плотности воды, удельный вес популяции ФП, вертикальные и горизонтальные циркуляции в акватории, ветровое перемешивание, турбулизованность среды, притоки и стоки в проточных водоемах, конвекция вод, приливно-отливные волны, сейши) и биотические, которые в свою очередь подразделяются на: а) физические (вариации температуры, притока солнечной радиации, трансформации водных масс), б) химические (вариации концентраций растворенных в воде газов, минеральных солей и органических веществ) и в) биологические и биоценотические (потребности в размножении, питании, выедании, конкуренция, гибель, паразитизм и др.). Эта сумма факторов, которая в действительности еще шире, приводит, как отмечалось, к весьма широким границам характерных масштабов изменчивости поля концентрации ФП. Особый интерес представляют «коротковолновые» границы временных и пространственных спектров: в общем случае концентрация ФП может меняться в течение нескольких часов и даже нескольких минут в объеме от нескольких м³ до нескольких см³.

Остановимся несколько подробнее на зональных, временных флористических вариациях поля $S_{фп}$. На рис. 42 [61] представлен в весьма обобщенном виде сезонный ход развития продукции ФП в Мировом океане на разных широтах. На характер этого хода на всех широтах оказывает влияние соответствующий сезонный и широтный ход прихода солнечной радиации, а в высоких широтах на этот фактор накладывается периодичность покрытия льдом и освобождения от него акватории. Благодаря зональному распределению тепла на планете и в силу особенностей характера циркуляций вод Мирового океана в географическом распределении продукции ФП обнаруживается глобальная закономерность: циркумконтинентальный характер локализации ФП [66]. Он проявляется в значительном (в десятки раз) возрастании продукции ФП в прибрежных и неритовых областях по сравнению с океанскими водами (для сравнения интересно отметить, что при переходе от высокоширотных вод к тропическим продукция ФП уменьшается всего в несколько раз). Весьма благоприятными для развития ФП являются районы действия муссонных ветров (например, в Аравийском, Бенгальском заливах, в Индонезийских морях), а также

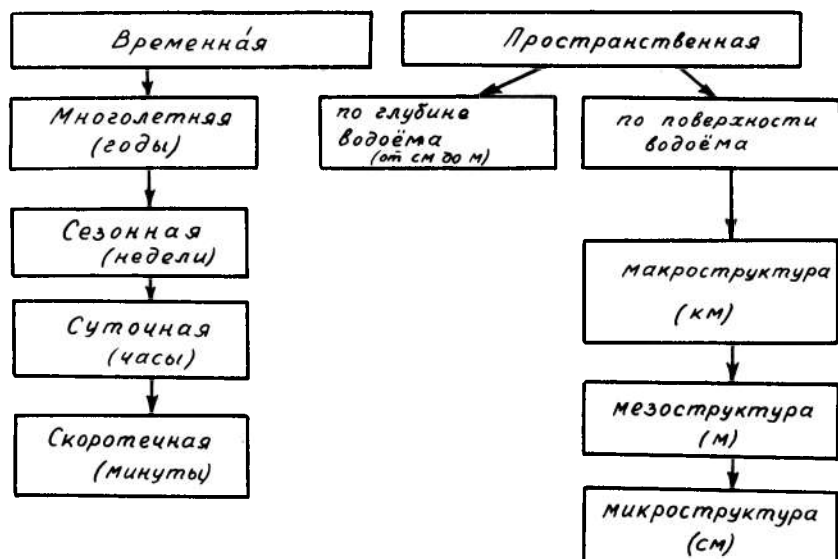


Рис. 41. Схема временной и пространственной изменчивости поля концентрации ФП для озер (в скобках указаны характерные масштабы изменчивости).

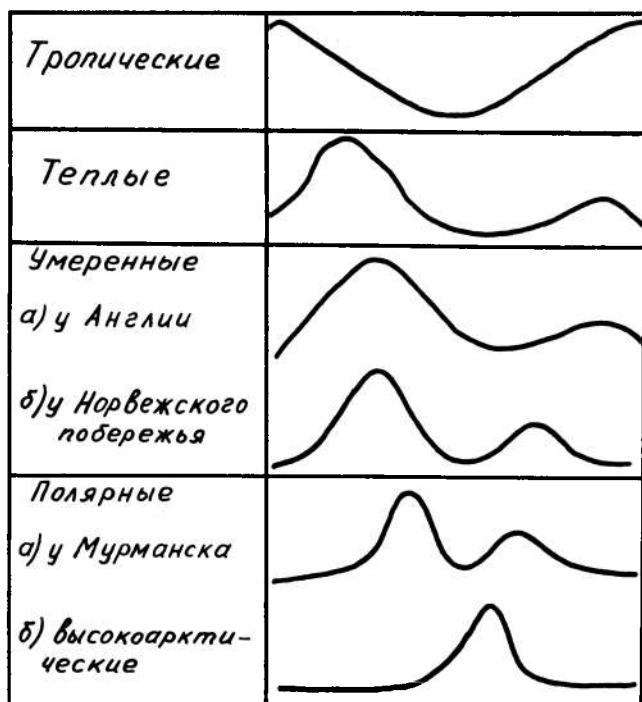


Рис. 42. Сезонный ход развития ФП в океане на разных широтах у различных вод в течение года (с первого по двенадцатый месяцы).

в области дивергенции течений (у берегов Камчатки, Японии, Канады, Гренландии, Бразилии). Особенно крупные массы ФП в расчете на единицу площади продуцируются в областях восточных пограничных течений: у западных берегов Южной и Центральной Америки и Юго-Западной Африки. Широтная зональность распределения продуктивности ФП проявляется в существовании трех зон максимумов: двух в умеренных гумидных и одной экваториальной, разделенных в обоих полушариях тропическими областями общего даунвеллинга вод и низкой биопродуктивности. Наиболее низкие величины продукции ФП отмечаются, с одной стороны, для высокоарктической ледовой, а с другой — для тропических аридных областей, в силу короткого срока вегетации ФП, недостатка света (приполярные районы) устойчивой стратификации вод и крайней бедности биогенными элементами (тропические районы).

В глобальном флористическом распределении ФП ведущая роль принадлежит диатомовым водорослям [66]. Существенное значение имеют также перидинеи и кокколитины, а в отдельных прибрежных районах океана и в экваториально-тропической зоне — синезеленые водоросли. В Тихом и Атлантическом океанах диатомовые резко преобладают в субарктических и антарктических областях, а также в зонах апвеллингов у западных берегов континентов. Например в районе юго-западной Африки (5—23 ю. ш.) от общей численности водорослей, диатомовые, перидинеи и синезеленые составляют 89,3; 0,6 и 9,7%, а от биомассы 91,7; 7,2 и 0,7%, соответственно. В тропическом планктоне Восточно-Китайского моря диатомовые доминируют на всех станциях, но особенно в эвтрофных, наиболее продуктивных его участках. В центральных областях Тихого, Атлантического и Индийского океанов области преобладания диатомовых чередуются с зонами, где доминируют перидинеи и кокколитины.

Разумеется, все это лишь самые общие закономерности в распределении и вариациях поля S_{ϕ} . В действительности в каждом конкретном регионе характер поля ФП определяется всей суммой конкретно реализующихся в нем физико-химических и биолого-биоценотических условий. Наиболее отчетливо это проявляется в акваториях морей (и прежде всего — внутренних), а также крупных озер. Гидродинамика здесь, как и в океанах, определяет режим биогенных элементов. Кроме того продуктивность озер и морей в большой мере зависит (помимо светового режима) от локальных циркуляций, сгоно-нагонных течений, гидрографических условий, величины речного стока, абразии берегов, водообмена со смежными акваториями. Так, в сезонной динамике ФП Балтийского моря различают четыре биологических сезона: биологическая зима (15/XII—15/III) (характеризуется весьма слабым развитием ФП), биологическая весна (15/III—15/IV) (период бурного развития ФП; доминируют диатомовые и перидинеи; максимум развития приходится на вторую половину марта), биологическое лето (15/VI—15/IX) (характеризуется сменой весеннего

комплекса холодноводных видов диатомовых на летний комплекс, среди которых доминируют синезеленые и диатомовые; массовое развитие синезеленых занимает период с июля по сентябрь с максимумом в июле августе (t° воды = 15°C), начало биологической осени — вторая половина сентября — начало октября (в этот период наблюдается ослабление развития синезеленых и вторая, хотя и менее интенсивная, вспышка диатомовых).

Эти данные интересно сравнить с сезонной динамикой озерного ФП тех же широт. В олиготрофном озере Пааярви (Финляндия) бурное развитие ФП приходится на период со второй половины мая по первую декаду октября, когда поверхность озера свободна ото льда. В видовой изменчивости эвтрофного озера Лавоярви (Финляндия) (рис. 43) [67] наблюдаются две вспышки диатомовых — 1 (конец мая и середина октября), две вспышки криптофитовых — 2 (первая половина мая и начало сентября) и одна вспышка синезеленых — 3 (конец июля). Интересно отметить, что зеленые водоросли — 4, составляя незначительную часть от общей биомассы ФП озера Лавоярви, имеют пологий максимум в период (февраль—март), когда поверхность озера покрыта льдами.

Значительно более сложной оказывается сезонная динамика ФП в Ладожском озере, где она обнаруживает существенно районированный характер [60, 68, 69]. В глубоководном северном и центральном районах озера, бедных биогенами, весенняя вспышка ФП запаздывает и происходит летом (в июле); она вызвана, в основном, диатомовыми водорослями (*Asterionella formosa*). Второе повышение численности ФП (почти до весеннего уровня) имеет место в сентябре и обусловлено диатомовыми и синезелеными (*Tabellaria fenestrata* и *Woronichinia naegeliania*). В мелководных районах озера — южном и восточном, — богатых биогенами, наблюдается вспышка продукции ФП в мае. Она вызвана *Melosira islandica* subsp. *helvetica*. Вторая вспышка развития этой же диатомовой имеет место в сентябре. В октябре—ноябре происходит спад и обеднение флористического состава ФП.

Численность ФП в Ладожском озере значительно варьирует (на горизонте 5 м от 2—40 тыс. кл/л до 500—2000 тыс. кл/л) в зависимости от района озера и биологического периода (рис. 44 [69]).

Не менее сложны и многообразны вертикальные профили концентрации ФП. В качестве иллюстрации можно привести (рис. 45) распределения по глубине восьми представителей морского планктона [61], каждый из которых обнаруживает свой, индивидуальный вертикальный профиль концентрации. Естественно, что сочетание таких профилей в каждом конкретном случае должно в сумме давать сложную кривую. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что реальные вертикальные профили ФП действительно имеют сложную тонкую структуру, которая оказывается подверженной заметной временной изменчивости [70—72].

Протяженность слоя обитания ФП, определяемая совокупностью факторов, отмеченных выше, весьма изменчива. В океанах

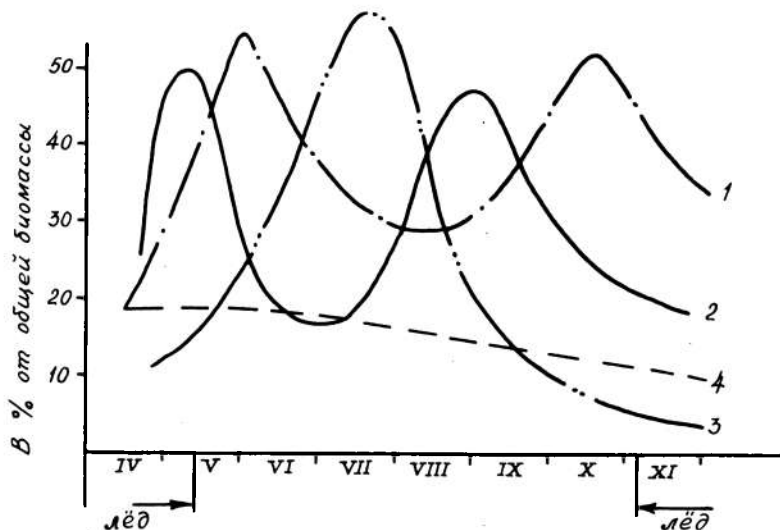


Рис. 43. Сезонная смена типов ФП в эвтрофном «коричневом» озере Ловоярви (Финляндия).

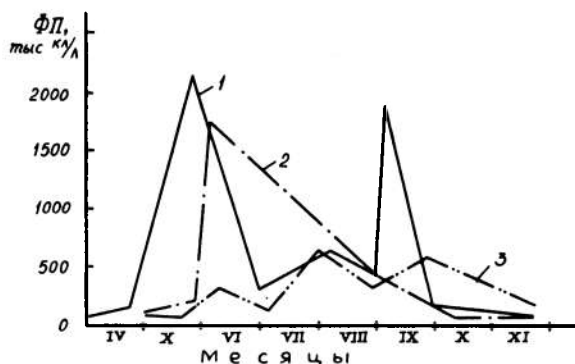


Рис. 44. Схема годичного цикла развития ФП в различных районах Ладожского озера. 1 — южный район, 2 — восточный район, 3 — центральный район.

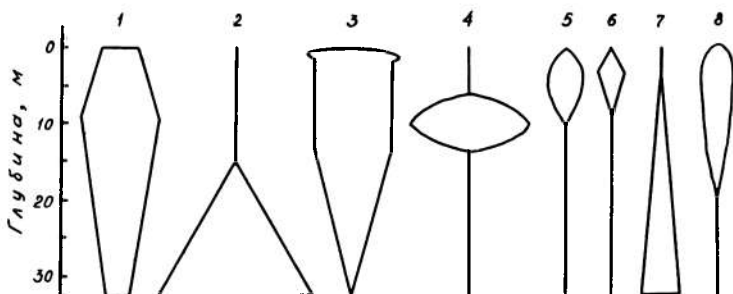


Рис. 45. Вертикальные распределения полей концентрации восьми различных представителей океанического планктона (поперечники фигур соответствуют корню кубическому из числа особей в 1 л.) 1 — *Staurastrum cingulum*; 2 — *Asterionella formosa*; 3 — *Ceratum hirundinella*; 4 — *Mallomonas alpina*; 5 — *Polyarthra major*; 6 — *Conochilus unicornis*; 7 — *Filinia longiseta*; 8 — *Daphnia*.

практически значимые $C_{\Phi\P}$ располагаются вплоть до глубины 250 м [66]; однако максимум $C_{\Phi\P}$ находятся, как правило, на глубинах до 50 м [61, 71].

В озерах и других внутренних водоемах практически значимая толща слоя обитания $\Phi\P$ находится, естественно, в зависимости от их глубины и может достигать 100—150 м [60, 61, 73, 74].

В крупных глубоководных озерах средних широт биологической зимой $\Phi\P$ опускается в глубину, чтобы с приходом весны вновь подняться к поверхности озера. Так, по данным [69] в Ладожском озере биологической зимой максимум $C_{\Phi\P}$ располагается на горизонте 40—50 м (рис. 46). В периоды биологической активности основная масса $\Phi\P$ сосредотачивается в слое до ~ 30 м с максимумом $C_{\Phi\P}$ на горизонтах 0—15 м. С наступлением биологической осени наряду с общим снижением $C_{\Phi\P}$ глубина залегания максимума $C_{\Phi\P}$ постепенно увеличивается, чтобы занять свое положение, характерное для зимнего сезона.

В небольших озерах с малой прозрачностью вод максимум $C_{\Phi\P}$ располагается в непосредственной близости от поверхности.

Следует подчеркнуть, что в общем случае осредненная по времени вертикальная протяженность слоя обитания $\Phi\P$ в океанах, морях и крупных озерах превышает соответствующую глубину залегания нижней границы фотической зоны *. В большинстве случаев объяснение этому следует искать в вертикальных движениях водных масс и особенностях гидрологической структуры вод [61, 75].

Фотосинтетическая активность клеток $\Phi\P$. В структуре клеток $\Phi\P$ (за исключением, по-видимому, синезеленых) ** имеются так называемые хлоропласты (ХП), представляющие собой автономные цитоплазматические тельца, в которых полностью реализуются все необходимые условия для осуществления фотосинтеза. В их состав входят белки (35—55%), липиды (18—37%), нуклеиновые кислоты, пигменты (8%), минеральные соединения (5—8%) и некоторые другие вещества [76]. В клетках различных представителей $\Phi\P$ величина и форма ХП сильно варьирует: встречаются ХП чашевидные (*Chlorella*), лентовидные (*Spirogyra*), напоминающие по форме тарелку (*Mougeotia*) и др. ХП имеет двойную липопротенную мембрану, отделяющую его от цитоплазмы. Внутри ХП находится бесцветная белковая строма (матрикс), в которую погружены ламеллярные системы, содержащие пигменты. Кроме

* Ниже фотической зоны, т. е. на глубинах, где уровень радиации ниже $0,18 \text{ кал/см}^2 \text{ час}$ — пороговой величины для осуществления фотосинтеза, затраты на дыхание превышают ассимиляционные возможности $\Phi\P$ и он может существовать там лишь некоторое время за счет утилизации ранее накопленной энергии, а затем гибнет (это не совсем так в отношении некоторых видов $\Phi\P$, обладающих усиленной способностью к миксотрофизму).

** У синезеленых имеются пигментосодержащие ламеллы-тилакоиды, пронизывающие всю клетку, но расположенные главным образом на периферии. У бактерий есть хромофоры, являющиеся субмикроскопическими структурами, содержащими белки, пигменты, липиды и ферменты.

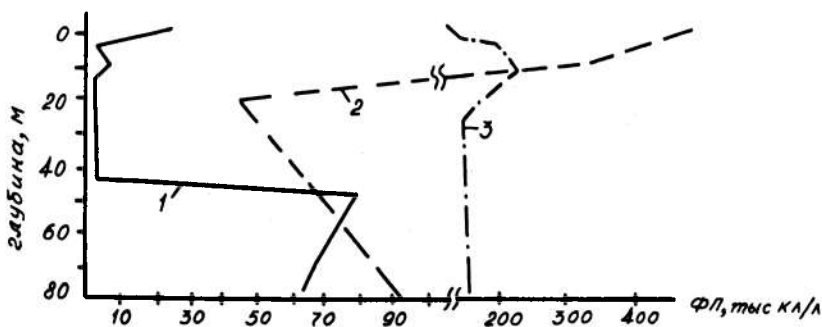
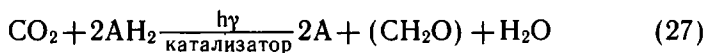


Рис. 46. Вертикальное распределение счетной концентрации ФП в периоде биологической весны в центральном районе Ладожского озера. 1 — ранняя биологическая весна; 2 — биологическая весна; 3 — поздняя биологическая весна.

ламеллярных систем в матриксе находятся другие структурные элементы — осмиофильные глобулы и рибосомы.

Для всех фотосинтезирующих организмов реакции фотосинтеза, индуцируемые световыми потоками (величина которых, как отмечалось выше, должна быть выше $0,18 \text{ кал/см}^2\text{час}$) и катализируемые пигментной системой, выражаются следующим результирующим уравнением:



где (АН_2 — носитель водорода).

В ХП световые реакции протекают в ламеллярных структурах, а темновые, связанные с фиксацией и восстановлением CO_2 — в строме. Утилизация света в ХП осуществляется пигментными системами, состоящими из соединений, поглощающих свет в видимой области солнечного спектра. Основу этих пигментных систем составляют хлорофиллы (ХлФ). Известно 5 типов ХлФ: а, b, с, d, е. ХП всех без исключения групп водорослей содержат ХлФ_а. ХлФ_б обнаружен у зеленых и эвгленовых. У некоторых бурых, диатомовых, динофлагелят, криптоноад в составе ХП имеется ХлФ_с*. У многих (но не у всех красных водорослей в небольших количествах пигментная система содержит ХлФ_д. ХлФ_е найден только у одного объекта — водоросли *Tribonema bombusium* из отдела Xanthophyta. У синезеленых обнаружен только ХлФ_а. Зеленые расте-

*Поскольку многие из водорослей, содержащие ХлФ_с, являются основными продуцентами органического вещества в морях и океанах, ХлФ_с, после ХлФ_а, является наиболее широко распространенным в природе пигментом.

ния и водоросли содержат также небольшие количества более окисленного предшественника ХлФ_a. Это так называемый протохлорофилл «а» (у которого два атома углерода порфиринового кольца ХлФ_a связаны двойной связью, а атомы водорода отсутствуют). Протохлорофилл «а» образуется в темноте и превращается в ХлФ_a при освещении.

Помимо хлорофиллов пигментная система ХП содержит каротиноиды. Они выполняют защитную функцию предотвращения окисления ХлФ_a на свету. Это — группа жирорастворимых пигментов. Она подразделяется на а) каротины и б) ксантофиллы (содержащие кислород в гидроксильных, карбонильных, метоксильных и других группах и обладающие очень высокой реакционной способностью).

Молекула каротинов состоит из центральной длинной ненасыщенной углеродной цепи и концевых групп. Различают ациклические каротиноиды (концевая группа открыта) (например, — ликопин) и циклические (концевая группа замкнута) (например, α и β — каротины). Основными каротиноидами ХП водорослей ФП являются β — каротин, лютеин, виолаксантин, неоксантин. Эти четыре пигмента составляют ~98% от общего количества каротиноидов ХП. Однако у некоторых водорослей в больших количествах обнаружен и α — каротин. В то же время у таких представителей Chlorophyta как Syphonales α — каротин является основным каротиноидом (β — каротин также присутствует в пигментной системе этой водоросли, но в малых количествах). Из группы каротинсодержащих каротиноидов — ксантофиллов (лютеин, ликопин, зеаксантин, виолаксантин, неоксантин, фукоксантин) наиболее распространенными являются лютеин (содержит гидроксил в концевой группе). Неоксантин обнаружен только у зеленых водорослей и эвгленовых, виолаксантин — у зеленых и бурых. Последние вместе с диатомовыми и золотистыми (Cryophyta) содержат из ксантофиллов в небольшом количестве фукоксантин.

Пигментные системы ХП некоторых водорослей (красных, синезеленых и некоторых других) содержат кроме ХлФ и каротиноидов особые пигменты — фикобилины: фикоцианин голубого (синего) цвета (у синезеленых — Cyanophyta) у фикозеритрин красного цвета (у красных — Rhodophyta).

В рамках нашей задачи принципиальный интерес представляют оптические свойства пигментов: их спектры поглощения и флуоресценции. Они хорошо изучены для экстрагированных пигментов [76]. Однако характерной особенностью таких спектров является их зависимость от природы растворителя (с увеличением показателя преломления растворителя максимумы поглощения растворенных пигментов смещаются в длинноволновую область). На рис. 47 представлены спектры поглощения ХлФ_a, б, в, г в эфире. Видно, что пигменты избирательно поглощают свет в коротковолновой (синей) (430—640 нм) и длинноволновой (красной) (630—690 нм) областях видимого спектра. Поглощение в синей области для всех ХлФ более интенсивно, чем в красной. Особенно мало поглощает

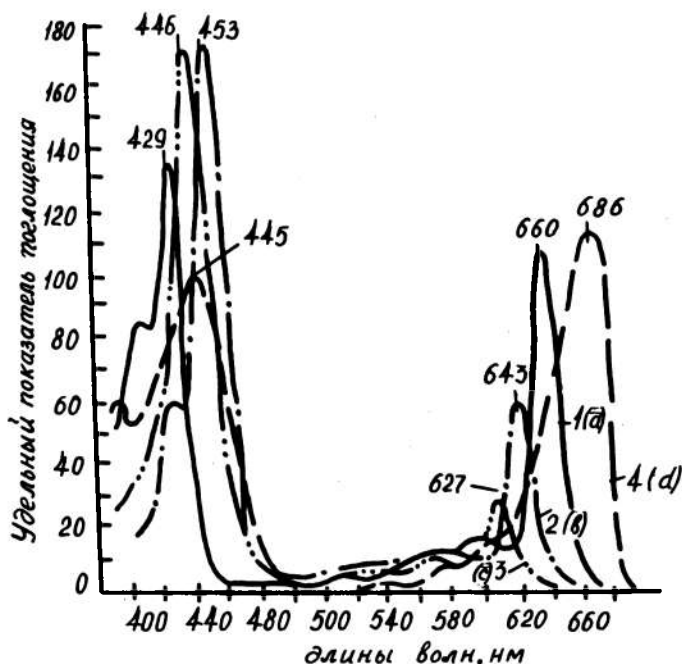


Рис. 47. Спектры поглощения хлорофиллов (1 — а; 2 — б; 3 — с; 4 — d), растворенных в эфире.

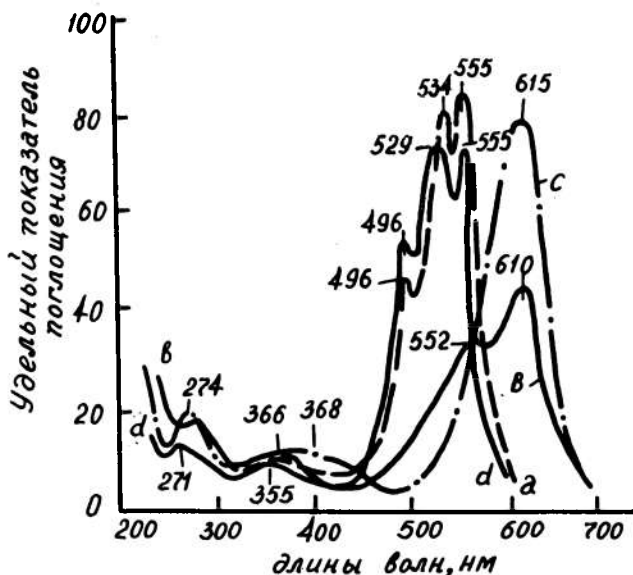


Рис. 48. Спектры поглощения фикоэритрина (а), (d) и фикоцианина (б), (с) красных водорослей *Ceratium rubrum* и синезеленых водорослей *Arhanizomenon*, соответственно.

в красной области спектра ХлФ_c. Относительно ХлФ_e известно, что в растворе метанола максимумы поглощения расположены при 415 и 654 нм, а минимумы — при 510—650 нм. Максимумы флуоресценции хлорофиллов а, b, c, d, растворенных в эфире, находятся соответственно при 669; 648; 631; 693; 790 нм. Спектроскопическими методами показано, что в живых клетках ХлФ_a может существовать в нескольких формах. Известны ХлФ_{a(670)}, ХлФ_{a(683)}, ХлФ_{a(695)} (цифровой индекс означает длину волны в нм максимума поглощения в красной области). Следует подчеркнуть, что разнообразие указанных форм ХлФ_a наблюдается у растений только *in vivo*. При растворении в органических растворителях все формы ХлФ_a переходят в одну с максимумом поглощения при 660—670 нм. Следовательно, все эти формы — суть один и тот же ХлФ_a, но в разных состояниях.

Сдвиг максимума поглощения *in vivo* по сравнению с его положением в спектре растворенных пигментов обнаружен и для других ХлФ. Длинноволновый максимум поглощения ХлФ_b *in vivo* лежит у 650 нм, ХлФ_c — у 645 нм, ХлФ_d — у 740 нм. Полагают, что эти сдвиги обусловлены взаимодействием односортовых пигментов друг с другом.

Обратимся теперь к спектрам поглощения второго типа пигментов, обязательно присутствующих в ХП клеток ФП — каротиноидов. В таблице 2 приведены положения максимумов полос поглощения каротиноидов, растворенных в этаноле.

Т а б л и ц а 2

Положение полос поглощения каротиноидов, растворенных в этаноле.

Каротиноид	Длина волны (нм) максимума поглощения
α-каротин	446, 476
β-каротин	452, 482
лютеин	420, 446, 476
зеаксантин	423, 452, 483
виолаксантин	418, 443, 472
фукоксантин	449, 477
неоксантин	437, 467

Как видно из таблицы 2, эта группа пигментов поглощает исключительно в фиолетовой и синей областях спектра.

Как отмечалось выше, у красных и синезеленых водорослей присутствуют особые пигменты — фикобилины. На рис. 48 представлены спектры поглощения этих пигментов. Следует подчеркнуть, что отличительной чертой этих спектров является наличие сильного поглощения в области ми-

нимального поглощения хлорофиллами и каротиноидами.

Данные о спектральных поглощательных свойствах пигментов позволяют понять роль каждого из них в сложном процессе фотосинтеза. ХлФ_a принимает непосредственное фотохимическое участие в этом процессе, являясь одним из звеньев в цепи окислительно-восстановительных реакций, приводящих к отнятию водорода от воды и присоединению его к СО₂. Роль дополнительных пигментов в процессе фотосинтеза заключается в передаче поглощенной

ими энергии к молекулам ХлФ. Действительно, многие виды ФП живут в условиях сильно измененного спектрального состава солнечного света. Широко известно явление хроматической адаптации водорослей. На больших глубинах в морских и океанских водах, где преобладают зеленые и синефиолетовые лучи, доминируют формы ФП, содержащие пигменты максимально поглощающие эти лучи. Каротиноиды бурых водорослей поглощают синефиолетовые лучи, фикоэритрин красных водорослей — зеленые лучи. Благодаря этому клетки ФП полнее используют свет того спектрального состава, который реализуется на глубинах обитания соответствующего типа ФП. Эти качественные рассуждения во многом могут служить объяснением обсуждавшихся выше вертикальных профилей концентрации разных видов ФП.

Четким доказательством в пользу такой интерпретации роли дополнительных пигментов служат данные о сенсibilизированной флуоресценции ХлФ: миграция энергии идет в направлении от пигментов, поглощающих более коротковолновые лучи, к пигментам, поглощающим лучи большей длины волны. Конечным акцептором энергии является пигмент с наиболее низким уровнем электронного возбуждения, то есть пигмент, полоса поглощения которого расположена наиболее далеко в красной и ИК области спектра. Таковым в ХП клеток ФП является ХлФ_а. Таким образом, световая энергия, поглощенная другими пигментами, используется в процессе фотосинтеза только после того, как она передается главному фотокаталитическому пигменту — ХлФ_а. Эти рассуждения в равной мере относятся и к ХлФ_{б, с, d, e}. Поглощенные ими лучи также вызывают сенсibilизированную флуоресценцию ХлФ. Таким образом, к центру фотохимической активности подводится не только энергия, поглощенная непосредственно ХлФ_а, но и другими пигментами — ХлФ_{б, с, d, e}, каротиноидами, фикобилинами. Состав пигментов и их количественное соотношение естественным образом регулируются в ХП живой клетки таким образом, чтобы квантовый выход фотосинтеза был максимальным и практически одинаковым во всем доступном (для конкретных условий обитания клетки ФП) диапазоне длин волн солнечного света (на рис. 49). Следует отметить, однако, что роль вспомогательных пигментов не исчерпывается поставкой энергии поглощенных ими квантов к ХлФ_а. Оказалось, что для того, чтобы поглощение ХлФ_а в дальней, красной области было эффективным, необходимо дополнительно освещать клетку квантами света меньшей длины волны, поглощаемыми главным образом дополнительными пигментами (так называемый эффект усиления Эмерсона). У зеленой водоросли этой цели служит ХлФ_б, у синезеленой — фикоцианин, у красной — фикоэритрин, у диатомовой — фукоксантин.

Важно подчеркнуть, что для каждого индивидуального пигмента характерны четкие, хорошо выраженные полосы поглощения, в спектрах же поглощения клеток водорослей вклад различных пигментов определить трудно (рис. 50). Как правило, лишь красный максимум поглощения ХлФ_а выражен достаточно четко, в то

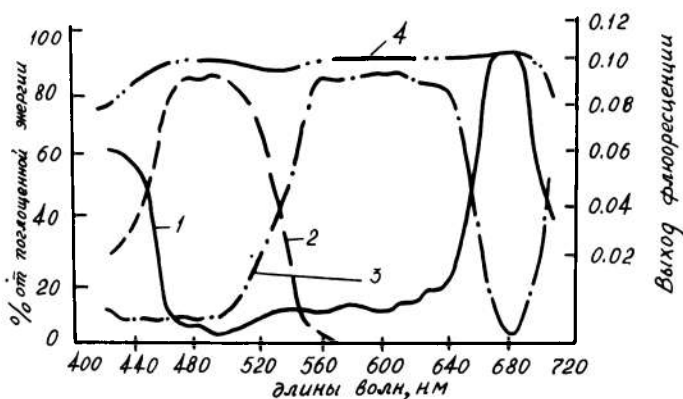


Рис. 49. Спектры поглощения экстрагированных из синезеленой водоросли пигментов и квантовый выход флюоресценции 1 — хлорофиллы; 2 — каротиноиды; 3 — фикоцианин; 4 — квантовый выход флюоресценции.

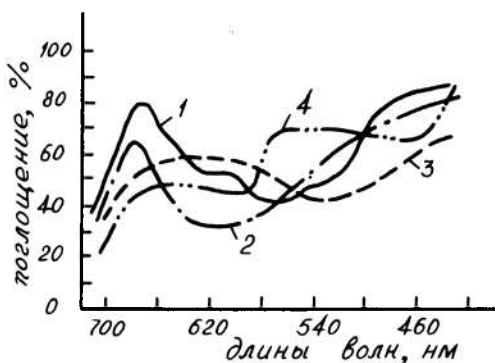
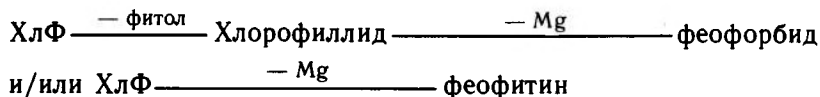


Рис. 50. Спектры поглощения разных типов водорослей (относительные величины). 1 — зеленые; 2 — бурые; 3 — синезеленые; 4 — красные.

время как поглощение другими пигментами проявляется в наличии «ступенек» в контуре коротковолнового (синего) поглощения или же в изменении наклона спектрального распределения поглощения в этой области по обе стороны от максимума. Обращает на себя внимание, что без принятия специальных инструментальных мер [74] в спектрах поглощения клетками ФП не обнаруживается характерный для ХлФ минимум поглощения в области 500—600 нм. Это обычно объясняется высоким содержанием ХлФ (компенсирующим в некоторой степени слабое поглощение в расчете на молекулу ХлФ) и, кроме того, внутренним отражением в клетке, удлиняющим главным образом путь слабопоглощенного (т. е. зеленого) света. Однако, если бы только в этом и заключалось все объясне-

ние, то можно было бы ожидать почти полного поглощения в области синего и красного максимумов ХлФ. По-видимому, более правильно видеть объяснение этому наблюдательному факту в возрастании роли рассеяния мелкими частицами и пигментами ХлФ.

Особого внимания заслуживает вопрос о продуктах разрушения ХлФ, которое имеет место в естественных водоемах в результате кислотного гидролиза [76]. Последовательность разрушения ХлФ можно отразить следующей упрощенной схемой:



При деградации ХлФ_a в феофитин-а максимум поглощения при 430 нм смещается в 410 нм, а длинноволновая полоса при 664 нм сдвигается в область $\lambda=667$ нм. Удельные коэффициенты поглощения ХлФ и феофитина при 665 нм относятся как 1,7:1 [77—80]. Подкисление ХлФ_c приводит к исчезновению красноволновой полосы поглощения.

Ввиду схожести спектров поглощения ХлФ и дериватов, оценки концентрации ХлФ по измерению оптической плотности в красном свете могут привести к завышенным величинам. Между тем корректное определение концентрации феопигментов чрезвычайно важно, так как оно отражает содержание в пробе «мертвого» ФП.

Для определения содержания феопигментов используется ряд методов, среди которых можно отметить тонкослойную хроматографию [81], метод Лоренца [77], в котором погашение света нейтральными и подкисленными экстрактами измеряется на $\lambda=665$ нм, метод Мосса [79], основанный на эффекте смещения максимума поглощения ХлФ после подкисления от 430 к 410 нм, флуориметрический и люминесцентный методы [82, 83].

Ввиду того, что фотосинтетическая активность всех без исключения растительных клеток невозможна без наличия в них ХлФ_a, последний принят как индикатор биомассы водорослевого ФП. Основное затруднение при этом принято видеть в том, что относительное содержание ХлФ_a в «сыром» ФП колеблется в зависимости от флористической принадлежности ФП, объема клеток и их физиологического состояния (возраст, уровень трофии, наличие света) и т. д. в довольно широких пределах. Коэффициент перехода от весовых единиц пигмента к органическому углероду варьирует по данным разных авторов от 25 до 100, к сырой биомассе — от 250 до 1000 [76]. Соответственно в широких пределах колеблется и коэффициент перехода от счетной концентрации клеток ФП к $C_{\text{ХлФ}}$. Примером влияния флористического фактора на этот коэффициент могут служить данные [30], согласно которым для одной и той же счетной концентрации ФП ($200 \cdot 10^6$ кл/л) содержание ХлФ_a достигает в случае *Scenedesmus* 250 мг/л, а для *Nostoc* — 25 мг/л.

В олиготрофных и мезотрофных водах, занимающих большую часть акватории Мирового океана, значения $C_{\text{ХлФ}}$ находятся в пре-

делах $0,09—0,35 \text{ мг/м}^3$ [84]. Во внутренних морях содержание ХлФ_а может сильно повышаться. Так для Каспийского моря максимальные концентрации ХлФ_а варьируют в поверхностном слое от 3 до 6 мкг/л [85]. В озерах величины $S_{\text{ХлФ}_a}$ могут быть довольно значительными. По данным Ладожской экспедиции 1982—83 гг. ИОЗ АН СССР, $S_{\text{ХлФ}_a}$ варьирует в зависимости от района озера от 0,12 до 45 мкг/л. В озере Байкал $S_{\text{ХлФ}_a}$ равно $0,5—1,0 \text{ мг/м}^3$. В водах озера Онтарио для $S_{\text{ХлФ}_a}$ значения оказались в пределах $1,33—16,43 \text{ мг/м}^3$. Для сравнения можно отметить, что в таких холодных и малопродуктивных озерах, как таймырские, в поверхностном слое до 3—4 м $S_{\text{ХлФ}_a}$ составляет $0,105—0,282 \text{ мг/м}^3$ (при средней численности клеток ФП 1064560 кл/л и средней биомассе $1,2 \text{ мг/л}$) [87].

Как отмечалось выше, для корректной оценки живой биомассы ФП по содержанию ХЛФ необходимо вводить поправку на феопигменты. Это становится особенно существенным, когда в водоемах обилен зоопланктон, в пищеварительном тракте которого ХлФ в результате кислотного катализа, трансформируется до дериватов и затем включается в фекальные массы. Важен учет феофитинов и при ресуспензии их из донных отложений.

В литературе часто приводятся данные по содержанию феопигментов в % от общего количества ХлФ. Для пресных вод характерные средние значения этого показателя — 20—30% (Озеро Байкал — 22%, Рыбинское водохранилище — 32%, Можайское водохранилище — 22%) [76]. Морской ФП отличается более высоким относительным содержанием неактивных форм пигментов. Для эвтрофных и олиготрофных районов западной части Тихого океана доля феопигментов составила 60%, в западной части Индийского океана — 20—80%, а для юго-восточной части Атлантики и Средиземного моря — 20—50%. Интересные данные [88] одновременных измерений концентраций ХлФ_а и феофитина получены в 1975—76 гг. на Ладожском озере. Содержание ХлФ_а в 1975 г. (для слоя 0—5 м) изменялось от 0,6 до 9 мг/м^3 при среднем значении $3,2 \text{ мг/м}^3$. Содержание феопигментов за этот период варьировало от 0,03 до $2,3 \text{ мг/м}^3$. В июле 1976 г. оно колебалось от 0 до $3,63 \text{ мг/м}^3$. Относительное содержание феопигментов в общем количестве ХлФ_а менялось от 0 до 96%; в среднем по озеру — $27, \pm 5,9\%$ в июне; $28,7 \pm 8\%$ в июле; $40,5 \pm 8,1\%$ в сентябре 1975 г. и $20,4 \pm 9\%$ в июле 1976 г. В [88] отмечается, что содержание феопигментов в ФП увеличивается к концу вегетационного периода. Эти данные интересно сравнить с данными для олиготрофного озера Таймыр, где в слое 0—4 м концентрация феопигментов варьировала от 0 до $0,127 \text{ мг/м}^3$ (при $S_{\text{ХлФ}_a}$, как отмечалось выше, $0,105—0,282 \text{ мг/м}^3$).

Относительно вертикальных профилей поля концентрации ХлФ_а следует указать, что здесь сказывается влияние большого числа факторов: уровень инсоляции [89], гидрооптические характеристики вод и их термическая и плотностная стратификация, время года, этап вегетационного развития, трофия вод, флористический

комплекс и др. В результате, положение горизонта максимальной концентрации ХлФ испытывает весьма значительные временные и пространственные вариации. Здесь будет уместно подчеркнуть важность учета этого обстоятельства при проведении забора проб на содержание ХлФ_a для сопоставления с данными дистанционного зондирования: такое сопоставление часто оказывается некорректным, если $C_{\text{ХлФ}_a}$, определенная *in situ*, относится к самому поверхностному слою водоема.

Для вертикального распределения феопигментов в водоемах характерно увеличение их концентрации с глубиной [90] с максимумом — на горизонте скачка плотности. ХлФ, накапливающийся ниже термоклина, так же представлен преимущественно неактивными формами. В области максимума пигментов, которая располагается выше термоклина, больше активного ХлФ. У поверхности ФП, как правило, состоит в основном из активных клеток. Именно под этим углом зрения необходимо рассматривать обсуждавшиеся выше вертикальные профили биомассы и численности ФП.

В пресных водоемах картина распределения содержания феопигментов по вертикали имеет свои особенности. Так по исследованиям на озере Иссык-Куль в относительном содержании феопигментов отмечены два максимума — на глубине, равной приблизительно удвоенной глубине прозрачности по диску Секки и в придонном слое [76]. Можно также указать и на зависимость доли феопигментов от облученности горизонтов — I_z/I_0 (I_0 и I_z — облученности поверхности и исследуемого горизонта, соответственно). При $I_z/I_0=1$, содержание феопигментов составляло 25—50% при $I_z/I_0=0,01-0,1$ оно возрастало до 60—90% [91]. По-видимому можно считать установленным фактом также и проявляющуюся иногда тенденцию к увеличению относительной доли феопигментов со значительным повышением температуры воды [92].

3.2. Оптические характеристики основных компонентов естественных вод

Обратимся вначале к рассмотрению общей схемы пассивного дистанционного мониторинга водной среды. Чувствительный элемент прибора, установленного на какой-либо движущейся платформе на высоте «Н» от поверхности воды, воспринимает суммарную энергетическую яркость B_λ^o , приходящую от визируемого элемента подстилающей поверхности. В общем случае B_λ^o является суммой нескольких компонентов

$$B_\lambda^o = B_\lambda^R + B_\lambda^A + P_\lambda^a \cdot B_\lambda^w, \quad (28)$$

где B_λ^R и B_λ^A — яркости, обусловленные молекулярным (релеевским) и аэрозольным рассеянием в атмосфере; P_λ^a — передаточная функция атмосферы; B_λ^w — яркость визируемой водной поверхности.

Таким образом при дистанционном мониторинге полезный сигнал заключен в слагаемом V_{λ}^w . Последнее в свою очередь складывается из яркостей диффузного и зеркального отражения поверхностью воды и яркости света, выходящего из толщи водоема $P_{\lambda}^s \cdot V_{\lambda} \uparrow$, где P_{λ}^s — передаточная функция границы раздела вода — атмосфера.

В общем случае поверхностная яркость $V_{\lambda} \uparrow$ — сложная функция, зависящая от поглощательных и рассеивающих свойств воды как таковой, растворенных в ней органических веществ, минеральной и органической взвесей, а также флуоресцентных свойств основных форм органического вещества (ОВ) в воде — живого ОВ ФП, неживого во взвеси и растворенного ОВ (РОВ). Отсюда следует, что при дистанционной индикации какой-либо оптически активной компоненты воды, необходимо уметь выделить из входящего сигнала V_{λ}^0 все не относящиеся к этой компоненте составляющие сигнала. Ясно, что для этого нужно располагать соответствующей априорной информацией.

Оставляя пока в стороне все атмосферные эффекты (V_{λ}^R , V_{λ}^A и P_{λ}^A), а также эффекты, обусловленные границей раздела вода — атмосфера, обратимся к анализу структуры и свойств функции $V_{\lambda} \uparrow$. Для этого последовательно рассмотрим микрофизические и оптические свойства основных компонентов естественных вод.

Чистая вода. обстоятельный обзор экспериментальных данных об оптических характеристиках чистой воды (под которой понимается химически чистое вещество, являющееся смесью нескольких видов молекул воды с различным молекулярным весом) дан в работе [93]. В таблице 3 приведены спектральные зависимости ослабления света чистой водой, которые, по-видимому, могут рассматриваться в настоящее время как наиболее достоверные. Приведенные здесь значения относятся к температуре 20° С. Отмечается, что при изменении температуры воды от 0,5 до 26° С, величина показателя ослабления ϵ изменяется не более, чем на 15%. Наибольшие температурные изменения ϵ обнаруживаются в области максимума ослабления вблизи 750 нм (при этом имеет место небольшой сдвиг самого максимума). Помимо температурной, существует также и зависимость ϵ от давления. Однако в большинстве случаев для целей дистанционного зондирования ею можно, по-видимому, пренебречь.

Растворенные соли. Неорганические соли, присутствующие в воде естественных водоемов и прежде всего в значительных количествах в океанах и морях (в среднем 35 г/л в океанской воде), вносят добавку как в рассеяние, так и в поглощение чистой водой. Эта добавка оказывается максимальной в УФ области спектра и быстро убывает в видимом диапазоне (таблица 3). Обусловленное растворенными неорганическими солями рассеяние света (пропорциональное концентрации солей) имеет ту же спектральную зависимость, что и рассеяние на флуктуациях плотности чистой воды и составляет по отношению к нему для морской воды соленостью 35—38‰ примерно 30%. Возможные вариации значений показате-

Таблица 3

Оптические свойства чистой воды и чистой морской воды ($t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$, $P=1013\text{ мб}$) [93]

λ , нм	Чистая вода					Морская чистая вода	
	$n(\lambda)$	$n'(\lambda)10^3$	$\epsilon 10^3, \text{ м}^{-1}$	$\sigma 10^3, \text{ м}^{-1}$	$\kappa 10^3, \text{ м}^{-1}$	$\epsilon 10^3, \text{ м}^{-1}$	$\sigma 10^3, \text{ м}^{-1}$
250	1,377	3,8	220	32,0	190	680	42
300	1,359	0,96	55	15,0	40	160	20
320	1,354	0,51	32	12,0	20		
350	1,349	0,33	20	8,2	12		
400	1,343	0,19	11	4,8	6	12	6,2
420	1,342	0,17	9	4,0	5	10	5,2
440	1,340	0,14	7	3,2	4	8	4,2
460	1,339	0,07	5	2,7	2	6	3,5
480	1,337	0,11	5	2,2	3	6	2,9
500	1,336	0,24	8	1,9	6	8	2,5
520	1,335	0,58	16	1,6	14	16	2,1
530	1,335	0,93	23	1,5	22	24	2,0
540	1,335	1,2	30	1,4	29	31	1,8
550	1,334	1,5	36	1,3	35	37	1,7
560	1,334	1,7	40	1,2	39	41	1,6
580	1,333	3,4	75	1,1	74	75	1,4
600	1,333	9,6	200	0,93	200	200	1,2
620	1,332	12	240	0,82	240	240	1,1
640	1,332	14	270	0,72	270	270	0,94
660	1,331	16	310	0,64	310	310	0,83
680	1,331	20	380	0,56	380	380	0,72
700	1,330	33	600	0,5	600	600	0,65
740	1,329	132	2250	0,4	2250	2250	0,52
750	1,329	156	2620	0,39	2620	2620	0,50
760	1,329	155	2560	0,35	2560	2560	0,46
800	1,328	129	2020	0,29	2020	2020	0,38

для рассеяния σ_{λ} для оптически чистой морской воды (т. е. морской воды, в которой отсутствуют взвешенные частицы и органические вещества как в растворенном, так и в коллоидном виде) за счет изменения солености в океанах и морях не превышают 4—3%.

Угловое распределение рассеянного света для чистой морской воды может быть с удовлетворительной точностью рассчитано по формуле

$$\sigma(\gamma) = \sigma(90^{\circ}) (1 + 0.84 \cos^2 \gamma), \quad (29)$$

которая справедлива и для рассеяния чистой водой [93]. В таблице 4 приведены значения $\sigma(\gamma)$ для чистой морской воды при $\lambda=546$ нм.

Т а б л и ц а 4.

Значения $\sigma(\gamma)$, $\text{м}^{-1}\text{ср}^{-1}$ для чистой воды ($\lambda=546$ нм)

γ , град.	0,180	10,170	20,160	30,150	45,135	60,120	75,105	90
$\sigma(\gamma) 10^4$	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,3	1,2	1,1

Растворенное органическое вещество. Помимо солей, воды естественных водоемов содержат в тех или иных количествах растворенные органические вещества (РОВ), которые создаются либо фотосинтезирующими растениями ФП (автохтонное РОВ), либо поступают с суши (аллохтонное РОВ). Бесспорно, что аллохтонная компонента РОВ также была первично создана в процессе фотосинтеза, но затем прошла сложный и длительный путь неполной утилизации в профических цепях захоронения, консолидации и «созревания», прежде чем попала в водоем. Генетически она связана с фитомассой суши, гумусом почвы и ОВ древних пород.

Главным продуцентом РОВ в океане является ФП. Аллохтонная компонента РОВ играет заметную роль в прибрежных водах морей и океанов, а также во внутренних водоемах. Продукция, создаваемая фитобентосом, невелика. Вклад бактериального первичного хемо- и фотосинтеза мало изучен, но в целом для океана, видимо, мал [66].

Все остальные организмы — зоопланктон, зообентос, простейшие, сапрофитовые, а также хемоорганотрофные микроорганизмы не являются первичными продуктами РОВ, т. к. ведут синтез на основе ранее созданного ОВ.

Высказывается мнение [93], что по крайней мере, в океанах и морях РОВ может быть подразделено на консервативное и неконсервативное. Предполагается, что консервативное РОВ является результатом многовекового перемешивания стойкого ОВ. Неконсервативная же часть — это по сути дела «молодое» автохтонное РОВ (в связи с этим можно жидать, что концентрация неконсервативного РОВ должна хорошо коррелировать с концентрацией индикатора живого ФП — ХлФ_а).

Химический состав преобладающей части РОВ известен плохо. В [94, 95] дана возможная структурная формула морского РОВ, в которой в качестве «строительных блоков» выступают такие биосинтетические молекулы как аминокислоты, сахара, аминсахара, жирные кислоты, а также, по-видимому, каротиноиды, хлориновые элементы, фенолы и гидрокарбонаты. При всей малоизученности этого вопроса, очевидно, однако, что РОВ прибрежных районов морей и океанов и особенно внутренних водоемов (где значительна аллохтонная компонента) должно отличаться от РОВ открытых

частей морей и океанов. В аллохтонной компоненте должен быть представлен лигнинно-протеиновый комплекс (характерный для ОВ высшей растительности), тогда как в автохтонном РОВ следует ожидать наличие алифатического углеродно-протеинового комплекса, возможно включающего фенол-содержащие соединения. Количество РОВ в морской воде составляет в среднем 0,001—0,005% [75], т. е. обычно не превышает нескольких мг/л*, что примерно на 4 порядка величины меньше, чем растворенных солей. Однако, по сравнению с последним РОВ в оптическом отношении более активен: не изменяя существенно характеристик светорассеяния воды, он значительно усиливает ее поглощательную способность. В морях и океанах концентрация РОВ ($C_{\text{РОВ}}$) обычно максимальна в слое 0—100 м, уменьшаясь с глубиной (главным образом ниже 250—400 м) [66]. Если для морей $C_{\text{РОВ}}$ не превышает, как отмечалось, нескольких мгС/л, то во внутренних водоемах $C_{\text{РОВ}}$ может быть значительно выше. По данным [96] $C_{\text{РОВ}}$ в озерах варьирует от 1—2 мгС/л до 24—25 мгС/л, а в среднем составляет 7—8 мгС/л. Так в Ладожском озере $C_{\text{РОВ}}$ в среднем составляет 8 мгС/л [60]. В водах озера Онтарио (Канада) $C_{\text{РОВ}}$ принималась [97] равной 2,16 гС/м³. Авторами последней работы были, в частности, рассчитаны спектральные удельные поглощения РОВ (в м²/гС), представленные в таблице 5.

Определенная, по-видимому, небольшая [93], часть РОВ имеет желтоватую окраску. Из-за этой окраски она получила название «желтое вещество» (ЖВ). Полагают, что его образование протекает по так называемой реакции Майера [98], в которой участвуют аминокислоты, углеводороды и фенолсодержащие продукты. Реакция ускоряется при повышенной температуре и в щелочной среде и приводит к образованию желтых и коричневых меланоидов. Высказывается мнение, что меланоиды в морском автохтонном РОВ содержат флуоресцирующее (синим цветом) вещество как побочный продукт реакции. В то же время нефлуоресцирующие феногуминовые кислотные продукты более интенсивного коричневого цвета, по-видимому, имеют в основном, аллохтонный характер [99].

К сожалению пока по спектральному поглощению в видимой области нет возможности отличить консервативную фракцию РОВ от неконсервативной или аллохтонное ЖВ от автохтонного. Не исключено, что спектрам поглощения в других (и прежде все-

Т а б л и ц а 5.

Величины удельного поглощения РОВ (м²/гС) в зависимости от длин волн по данным измерений в озере Онтарио [97]

Длина волн, нм	443	520	550	670
$\chi_{\text{РОВ}}^{\text{уд}}$	0,073	0,073	0,039	0,0042

* Исходя из элементного состава РОВ, полагают, что наиболее надежным показателем его количественного содержания является органический углерод, составляющий примерно половину массы РОВ. Поэтому в литературе концентрацию РОВ часто приводят в гС/м³.

го УФ) диапазонах длин волн эти отличия могли бы быть обнаружены, но до сих пор такие данные, по-видимому, отсутствуют.

Спектральную зависимость поглощения ЖВ можно аппроксимировать экспоненциальным законом:

$$\kappa_{\text{жв}} \sim \exp(-\mu\lambda), \quad (30)$$

где μ — некоторый коэффициент, который вообще говоря, варьирует для различных акваторий и глубин. По данным [100] для океанов среднее значение $\mu \approx 0,015 \text{ нм}^{-1}$. Исследования, выполненные в Рижском и Пярнусском заливах [101], дали значения μ в пределах $0,017—0,019 \text{ нм}^{-1}$. В [93] приводятся значения показателя экспоненты μ , равные 0,015; 0,012; 0,016 для поверхностных слоев (0—100 м) океанских вод с разным суммарным содержанием хлорофиллов (а, б, с) — олиготрофных ($C_{\text{ХлФ}} < 0,02 \text{ г/м}^2$), мезотрофных ($C_{\text{ХлФ}} = 0,02 \div 0,04 \text{ г/м}^2$) и эвтрофных ($C_{\text{ХлФ}} > 0,04 \text{ г/м}^2$), соответственно. Так же приводятся значения μ для глубоководных (>100 м) слоев Тихого ($0,017 \text{ нм}^{-1}$) и Индийского ($0,019 \text{ нм}^{-1}$) океанов. Заметно некоторое увеличение величины μ при переходе от поверхностных вод к глубинным. Однако значения μ для вод в слоях глубже 100 м получены без учета вклада ХлФ ФП в предположении, что поглощение на этих горизонтах обусловлено исключительно ЖВ.

В таблице 6 приведены значения $\kappa_{\text{жв}}$ морской воды по данным [102] (цитируется по [65]).

Т а б л и ц а 6.

Спектральная зависимость $\kappa_{\text{жв}}$ морской воды

$\lambda, \text{ нм}$	400	420	440	460	480	500	520	540
$\kappa_{\text{жв}}, \text{ м}^{-1}$	0,024	0,0168	0,0125	0,0093	0,0070	0,0052	0,0039	0,0029
$\lambda, \text{ нм}$	560	580	600	620	640	680	700	
$\kappa_{\text{жв}}, \text{ м}^{-1}$	0,0022	0,0016	0,0012	0,0009	0,0007	0,0004	0,0003	

Поскольку в практике океанологических анализов ЖВ не выделяется и не определяется его концентрация *, то по крайней мере для оптических целей можно количественно характеризовать наличие ЖВ в воде величиной $\mu_{\text{жв}}$ (м^{-1}) (который пропорционален концентрации ЖВ) при определенной длине волны λ_0 . Величина $\mu_{\text{жв}}$ может быть найдена в первом приближении как разность между $\kappa_{\text{ров}}(\lambda_0)$ и $\kappa_{\text{пигменты ФП}}$. По данным [93] $\kappa_{\text{жв}}(\lambda_0 = 390 \text{ нм})$ для вод открытого океана варьирует от исчезающе малых значений порядка $0,001 \text{ м}^{-2}$ в олиготрофных водах до значений порядка

* О выделении ЖВ и определении его спектральных свойств сообщается в [101].

$0,1 \text{ м}^{-1}$ и более в эвтрофных. В морях, в частности Балтийском, $\kappa_{\text{жв}}$ ($\lambda_0 = 375 \text{ нм}$) может иметь значение $0,6 \div 0,68 \text{ м}^{-1}$ [103]. В прибрежных районах $\kappa_{\text{жв}}$ (390) достигает величины $0,6 \div 0,8 \text{ м}^{-1}$ (при этом весьма существенными становятся абсолютные и относительные вариации $\kappa_{\text{жв}}$).

В [93] предлагается, используя значение $\kappa_{\text{жв}}(\lambda_0)$, рассчитывать $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ по формуле:

$$\kappa_{\text{жв}}(\lambda) = \kappa_{\text{жв}}(390) e^{-0,015(\lambda - 390)} \quad (31)$$

Определенная часть РОВ (преимущественно низко- и среднемолекулярная фракции) обнаруживает способность к флуоресценции. Поскольку флуоресцирующая фракция РОВ в настоящее время не выделяется, о ее количественном содержании можно судить лишь по интенсивности флуоресценции.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что полоса флуоресценции РОВ ассиметрична, размыта и сдвинута (на несколько десятков нм) в длинноволновую область по отношению к спектральному участку возбуждения [93].

Исследования, выполненные в Балтийском море, Атлантическом и Тихом океанах показали [104, 105], что помимо УФ света, флуоресценция РОВ вызывается также и видимым излучением, причем с уменьшением длины волны возбуждающего света, максимум флуоресценции смещается в коротковолновую область спектра. Отмечается [93], что при равной мощности возбуждающего излучения коротковолновые линии возбуждают более интенсивные полосы флуоресценции, чем длинноволновые. Важно отметить, что полосы излучения при флуоресценции РОВ сохраняют свое положение и форму (полуширина полос составляет от 140 до 160 нм) для различных акваторий при неизменном спектральном составе возбуждающего света.

Крупномасштабное распределение интенсивности флуоресценции РОВ следует за распределением биологической продуктивности, так что флуоресценция максимальна в прибрежной зоне и апвеллингах и минимальна в районах конвергенций; причем диапазон ее изменений превышает два порядка [103, 106]. В отношении вертикальных профилей флуоресценции РОВ можно отметить, что в олиго- и мезотрофных водах (вне зоны влияния континентального стока) интенсивность флуоресценции увеличивается с глубиной. Однако в районах апвеллингов и весьма продуктивных районах она падает (в последнем случае очень резко с глубиной [106]).

Представляет интерес выяснение связи между флуоресцирующей компонентой РОВ и ЖВ. В [93, 107] высказано предположение, что флуоресцирующая компонента составляет лишь часть ЖВ (поскольку флуоресценция есть следствие поглощения, но не все что поглощает — непременно флуоресцирует). отождествлять поглощающую и флуоресцирующую компоненты, по-видимому, нельзя, т. к. они обнаруживают разные вертикальные профили.

Так, в открытых частях океанов $C_{жв}$, как указывалось выше, максимальна в слое 100—200 м, в то время как интенсивность флуоресценции РОВ монотонно возрастает до глубин по крайней мере 250 м (а затем до глубин около 400 м изменяется, как правило весьма незначительно) *.

Минеральная и органическая взвесь. Непременной компонентой естественных вод является минеральная и органические взвеси, объединенные общим названием «гидрозо́ль».

По своему составу и происхождению гидрозо́ль чрезвычайно разнообразен: это и минеральные частицы терригенного происхождения, и ФП, детрит (остаточный продукт разложения клеток фито- и зоопланктона), и частицы вулканического пепла, а также частицы антропогенного происхождения и др. Однако основная масса гидрозо́ля состоит из двух компонентов — терригенного и биогенного.

Попадая в океан, терригенный материал теряет (примерно на 90%) свою крупнодисперсную фракцию уже вблизи берега; воды открытой части океанов и морей «населяют» частицы мелкодисперсной фракции, в которой частицы с размером больше 1 мкм единичны, а подавляющее большинство имеет размеры меньше 1 мкм. По структуре это аморфные и кристаллические частицы [109]. Биогенные частицы, в соответствии с данными, приведенными выше, имеют преимущественные размеры существенно превышающие 1 мкм, порой достигая десятков и даже сотен микрон. Частицы детрита обнаруживаются как в субмикронной фракции, так и в крупнодисперсной. Как показывают специальные исследования [110, 11], детрит, как правило, служит субстратом для развития бактериальных организмов в результате чего его частицы «насыщены» БП и их эффективные размеры $\gg 1$ мкм.

По данным [103] весовая концентрация гидрозо́ля в поверхностных водах океанов составляет $0,02 \div 0,17$ мг/л, а в глубинных — $0,01 \div 0,05$ мг/л (причем доля органической взвеси в гидрозо́ле оценивается в $20 \div 60\%$). Однако, согласно [75], средняя весовая концентрация гидрозо́ля в океане значительно выше: $0,8 \div 2,5$ мг/л. В заливах она может достигать величины 18 мг/л. По данным [107] значение весовой концентрации гидрозо́ля в поверхностных водах открытого океана лежит в пределах $0,05 \div 0,5$ мг/л, но вблизи побережья может возрастать в десятки и сотни раз; в глубинных водах концентрация взвеси снижается до $0,001 \div 0,25$ мг/л. В [95] в качестве одной из причин столь значительного несоответствия приведенных данных отмечается отсутствие достаточно надежной и унифицированной методики измерений: результаты оказываются зависящими от типа используемых фильтров, методики фильтрации и проч.

Совершенно очевидно, что для внутренних водоемов массовая

* Имеются указания на то, что такой характер глубинного профиля флуоресценции РОВ в морях не является универсальным. Измерения в Море Ирмингера не обнаружили этой закономерности [108].

концентрация взвеси должна испытывать еще большие вариации (как от водоема к водоему, так и в пределах каждого водоема), что обусловлено прежде всего влиянием стоков, трофическими вариациями и рядом других факторов. Вопрос этот очень сложный и мы ограничимся здесь данными лишь по двум озерам. По результатам Ладожской экспедиции 1980—82 гг. общая концентрация взвеси варьировала по районам озера от 4,2 до 12 г/м³, при этом органическая компонента составляла от 50 до 97%, а минеральная — от 50 до 3%, при средних значениях около 50%.

Измерения концентрации минеральной взвеси на озере Онтарио [112] показали, что она варьировала от 0,2 до 8,9 г/м³. По результатам измерений *in situ* были получены значения удельных коэффициентов поглощения и рассеяния для минеральной взвеси, указанные в таблице 7.

Таблица 7.

Значения спектральных удельных коэффициентов поглощения и рассеяния для частиц минеральной взвеси [112] (B — вероятность рассеяния назад)

λ нм	По результатам на озере Онтарио		κ , (м ⁻¹) по данным (37) *	По результатам на озере Онтарио	
	$\kappa_{уд.}$ (м ² /г)	$\kappa^*_{уд.}$ (м ⁻¹)		$\sigma_{уд.}$ (м ² /г)	$(B\sigma)_{уд.}$ (м ² /г)
443	0,0557	0,17	0,15	0,682	0,0328
520	0,0281	0,087	0,070	0,650	0,0474
550	0,0185	0,057	0,050	0,643	0,0525
670	0,0225	0,070	0,095	0,512	0,0333

* величина κ приведена к условиям, при которых $\sigma = 2 \text{ м}^{-1}$ ($\lambda = 550 \text{ нм}$); концентрация минеральной взвеси — 3,11 г/м³.

Органические частицы детрита по весу, как правило, не превышали 1—10% от веса всей органической компоненты гидрозоля озера Онтарио и лишь в прибрежных водах достигали 50—60%.

В таблице 8 приведены значения удельных коэффициентов поглощения и рассеяния для этого сорта частиц, а также для частиц ФП.

Таблица 8.

Значения спектральных удельных коэффициентов поглощения и рассеяния частицами детрита и ФП [112] (в м²/г)

Длина волны, нм	$\kappa_{уд.}$		$\sigma_{уд.}$		$(B\sigma)_{уд.}$	
	детрит	ФП	детрит	ФП	детрит	ФП
443	0,0272	0,0354	0,398	0,128	0,00900	0,00199
520	0,0206	0,0240	0,363	0,127	0,00756	0,00182
550	0,00098	0,0173	0,351	0,128	0,00972	0,00241
670	0,0	0,0100	0,290	0,104	0,00472	0,00175

По результатам 8-го и 10-го рейсов НИС «Дмитрий Менделеев» для большинства поверхностных вод в открытых районах океана характерная числовая концентрация гидрозоля составляет $(1-2) \cdot 10^8$ частиц/л, а в наиболее прозрачных водах — $(0,2 \div 0,5) \cdot 10^8$ частиц/л [93].

По данным [113] числовая концентрация частиц с $r > 0,5$ мкм составляет для океанов и морей $10^5 \div 10^8$ частиц/л. Согласно [114], распределение частиц по размерам может быть описано распределением типа Юнге:

$$f(r) = A \cdot r^{-n} \quad (32)$$

при

$$r_1 \leq r \leq r_2,$$

где A — нормировочный множитель, $r_1 = 0,01 \div 0,2$ мкм; $r_2 = 1 \div 2$ мкм.

В [93] утверждается, что для большинства океанских и морских вод $n=5$. Для вод Черного моря $n=4$ для глубинных вод Саргасова моря $n=6$. По данным, собранным в [115], величина n для морей и океанов изменяется от 0,7 до 6, при среднем значении 2,5. В [116] наилучшее соответствие теоретических и экспериментальных индикатрис полидисперсной океанской взвеси было получено при n , лежащем в пределах $3 \div 4,5$.

В [117] для вод Балтийского моря распределение гидрозоля по размерам параметризуется (для частиц с $d > 2$ мкм) суммой двух функций

$$f(d) = \begin{cases} K_1 \cdot d^{-n_1} & 2 \text{ мкм} \leq d \leq d_0, \\ K_2 \cdot d^{-n_2} & d_0 \leq d \leq 32 \text{ мкм}, \end{cases} \quad (33)$$

где

$$K_1 = 10^5 \text{ см}^{-3} \text{ мкм}^{-1} (99000); \quad d_0 = 7,5 \text{ мкм} (1,8) \quad n_1 = 3,2 (5);$$

$$K_2 = K_1 \cdot d_0^{-n_1+n_2}, \quad n_2 = 5 (6)$$

(В скобках даны стандартные отклонения).

Те распределения, которые неадекватно описывались гиперболическими функциями, аппроксимировались в [117] суммой гиперболических и гауссовских распределений (рис 51)

$$f(d) = \alpha \cdot \exp[-\gamma(d-d_0)] + \begin{cases} K_1 \cdot d^{-n_1} \\ K_2 \cdot d^{-n_2} \end{cases} \quad (34)$$

где

$$\alpha = 10000 \text{ см}^{-3} \text{ мкм}^{-1}, \quad D_0 = 7,0 \text{ мкм}, \quad \gamma = 0,5 \text{ мкм}^{-2}.$$

Авторы [117] указывают, что гауссовский член может быть сам суммой 2—3-х гауссовских функций (рис. 52). Микроскопический анализ взвесей показал, что гауссовский член обязан водорослевой составляющей гидрозоля. Сообщается, что в районах, где в гидрозоль доминировала минеральная взвесь и детрит, распределения наиболее точно описывались гиперболическими (т. е. юнговского типа) функциями.

Полученное в [117] свидетельство, что частицы ФП дают «всплеск» в распределении по размерам именно в области 1—

20 мкм (с максимумом при 8—10 мкм) хорошо согласуются с данными о характерных размерах клеток ФП, приведенными нами выше в § 3.1.

Здесь следует отметить также, что по наблюдениям морских биологов характерные размеры клеток ФП тем меньше, чем продуктивнее зона. В продуктивных водах преобладают так называемые неопланктон (частицы с размером 2—5 мкм) и ультрапланктон (частицы с размерами < 2 мкм). В сравнительно бедных аридных зонах клетки ФП оказываются более крупными. Именно к такой зоне относятся данные [118] о распределении клеток морского ФП по размерам (рис. 53), согласно которым преобладающая часть клеток имеет размеры 2—5 мкм; кроме того, на кривой распределения заметны перегибы около 20 мкм и 150 мкм. Эти данные, как и результаты, полученные в [117], свидетельствуют о многомодальности распределений по размерам частиц ФП.

Выше мы уже отмечали, что имеются сообщения относительно наличия в пробах морской воды биологических частиц с радиусом в диапазоне 0,01—0,4 мкм. Для таких мелких частиц справедливо распределение типа Юнге с $n=2,65$ [119]. Общая концентрация частиц взвеси в морской воде в диапазоне радиусов $0,01 \div 1$ мкм оценивается в $5 \cdot 10^9 \div 10^{10}$ частиц/л.

Измерения вертикального профиля объемной концентрации частиц взвеси, выполненные в различных точках Мирового океана, показали [120], что с глубиной она уменьшается. Однако в морских и океанских водах часто обнаруживаются прозрачные и мутные «реки», а у дна — «облака» частиц. На этих горизонтах концентрация частиц аномальна. В районах подъема вод наблюдается увеличение органической компоненты — индикатора повышенной продуктивности этих вод.

Вертикальный профиль концентрации гидрозоля обнаруживает и сезонные вариации. На рис. 54 приведены типичные профили для зимнего (а) и летнего (б) периодов для открытой части Балтийского моря. Зимой водная толща подразделяется на два слоя — слой перемешивания 0—60 м (постоянный галоклин) и придонный слой (галоклин — дно). Концентрация частиц ($r > 1$ мкм) в зоне перемешивания к концу зимы составляла около 2000 частиц/см³, что по мнению авторов объясняется минимальными уровнями биологической активности и выноса в море частиц терригенного происхождения. В придонных частях в зимнем вертикальном профиле обнаруживается резкое возрастание (до ~ 8000 частиц/см³ с $r > 1$ мкм) концентрации частиц (но доля частиц с $r > 5$ мкм при этом падает).

В летний период стратификация водной толщи моря изменяется: слой перемешивания расщепляется и формируется поверхностный слой (О-термоклин, ~ 30 м) и промежуточный (термоклин — галоклин). В вертикальном профиле концентрации частиц возникает мощный максимум (который в начале лета локализуется ближе к поверхности, а потом смещается к термоклину), величина которого в начале лета составляла > 10000 частиц/см³, а в кон-

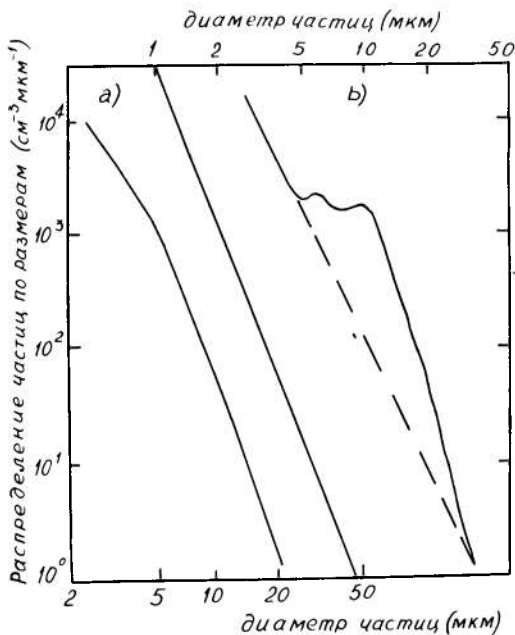


Рис. 51. Распределение частиц по размерам в открытых водах Балтийского моря. а) распределение, характерное для низкой и б) — высокой биологической активности моря.

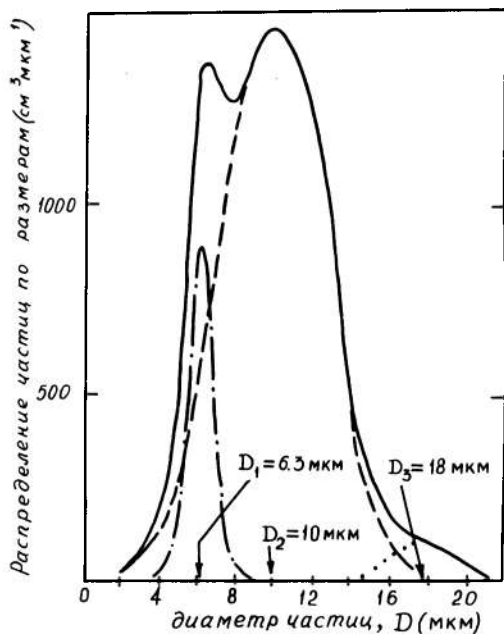


Рис. 52. «Гауссовская» часть распределения частиц гидрозоля по размерам, представленного на рис. 51. D_1 , D_2 , D_3 — средние диаметры частиц, ответственных за эту часть распределения.

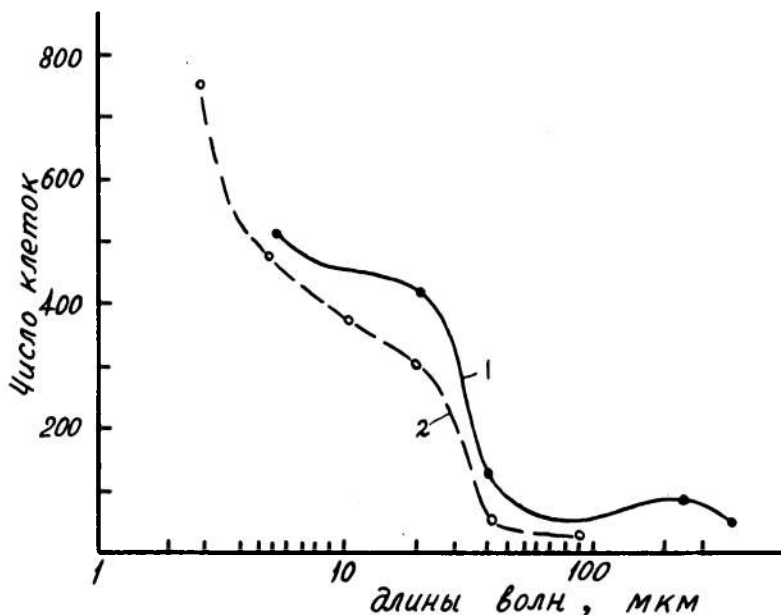


Рис. 53. Распределение клеток ФП: 1 — по ширине, 2 — по длине.

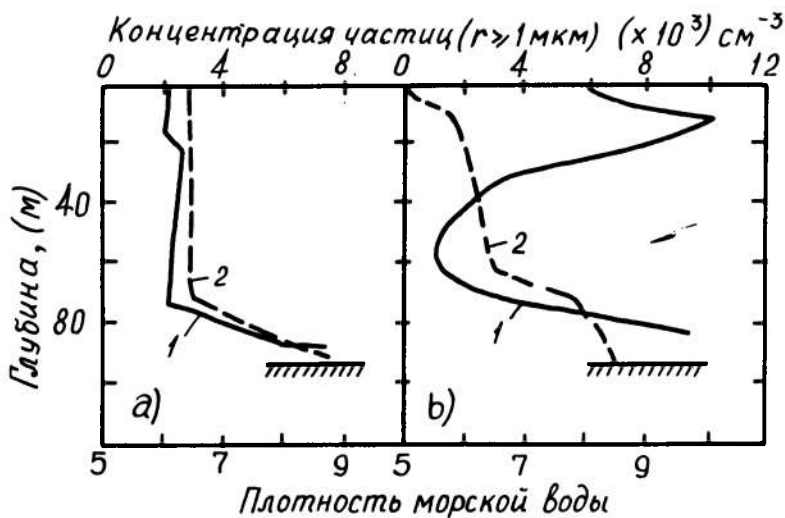


Рис. 54. Глубинные профили счетной концентрации частиц гидрозоля (1) и плотности воды (2) в открытой части Балтийского моря для зимнего (а) и летнего (б) периодов.

це — 35000 частиц/см³ ($r > 2$ мкм). (В прибрежных водах Гданьского залива этот максимум составлял рекордную для вод Балтийского моря величину — 100000 частиц/см³). Одновременно с изменениями вертикального профиля наблюдаются также и сезонные изменения функции распределения частиц по размерам: в летние периоды формируется максимум для частиц с $r > 3$ мкм, что побуждает предположить биологическое происхождение подобных частиц (это подтверждается и микроскопическим анализом). Интересно отметить, что в летнем вертикальном профиле концентрации частиц с $r > 1$ мкм имеется своеобразное «окно прозрачности» на глубине 50—60 м, где концентрация частиц снижается до уровня 1000—1500 частиц/см³. В придонных слоях влияние смены сезонов практически не чувствовалось ни в распределении частиц по размерам, ни в величине счетной концентрации.

В зонах резкого изменения температуры и солености, приводящих к появлению скачка плотности воды, наблюдаются сильные изменения и скачки концентраций частиц гидрозоля. Генезис слоев мутности при этом не всегда связан с возникновением скачков плотности воды, но чаще определяется особенностями распределения планктона.

Мощность и положение слоев варьируют по времени суток; они исчезают после штормов и через несколько суток восстанавливаются вновь (хотя гидрологическая структура вод при этом существенно не изменяется).

Заканчивая обсуждение особенностей микроструктуры морского гидрозоля, приведем сводку значений величин n_1 , n_2 (или n при мономодальном распределении) для различных океанских и морских акваторий, приведенную в работе [117] (рис. 55).

Имеющиеся оценки показателя преломления частиц морской взвеси показывают, что для минеральной фракции относительный показатель преломления варьирует (по разным источникам) от $1,13 \div 1,15$ до $1,20 \div 1,25$ [93, 103]. В случае органической взвеси вопрос усложняется. В [121] отмечено, что при наличии у клетки водоросли твердого панциря (показатель преломления $1,08 \div 1,17$) и мягкой водянистой плазмы (показатель преломления 1,04), такая клетка рассеивает свет подобно двум различным частицам с весьма разными характеристиками. Тем не менее часто принимается, что для органической компоненты относительный показатель преломления заключен в диапазоне $1,02 \div 1,05$ [93, 121].

Очень плохо известны значения мнимой части показателей преломления частиц морской и озерной взвеси, определяющие поглощение. Минеральная фракция (за исключением частиц с примесями соединений железа) и скелетные остатки (детрит) если и обладают, то слабым поглощением. Но в частицах, содержащих растительные пигменты, поглощение несомненно более сильное. Спектры поглощения взвеси (фракция с $r \geq 2,5$ мкм) часто обнаруживают полосы в районе 420—440 и около 680 нм [74], которые несомненно обязаны пигментам ФП. В спектрах оптической плотности взвеси морской воды, полученных в [122], обнаруживается,

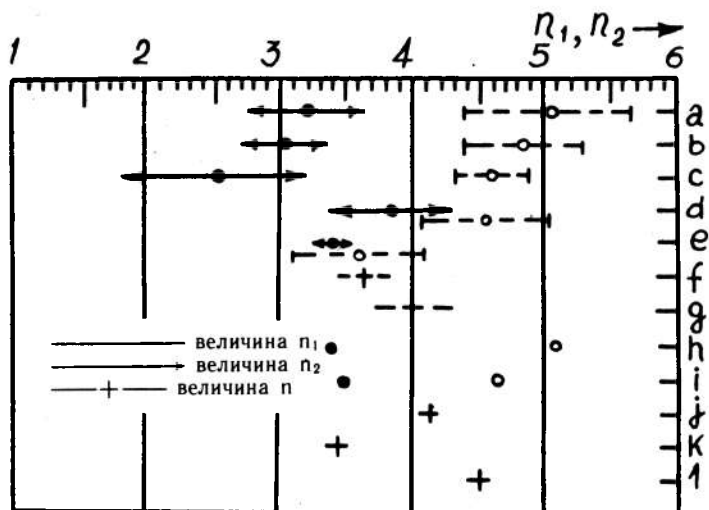


Рис. 55. Значения параметров p , p_1 , p_2 в распределениях частиц по размерам в различных водах для параметризации Kd^{-n} и ее двойное стандартное отклонение. Данные, следующие после букв, обозначают: район, глубина (м), количество проб, диапазон размеров частиц (D , мкм) для наклонов p_1 и p_2 . а — открытые воды Балтики, 0—400; 74; 2—7,5; 7—5—32; б — прибрежные воды Балтики, 0—50; 67; 2—7; 7—32, Гданьский залив; с — антарктический фиорд, 0—80; 83; 2—37; 3,7—32; д — центральная Атлантика, 6; 29; 2—7,2; 7—2—32. е — северная Атлантика, 0—220; 4; 1—4; 4—20. ф — северная Атлантика, 200; 5; 1—30. г — северная Атлантика, 0—400; 53; 2—12. h — Средиземное море, 20; 1; 1—5; 5—20. i — Средиземное море, 200; 1; 1—5; 5—20. j — Средиземное море, 1600; 1; 1—20. k — Тихий океан, глубина неизвестна; 1; 5—100.

что две указанные выше полосы поглощения имеют сложную структуру. Спектр же, относящийся только к минеральным частицам (возможно и к детриту), — плавный, без заметных полос, с монотонным спадом в длинноволновую область.

В качестве сугубо ориентировочной величины мнимой части показателя преломления вещества биологических частиц можно привести значения $0,002 \div 0,004$, полученные в [107] для хлореллы. Прежде чем перейти к светорассеивающим характеристикам морской взвеси, следует упомянуть о существовании еще одного своеобразного вида гидрозоля — воздушных пузырьков в поверхностных слоях с относительным показателем преломления 0,75; размеры пузырьков колеблются от 0,01 до 1000 мкм [75].

Выше уже отмечалось, что форма биологических частиц взвеси чрезвычайно разнообразна. Электронномикроскопические исследования минеральной взвеси также свидетельствуют о значительном разнообразии и нерегулярности форм частиц.

Таким образом, даже имея необходимую информацию о количестве частиц, их распределениях по размерам и их комплексном показателе преломления (чего на самом деле мы никогда не имеем), невозможно корректно рассчитать оптические (прежде

всего — светорассеивающие) характеристики частиц. И здесь полезными оказываются экспериментально определенные индикатрисы рассеяния реальных вод. Хотя последние также довольно изменчивы, однако они, во-первых, дают представление о некоторых эффективных параметрах реального гидрозоля и, во-вторых, позволяют производить осреднение и типизацию. Характерная особенность индикатрис рассеяния морской воды — их резкая вытянутость в направлении падающего света. Это означает, что большая часть рассеянного света сосредоточена в области малых углов рассеяния. У морской воды угол рассеяния, соответствующий телесному углу, в котором сосредоточена половина рассеянного светового потока, лежит в пределах $1,7 \div 2 - 10 \div 14^\circ$ [75. 103].

В работах [100, 123] высказано предположение, что рассеяние в области малых углов преимущественно обусловлено крупными органическими частицами, тогда как на больших углах — основная роль принадлежит минеральной взвеси.

В [116] предложено разделение светорассеивающих свойств естественных вод на типы, исходя из сопоставления значений $\sigma(1)$ и $\sigma(45^\circ)$ ($\lambda = 546$ нм).

В [124] исследовались индикатрисы рассеяния $\sigma(\gamma)$ для вод озера Байкал. Измерения проводились в летний период с помощью нефелометра ($2 \leq \gamma \leq 162^\circ$ и $\lambda_{\text{эф}} = 520$ нм), погружаемого до глубины 150 м. Было обнаружено, что минимальные значения $\sigma = 0,06 \text{ м}^{-1}$ присущи глубинным водам, а максимальные ($\sigma = 0,9 \text{ м}^{-1}$) — поверхностным. Коэффициент асимметрии K индикатрисы рассеяния (отношение показателя рассеяния вперед к показателю рассеяния назад) менялся по акватории озера от 28 до 200. Средний косинус ($\cos \gamma$) варьировал от 0,334 до 0,963, а средний угол рассеяния менялся от $8,9^\circ$ до $18,7^\circ$. В поверхностных слоях (содержавших много планктона) индикатрисы были более вытянуты, характеризовались высокими значениями K . В глубинных слоях (где преобладали мелкие минеральные частицы) индикатрисы были менее вытянутыми и соответственно значения K были невысокими. Отмечалось, что полученная для океанов и морей формула $\sigma = 0,111 \cdot \sigma(4,5^\circ) + 0,007 \text{ (м}^{-1}, \lg)$, применима и к индикатрисам вод озера Байкал, однако более точное восстановление σ получалось, если использовать значение $\sigma(3,5^\circ)$.

Как видно, все обсуждавшиеся до сих пор результаты по оптическим свойствам гидрозоля относятся почти исключительно к океанским и морским водам. Данные об озерном гидрозоле весьма ограничены. Приведенная в таблицах 7—8 информация представляет несомненный интерес, но требует дальнейшей проверки ее надежности для различных типов озер. Кроме того, к сожалению в работе [112] не учитывались (и соответственно, не приводятся) данные о светорассеивающих характеристиках беспигментного БП, который должен приниматься во внимание при разработке алгоритмов восстановления концентрации фитопланктона.

Заканчивая обсуждение этого круга вопросов, следует еще раз подчеркнуть, что изменчивость оптических характеристик естест-

венных вод определяется прежде всего изменчивостью содержания и микрофизических свойств РОВ и гидрозоля. Однако несмотря на всю сложность распределений и вариаций полей этих компонентов, а также существенную неполноту соответствующих экспериментальных данных, уже сейчас, как мы увидим, имеется возможность параметризовать процессы поглощения и рассеяния гидрозолем и РОВ, а следовательно и водным слоем, взаимодействующим с солнечным излучением.

3.3. Физические основы подходов к решению задачи дистанционного восстановления содержания в воде хлорофилла а.

Как уже отмечалось выше, $ХлФ_a$ может быть принят в качестве индикатора биомассы ФП [125].

Радиометр, расположенный над водой и направленный к ее поверхности, воспринимает некоторый яркостный сигнал B_0 , являющийся суммой сигналов, приходящих от поверхности воды и из ее толщи. Очевидно, что яркость света, диффузно отраженного водной толщей в направлении радиометра (B_w), должна быть функционально связана с первичными гидрооптическими характеристиками водной среды. Действительно величина B_w пропорциональна коэффициенту диффузного отражения $R(\tau=0, \lambda)$, который следуя работе [126] может быть представлен таким образом *:

$$R(\tau=0, \lambda) = \sum_{n=0}^N r_n(0) \left[\frac{(Bb)(\lambda)}{a(\lambda) + (Bb)(\lambda)} \right]^n \quad (35)$$

где τ — оптическая плотность водной среды ($\tau=0$ соответствует уровню непосредственно под поверхностью воды), $r(0)$ — безразмерный коэффициент разложения R в ряд (его величина зависит от условий освещения водной поверхности солнцем и наличия (отсутствия облачности), $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ — коэффициенты поглощения и рассеяния водной среды. B — вероятность рассеяния назад, N — число членов разложения в ряд ($=3$).

Поскольку коэффициенты $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ обладают свойством аддитивности, можно записать:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + \sum_i^k a_i(\lambda); (Bb)(\lambda) = (Bb)_w(\lambda) + \sum_i^k (Bb)_i(\lambda), \quad (36)$$

где индекс w относится к воде, i — количество оптически активных компонентов в воде, которыми в водах естественных водоемов является ФП, растворенное органическое вещества (РОВ), минеральная взвесь (МВ), органическая взвесь (ОВ) (помимо ФП) и др. Если ограничиться четырьмя перечисленными компонентами

* Следует подчеркнуть, что существует еще ряд представлений $R(0, \lambda)$ через первичные гидрооптические характеристики [127—130], которые, однако, дают результаты очень близкие к тем, что получаются при использовании формулы (35)

и ввести удельные коэффициенты поглощения и рассеяния $a_i^*(\lambda)$, $b_i^*(\lambda)$, $(Bb)_i^*(\lambda)$, то соотношения примут вид:

$$\begin{aligned} a(\lambda) &= a_w(\lambda) + C_1 \cdot a_1^*(\lambda) + C_2 \cdot a_2^*(\lambda) + \\ &\quad + C_3 \cdot a_3^*(\lambda) + C_4 \cdot a_4^*(\lambda) \\ (Bb)(\lambda) &= (Bb)_w(\lambda) + C_1 \cdot (Bb)_1^*(\lambda) + \\ &\quad + C_2 \cdot (Bb)_2^*(\lambda) + C_4 (Bb)_4^*(\lambda), \end{aligned} \quad (37)$$

здесь индексы $i = 1, 2, 3, 4$ означают соответственно ХлФ, МВ, РОВ и ОВ, C_i — концентрация оптически активного компонента.

Задача таким образом, сводится к тому, чтобы при известных $a_i^*(\lambda)$ и $(Bb)_i^*(\lambda)$, а также $a_w(\lambda)$, $(Bb)_w(\lambda)$, варьируя значения C_i в пределах, которые могли бы считаться репрезентативными для естественных водоемов, проанализировать изменения спектрального распределения $R(\lambda)$ и на этой основе попытаться сформулировать алгоритм, связывающий эти изменения с содержанием ХлФ_а, а, следовательно и ФП.

В работе [131] были предприняты расчеты спектральных значений $R(\lambda, 0)$ для четырехкомпонентной водной среды (H_2O , МВ, ФП, РОВ). Вычисления велись по формуле (35) с коэффициентами разложения, соответствующими условиям безоблачного неба и высот Солнца (при визировании из толщи воды) $\leq 20^\circ$. Концентрации компонентов варьировались в широком диапазоне значений, перекрывающем соответствующие средние величины $\langle C_i \rangle$, зарегистрированные измерениями *in situ* в западной части оз. Онтарио (Канада) [97, 132].

Как известно, традиционным подходом при решении интересующего нас типа задач, является отыскание в регистрируемом спектральном распределении радиации $R(\lambda)$ таких двух длин волн λ_i и λ_j , чтобы на одной из них, например, λ_i значение $R(\lambda_i)$ определялось исключительно концентрацией искомого оптически активного компонента (C_x), а на другой — выполнялось условие $R(\lambda_j) \neq (C_x)$. Результаты обсуждаемых расчетов показывают (рис. 56), что такой традиционный подход может дать адекватные результаты лишь в наиболее простых в оптическом отношении водах, практически лишенных РОВ и с $C_{МВ} \leq 0,1$ г/м³. Действительно, в подобной ситуации с увеличением $C_{ХлФ}$ монотонно (но не линейно) снижается значение $R(430-450)$ (так называемый «хлорофильный провал»), в то время как при 505 нм (для $C_{МВ} = 0$, рис. 56 а) или 570 нм (для $C_{МВ} = 0,1$ г/м³, рис. 56b) имеет место равенство $dR/dC_{ХлФ} = 0$. Для таких условий (часто характерных для океанических вод) могут быть с успехом использованы алгоритмы восстановления типа $C_{ХлФ} = A [R(\lambda_i)/R(\lambda_j)]^{-B}$. В таблице 9 [133] приведены конкретные значения коэффициентов B и A по данным различных авторов, разработавших свои алгоритмы для ограниченных, конкретных акваторий Мирового океана.

Однако, с дальнейшим увеличением $C_{МВ}$ (при $C_{РОВ} = 0$), или $C_{РОВ}$ (при $C_{МВ} = 0,05$ г/м³) в спектре $R(\lambda)$, во-первых, уже отсутствует такая длина волны λ_0 , при которой $dR(\lambda_0)/dC_{ХлФ} = 0$ рис.

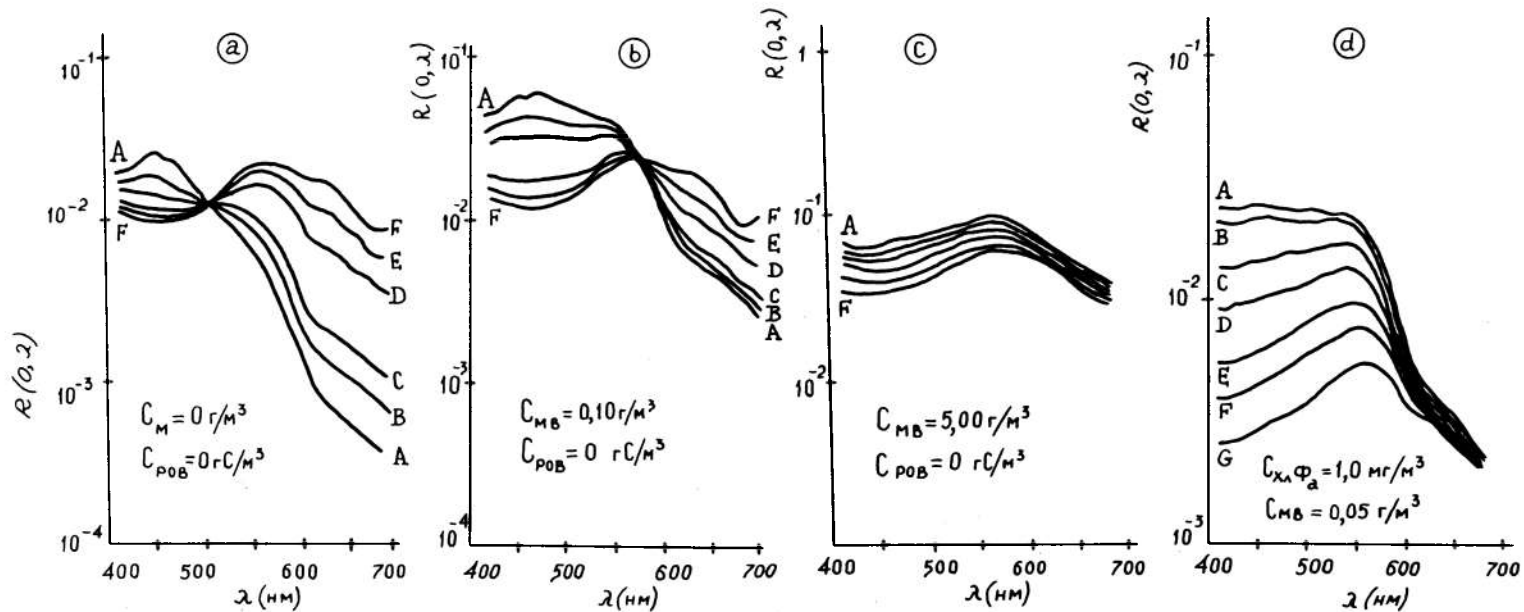


Рис. 56. Спектральные вариации коэффициента диффузного отражения $R(0, \lambda)$ в зависимости от содержания в воде МВ, РОВ и ФП; на рис. 1 а, б, с буквам А, В, С, D, Е, F соответствуют концентрации ХлФ, 0,05; 0,5; 1,00; 5,00; 10,00 и 20,00 мг/м³; на рис. 56 d — буквам А — G соответствуют концентрации РОВ: 0; 0,10; 0,50; 1,0; 2,00; 3,00 и 5,00 г/м³

Т а б л и ц а 9

Алгоритм вида $\langle C_{\text{пигм}} \rangle = A \cdot [R(\lambda_i)/R(\lambda_j)]^B$, предложенный различными авторами: r — коэффициент корреляции, N — число наблюдений, по которым установлена регрессионная зависимость.

$R(\lambda_i)/R(\lambda_j)$	A	—B	N	r^2
R(443)/R(550)	0,776	1,329	55	0,91
R(443)/R(520)	0,551	1,806	55	0,87
R(440)/R(550)	0,54	1,13	7	0,96
R(440)/R(550)	0,505	1,269	21	0,978
R(440)/R(550)	0,415	1,795	21	0,941
R(443)/R(550)	0,783	2,12		0,94
R(443)/R(520)	2,009	5,93		0,95
R(443)/R(550)	2,45	3,89	6	0,61
R(443)/R(550)	1,13	1,71	454	
R(443)/R(550)	1,216	2,589		
R(443)/R(550)	1,129	1,711		

56 с, d) и, во вторых, глубина «хлорофильного провала не может быть однозначно связана с $C_{\text{хлф}}$.

Таким образом, становится ясно, что в сложных в гидрооптическом отношении водах, (какими, как правило, являются озерные воды) нужно искать более сложные алгоритмы восстановления $C_{\text{хлф}}$, чем те, что представлены в таблице IX для условий чистых океанских вод.

К такому выводу приводит и хроматический анализ, предпринятый в рамках обсуждаемой работы [131]; если в координатной системе x, y нанести цветности воды при $C_{\text{хлф}}$ и $C_{\text{мв}}$ (варьирующих от 0,05 до 20 мг/м³) (при $C_{\text{РОВ}}=0$), используя при этом обсуждавшиеся выше спектральные значения $R(\lambda)$, то оказывается, что цветовые характеристики вод располагаются внутри некоторой узкой замкнутой фигуры (рис. 57а) и для надежной цветовой индикации $C_{\text{хлф}}$ необходима весьма высокая точность в определении координаты y . При введении в эту оптическую систему РОВ ($C_{\text{РОВ}}=2,0$ гС/м³) (такое значение $C_{\text{РОВ}}$ получено как среднее из измерений *in situ* на оз. Онтарио), фигура, образованная соответствующими локусами такова (рис. 57б), что возникают еще более жесткие,

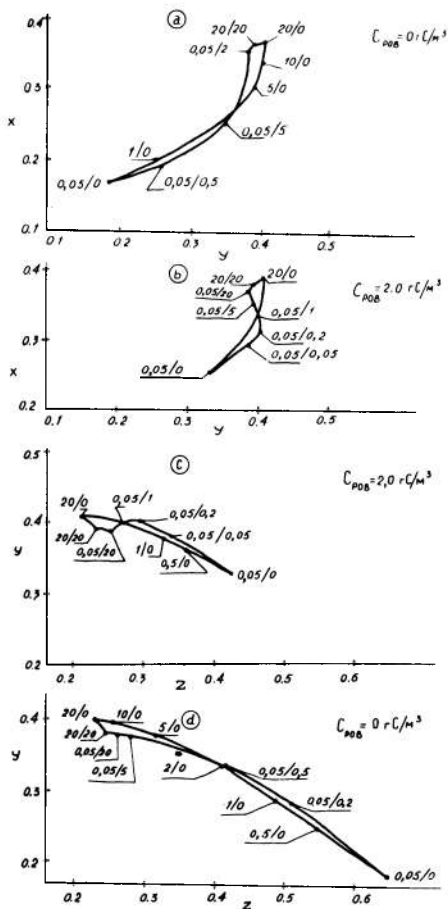


Рис. 57. Локусы зависимостей между хроматическими координатами x , y (2а, б) и y , z (2с, д). Цифры у точек означают $C_{MФ}/C_{MВ}$;

практически едва ли выполнимые требования, к определению координаты y с целью обеспечения нужной точности восстановления $C_{ХлФ}$. Аналогичные результаты получаются и для пары координат y, z (рис. 57 с, d). Практически это означает, что при значительных концентрациях ХлФ и МВ и $C_{РОВ} \geq 20 \text{ гС/м}^3$ (ситуация, часто встречающаяся в озерных водах), хроматический анализ, без привлечения дополнительной информации (например, о $C_{МВ}$ и $C_{РОВ}$ в водах, над которыми осуществляется дистанционный мониторинг), практически не в состоянии обеспечить удовлетворительную точность восстановления $C_{ХлФ}$.

В этой же связи интересно проследить влияние значений $C_{РОВ}$ и $C_{МВ}$ на зависимость координат цветности от $C_{ХлФ}$. Оказывается, что во всех случаях увеличение концентрации МВ уменьшает зависимость x, y, z от $C_{ХлФ}$ и при $C_{МВ} \geq 5,0 \text{ г/м}^3$ все три координаты становятся практически нечувствительными к $C_{ХлФ}$. Следует добавить, что даже при незначительных величинах $C_{МВ}$ чувствительность координат x, y, z к ХлФ становится весьма низкой при $C_{ХлФ} > 8 \div 10 \text{ мг/м}^3$. Наибольшая чувствительность цветовых координат проявляется для вод с относительно небольшими ($< 3 \div 5 \text{ мг/м}^3$) концентрациями ХлФ (при $C_{МВ} \leq 0,5 \text{ г/м}^3$). Это прежде всего относится к координатам x и z ; координата y обнаруживает удовлетворительную чувствительность к ХлФ при $C_{ХлФ} < 5 \text{ мг/м}^3$. Однако восстановление $C_{ХлФ}$ возможно лишь в том случае, если $C_{РОВ}$ определено независимыми измерениями (*in situ*).

Представленные выше результаты расчетов имеют несомненный интерес, однако следует отметить их сугубо модельный характер: в качестве входных параметров авторы использовали (рис. 58) удельные коэффициенты $a^*(\lambda)$, $b^*(\lambda)$, спектральные значения которых были получены осреднением и сглаживанием соответствующих экспериментально определенных величин в водах оз. Онтарио. Кроме того, опираясь на некоторые эмпирические данные, а также, по-видимому, желая упростить расчеты, было принято, что вероятности рассеяния назад постоянны в видимом диапазоне спектра, а значения их равны, соответственно: $V_w = 0,500$; $V_{ХлФ} = 0,011$; $V_{МВ} = 0,080$. В действительности, как свидетельствуют специальные исследования, а также анализ экспериментальных данных, полученных различными авторами, вопрос о спектральных значениях удельных коэффициентов поглощения и рассеяния водных компонентов чрезвычайно сложен. Иллюстрацией этому могут служить результаты экспериментальных определений a^* , b^* и $(Bb)^*$ для фитопланктона. В таблице 10 собраны значения $a^*_{ХлФ}(\lambda)$ полученные в разные годы, различными исследователями и, по крайней мере, в двух случаях определено, для различных представителей ФП.

Данные таблицы X свидетельствуют о значительных (на некоторых длинах волн — почти на порядок величины) различиях в имеющихся оценках величины $a^*_{ХлФ}$. Еще менее удовлетворительно обстоит дело с оценками (к тому же чрезвычайно малочисленными) спектральных значений $b^*(\lambda)$ и $(Bb)^*(\lambda)$. И дело

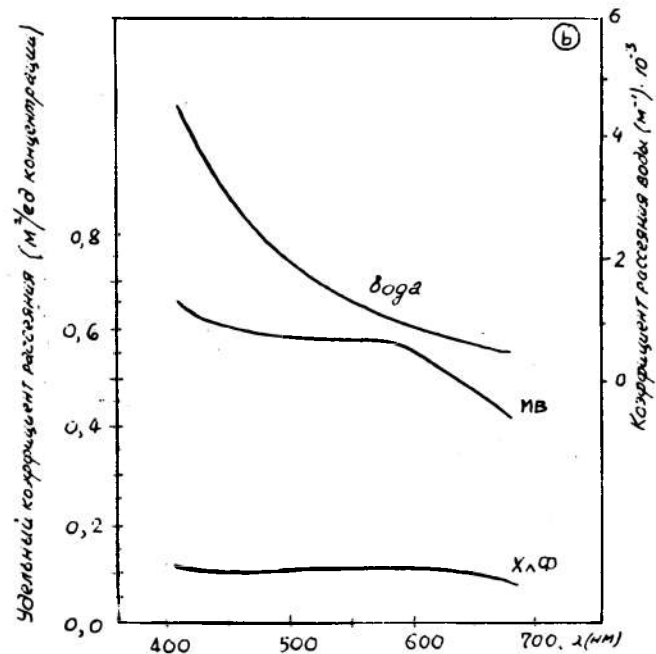
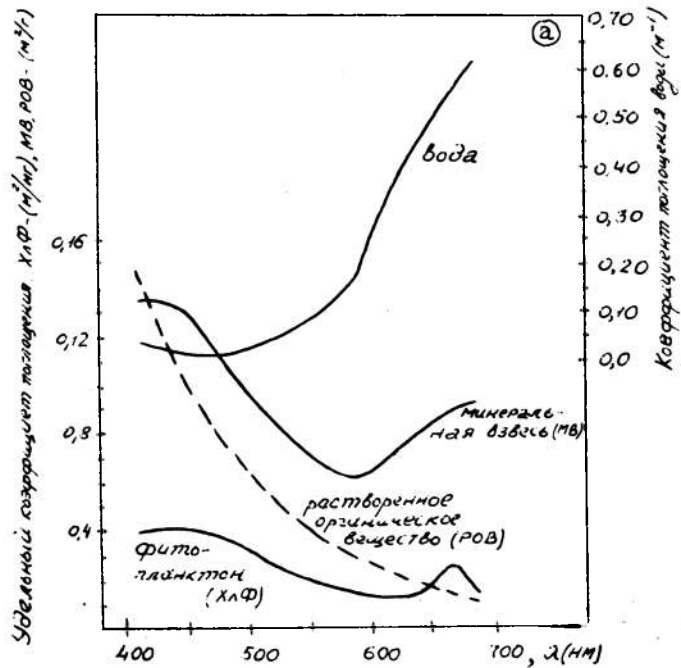


Рис. 58. Модельные спектральные зависимости удельных коэффициентов поглощения и рассеяния для МВ, РОВ и ФП, а также коэффициентов поглощения и рассеяния для чистой воды.

Т а б л и ц а 10

Удельные коэффициенты поглощения ($\text{м}^2/\text{мг}$) ХлФ по оценкам разных авторов [97].

λ , нм	А	Б	B_1	B_2	Г	Д	Е
443	0,0293	0,0253	0,056	0,031	0,082	0,0282	0,0354
520	0,0143	0,0159	0,023	0,012	0,012		0,0240
550	0,0090	0,0102	0,011	0,0074	0,007	0,0159	0,0173
670	0,0113	0,0203	0,0083	0,011	0,025		0,0086

Примечание: Заглавными буквами обозначены следующие литературные источники: А — [133], Б — [129], B_1 — [135], (для *Thalassiosira pseudonana*), B_2 — [135] (для *Monochrysis lutheri*), Г — [136], Д — [137], Е — [97].

здесь не только и не столько в неточностях экспериментов, сколько в объективных причинах. Действительно, разные культуры ФП характеризуются различным содержанием в их клетках универсально присутствующего агента—ХлФ_а [138, 80], качественными и количественным составом дополнительных пигментов (ХлФ_{б,с,д}, каротиноидов, фикобилинов) [70, 76, 139]*, размерами клеток и колониальных форм [68], относительным содержанием детрита среди живых клеток и многими другими показателями. Более того, одна и та же культура, в зависимости от уровня трофии в водоеме, условий освещения, горизонта обитания, гидродинамических и термических условий, момента вегетационного периода и других факторов может характеризоваться показателями весьма отличными от неких «стандартных». Совершенно очевидно, что для столь сложного гидрооптического компонента весьма затруднительно, если вообще возможно, определить универсально-адекватные первичные гидрооптические характеристики. Иллюстрацией к сказанному выше может служить работа [140], в которой исследовались нормированные (т. е. отнесенные к единице внутриклеточной концентрации ХлФ) коэффициенты поглощения $\tilde{\lambda}^*$, рассеяния $\tilde{b}^*$ и рассеяния назад $(\tilde{B}b)^*$ для четырех культур ФП, данные о которых приведены в таблице 11.

Как видно из рис. 59 отличия в величинах нормированных коэффициентов $\tilde{a}^*$, $\tilde{b}^*$ и $(\tilde{B}b)^*$ для четырех изучаемых культур ФП оказываются значительными во всем диапазоне длин волн видимого участка спектра, однако, в наибольшей мере это проявляется при коротких λ . Опираясь на данные таблицы XI, можно с уверенностью полагать, что обнаруженные отличия должны объясняться характерными размерами клеток исследовавшихся культур и присутствием им сочетанием пигментов в хлоропластах. Важно также отметить явное непостоянство по спектру величины вероятности рассеяния назад — $(\tilde{B}b)^*$ для всех четырех видов ФП (что следует из непараллельности спектральных кривых $b^*(\lambda)$ и $(Bb)^*(\lambda)$ для каж-

* По данным [93] поглощение дополнительными пигментами может быть сравнимым с поглощением ХлФ_а.

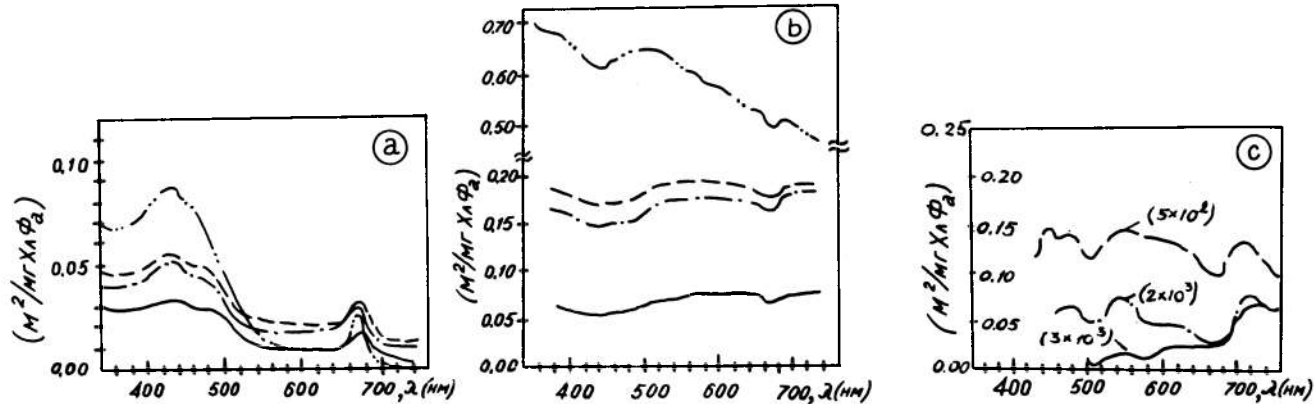


Рис. 59. Спектральные нормализованные значения коэффициентов поглощения $\tilde{a}^*$ (4a), рассеяния $\tilde{b}^*$ (4b) и рассеяния назад $\tilde{Bb}^*$ (4c) для *Hymenomonas elongata* (—), *Tetraselmis maculata* (— · —), *Platymonas* sp. (— — —) и *Coccolithus huxleyi* (— · · —).

Таблица 11

Некоторые характеристики культур ФП, исследовавшихся в работе [140].

d — средний эквивалентный диаметр клеток культур, k — мнимая часть комплексного показателя преломления вещества клетки,

C_i — внутриклеточная концентрация ХлФ_а.

Культура	Возраст (дни)	Концентрация пигментов мг/м ³				Процентное содержание феопигмента и каротиноидов (относительно суммарного содержания ХлФ _а и Рхе _а)		d (мкм)	$C_i \cdot 10^6$ (мг ХлФ _а /м ³)	k	
		$C_{ХлФ_а}$	$C_{ХлФ_б}$	$C_{ХлФ_с}$	$C_{карот.}$					$\lambda=435 \text{ нм}$	$\lambda=600 \text{ нм}$
<i>Euglenomonas elong.</i>	19	408,5	—	56,5	532,2	6,0	120	$12,0 < d < 15,1$	2,94	0,00528	0,0009
<i>Plaiymonas sp.</i>	10	624,4	297,8	—	661,6	3,9	102	$6,0 < d < 7,5$	1,87	0,00392	0,0015
<i>Tetraselmis macul.</i>	4	466,5	231,2	—	434,7	0	93	$7,5 < d < 9,5$	1,62	0,00324	0,0011
<i>Coccolithus huxleyi</i>	7	89,6	—	53,4	129,2	5,8	136	$3,0 < d < 3,8$	1,14	0,00300	0,0004

дой из культур, (рис. 59b, c). Наконец, из рис. 59 можно видеть, что рассеяние (в том числе и рассеяние назад) такими поглощающими частицами, как клетки ФП, характеризуются отчетливой селективностью: в областях полос поглощения света пигментами наблюдается снижение величин b^* и $(Bb)^*$. Отметим, что эффект подавления рассеяния вблизи полос поглощения был предсказан и теоретически обоснован ранее в ряде работ [141—143].

В свете высказанных выше соображений и обсуждавшихся экспериментальных данных [140] о поглощающих и рассеивающих свойствах окрашенных клеток ФП становится очевидной исключительная сложность этого вопроса. Биоценозы естественных водоемов характеризуются, как правило, большим разнообразием форм ФП, среди которых некоторые на определенный период оказываются доминирующими, чтобы затем уступить эту роль другим. Очевидно, что в такой ситуации коэффициенты $a_{ФП}^*$, $b_{ФП}^*$ и $(Bb)_{ФП}^*$ даже при соответствующих осреднениях едва ли могут считаться постоянными по времени и пространству водоема. По крайней мере этот вопрос остается открытым и требует дальнейшего изучения. Это в равной мере относится и к другим компонентам естественных вод — МВ и НОВ, характеризующимся, подобно ФП, большим разнообразием форм частиц, их химического состава и размеров, а также — РОВ. И лишь только относительно a_w , b_w можно сказать, что их спектральные значения известны в настоящее время достаточно хорошо [93].

Вернемся, однако, к вопросу об обосновании алгоритма восстановления содержания хлорофилла в оптически сложных водах. Поскольку в такой гидрооптической ситуации на величину $R(O, \lambda)$ в видимом диапазоне спектра оказывают влияние все без исключения из упомянутых выше компонентов природных вод, отношение $R(O, \lambda_i)/R(O, \lambda_j)$ не может быть однозначно связано с концентрацией ХлФ и возникает необходимость учета «вклада» МВ, НОВ,

РОВ. Иными словами, речь идет об установлении столь сложных многомерных зависимостей, что применение их в практике дистанционного зондирования становится проблематичным. В работе [97] была сделана попытка упростить задачу: основываясь на статистически значимых данных измерений *in situ* на оз. Онтарио, авторы приняли, что $C_{\text{нов}} = 10\% C_{\text{хлф}}$, а $C_{\text{ров}} = 2.16 \text{ гС/м}^3$. Для таких

условий были рассчитаны (на основе формулы (35) и значений удельных коэффициентов поглощения и рассеяния, таблица 12, полученных экспериментально для вод того же озера) зависимость отношений * $R(0,550)/R(0,670)$, $R(0,520)/R(0,670)$, $R(0,520)/R(0,670)$, $R(0,443)/R(0,670)$, $R(0,443)/R(0,520)$, $R(0,520)/R(0,550)$ от содержания ХлФ и МВ ($C_{\text{хлф}}$ и $C_{\text{мв}}$ варьировались, соответственно в диапазонах $0 \div 20 \text{ мг/м}^3$ и $0-10 \text{ г/м}^3$). Из исследованных отношений наибольшую чувствительность к изменениям $C_{\text{хлф}}$ (при $C_{\text{мв}}=0$) обнаружили три пары, хотя с увеличением $C_{\text{мв}}$ от 0 до 10 г/м^3 чувствительность к вариациям $C_{\text{хлф}}$ падает (что находится в согласии с результатами обсуждавшихся выше модельных расчетов [131]). Тем не менее эти три пары отношений были признаны наиболее перспективными с точки зрения дистанционной индикации ХлФ и для них были построены двойные изоплеты вида $R(O, \lambda_i) = f[R(O, \lambda_j)]$ при $C_{\text{хлв}}$ и $C_{\text{мв}}$, варьирующих в указанных выше пределах. Анализ изоплет (рис. 60) показывает, что, во-первых, при одновременно малых концентрациях ХлФ и МВ абсолютные значения $R(O, \lambda_i)$ и $R(O, \lambda_j)$ не превосходят нескольких процентов и их чувствительность к изменениям $C_{\text{хлф}}$ и $C_{\text{мв}}$ в этом диапазоне концентраций ХлФ и МВ невелика, и, во-вторых, из трех парных зависимостей, наибольшей чувствительностью к изменениям $C_{\text{хлф}}$ и $C_{\text{мв}}$ в области значений концентраций, характерных для озерных вод, обладает пара $R(0,520) - R(0,670)$ (рис. 60 с).

Ввиду низких абсолютных значений $R(O, \lambda)$ в водах с небольшим содержанием органической и минеральной взвеси и усиления потока диффузно рассеянной солнечной радиации замутненными

* Выбор длин волн определялся спектральными каналами сканера цвета береговой береговой зоны (СЦБЗ), установленного на борту Nimbus-7, для которого и разрабатывалась методика дистанционного восстановления ХлФ.

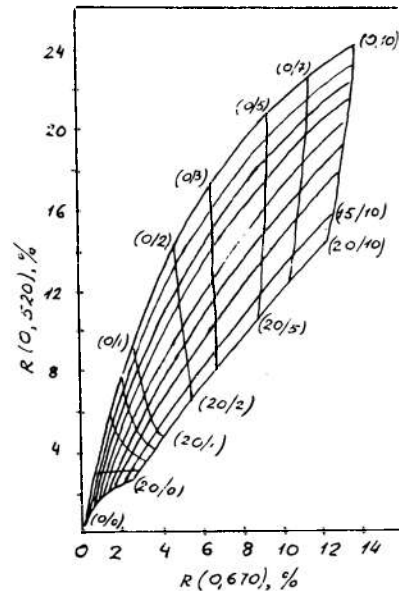
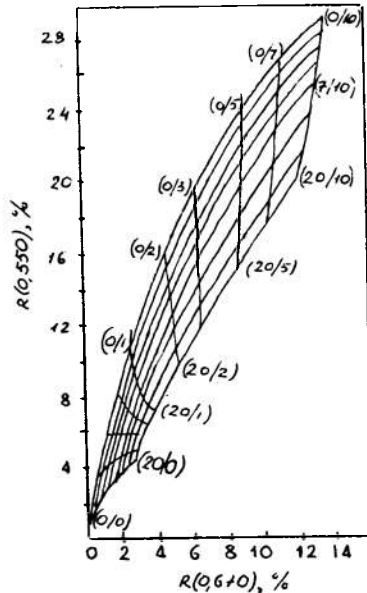
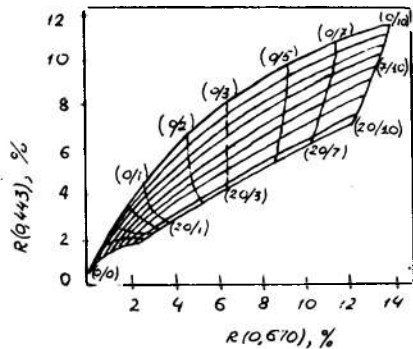


Рис. 60. Зависимости между $R(0,443)$ и $R(0,670)$ (5а), $R(0,550)$ и $R(0,670)$ (5б) и $R(0,620)$ и $R(0,670)$ (5с) в функции концентрации Хлф_а и МВ (в скобках первая цифра характеризует $C_{\text{Хлф}_a}$ (мг/м³), а вторая — $C_{\text{МВ}}$ (г/м³)).

водами, авторы пришли к нетрадиционному заключению, что индикация ХлФ, равно как и МВ, по предложенной методике предпочтительна (особенно с высоколетящих носителей) в условиях мутных вод.

Сравнение фактически измеренных *in situ* $C_{\text{ХлФ}}$ со значениями $C_{\text{ХлФ}}$, восстановленными с использованием двойных изоплет (рис. 60), показало, что наилучший результат (для 5-ти компонентной модели вод оз. Онтарио) получен при использовании каналов 443, 520 и 670 нм (ошибка восстановления не превышала 10%). Авторы обсуждаемой работы считают, что предложенный ими алгоритм может быть использован для мониторинга большинства озерных вод: для его применения необходимо лишь знание априорных значений $C_{\text{РОВ}}$ и $C_{\text{НОВ}}/C_{\text{ХлФ}}$, характерных для конкретного водоема. При этом имеется в виду, что спектральные удельные коэффициенты a^* , b^* , $(Bb)^*$, приведенные в таблице 12, репрезентативны для широкого класса озерных вод. Разумеется, лишь экспериментальная проверка может подтвердить справедливость такого мнения.

Т а б л и ц а 12

Удельные показатели поглощения, рассеяния и рассеяния назад основных оптически активных компонентов вод озера Онтарио.

λ (нм)	$a_{\text{ХлФ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{мг}$)	$a_{\text{МВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$a_{\text{НОВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$a_{\text{Н}_2\text{O}+\text{РОВ}}^*$ (м^{-1})
443	0,0354	0,0557	0,0272	0,177
520	0,0240	0,0281	0,0206	0,113
550	0,0173	0,0188	0,00098	0,122
670	0,0100	0,0225	0,0	0,379
λ (нм)	$b_{\text{ХлФ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{мг}$)	$b_{\text{МВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$b_{\text{НОВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$b_{\text{Н}_2\text{O}-\text{РОВ}}^*$ (м^{-1})
443	0,128	0,682	0,398	0,230
520	0,127	0,650	0,363	0,168
550	0,128	0,643	0,354	0,151
670	0,104	0,512	0,290	0,404
λ (нм)	$(Bb)_{\text{ХлФ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{мг}$)	$(Bb)_{\text{МВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$(Bb)_{\text{НОВ}}^*$ ($\text{м}^2/\text{г}$)	$(Bb)_{\text{Н}_2\text{O}+\text{РОВ}}^*$ (м^{-1})
443	0,00199	0,0328	0,00900	—0,00156
520	0,00182	0,0474	0,00756	—0,00796
550	0,00241	0,0525	0,00972	—0,0128
670	0,00175	0,0333	0,00472	—0,00936

Рассмотренные выше подходы к созданию алгоритмов дистанционного восстановления ХлФ характеризуются существенными упрощениями истинной физической картины, реализующейся в естественных водоемах. Частично этот аспект уже затрагивался при обсуждении вопроса об удельных коэффициентах рассеяния и поглощения ФП. Помимо этого следует особо отметить неучет в этих моделях вариаций концентраций основных оптически активных компонентов — ХлФ, РОВ, МВ — по глубине водоемов. Между тем, измерения *in situ* свидетельствуют о том, что реальные вертикальные профили $C_{\text{ХлФ}}$, $C_{\text{РОВ}}$, $C_{\text{МВ}}$ обнаруживают сложную и изменчивую структуру [69, 93, 117]. Можно предположить, что как интенсивность, так и спектральный состав диффузно-отраженного солнечного излучения, исходящего из водной толщи, должны зависеть не только от общего содержания компонентов, но и их вертикальной стратификации. Имеются как косвенные [103, 144], так и прямые [145, 146] экспериментальные тому подтверждения.

Теоретическому рассмотрению этого вопроса посвящено довольно много исследований [65, 147—150]. Так в работах [149, 150] получены выражения, связывающие вертикальные распределения гидрооптических характеристик среды с $R(O, \lambda)$. Однако, нам не известны экспериментальные работы, в которых было осуществлено реальное восстановление распределения концентраций оптически активных компонентов с глубиной по наблюдаемой яркости света, диффузно-отраженного водной средой в атмосферу. Более того, согласно [148], методами дистанционного зондирования концентрация распределенной по глубине компоненты $C(z)$ может быть восстановлена лишь как некоторая средне-взвешенная величина $\bar{C}$:

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{z_{90}} C(z) g(z) dz}{g(z)}, \quad (38)$$

где $g(z) = \exp[-2 \int^z K(z') dz']$; z_{90} — глубина проникновения в воду солнечных лучей при их нормальном падении на поверхность раздела вод, $K(z')$ — вертикальный коэффициент ослабления освещенности в воде. Авторы отмечают, что согласно (38) дистанционно получаемая величина $\bar{C}$ в значительной мере определяется концентрацией компонента в приповерхностном слое. Как можно видеть, в этом вопросе еще нет достаточной ясности и поэтому предстоят дополнительные работы как теоретического, так и практического характера.

Подытоживая сказанное выше, необходимо подчеркнуть следующие особенности методики восстановления концентрации ХлФ по яркости диффузно отраженного толщей моря солнечного света:

1. Методика позволяет судить лишь о концентрации ХлФ, но не о его флористической принадлежности (т. е. это существенно нетаксономическая методика);

2. Восстановленная таким методом $C_{\text{ХлФ}}$, хотя и является осредненной по z_{90} величиной, по-видимому, в значительной мере отра-

жает $C_{\text{ХлФ}}$ у поверхности водоема и пока не имеется возможности восстанавливать вертикальный (глубинный) профиль $C_{\text{ХлФ}}$;

3. Применение обсуждаемой методики для мониторинга сложных в оптическом отношении вод требует задания априорной информации о средних по водоему концентрациях РОВ и относительной концентрации НОВ — $C_{\text{НОВ}}/C_{\text{ХлФ}}$;

4. Учитывая, что для типичных гидрооптических условий в естественных водоемах величина $R(O, \lambda)$ не превышает 10—15%, восстановление $C_{\text{ХлФ}}$ по спектру диффузно-отраженной толщей воды солнечной радиации наиболее предпочтительно производить в малооблачную погоду при малых углах Солнца *;

5. Хотя расчеты поля видимого излучения, выходящего из водоема, и свидетельствуют о том, что величина $R(o, \lambda)$, при фиксированном зенитном угле Солнца Θ существенно растет к горизонту (особенно в азимутальных направлениях, близких к плоскости солнечного вертикала, см. рис. 61 [151]), однако, поскольку при этом интересующая нас информация об оптически активных компонентах поступает с водных слоев все более и более близко расположенных к поверхности, очевидно, что целесообразно поступиться энергетикой полезного сигнала ради повышения его информативности. Отсюда с необходимостью следует, что углы визирования радиометром поверхности водоема должны быть невелики.

Наконец, следует отметить, что эффективность применения обсуждаемой методики весьма существенным образом зависит от состояния поверхности: она значительно снижается при волнении (что особенно проявляется при наличии «солнечной дорожки»), появлении пенных образований («барашков», пенных полос), поверхностно-активных пленок и т. д.

В свете вышесказанного возникает вопрос, не существует ли какой-либо иной, альтернативной или дополняющей первую, методики, которая позволила бы расширить возможности дистанционного зондирования ФП?

В последнее время, в этой связи, все больше внимания привлекает флуоресцентный метод индикации ХлФ.

Примечательной особенностью пигментов ФП является их спо-

* Хотя с увеличением зенитного угла Солнца Θ величина $R(O)$ растет (и это возрастание, согласно [152], может быть параметризовано зависимостью вида $R(O) = (0,975 - 0,629 \mu_0) (Bb) \cdot a^{-1}$, где μ_0 — косинус угла падения фотонов сразу под поверхностью водоема), регистрируемая при дистанционных наблюдениях в надир яркость радиации B_w , диффузно рассеянной толщей воды, пропорциональна не только $R(O)$, но и суммарной освещенности сверху поверхности воды [153]:

$$B_w = R(O) (1 - \rho) E_0 / \pi p^2 (1 - 0,48 R(O)) \quad (39)$$

(здесь ρ — френелевский коэффициент отражения для надирного угла визирования, p — коэффициент преломления воды относительно воздуха). Поскольку даже при отношении $(Bb/a) = 0,3$ увеличение $R(O)$ с Θ ($0^\circ < \Theta < 50^\circ$) не превышает 1%, то очевидно, что зависимость B_w от Θ будет прежде всего определяться $E_0(\Theta)$, которая для указанной в п. 4 «оптической» погоды, максимальна при малых зенитных углах Солнца [154].

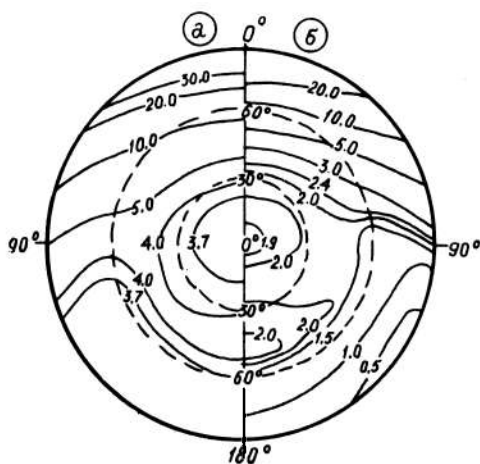


Рис. 61. Полярная диаграмма $R(0,565)$ для океанических условий (в Вт/м²стер мкм) для зенитного угла Солнца $\theta = 50, 7^\circ$ а) вода содержит ФП и МВ ($a+b=0,2 \text{ м}^{-1}$) б) вода содержит ФП ($a+b=0,2 \text{ м}^{-1}$)

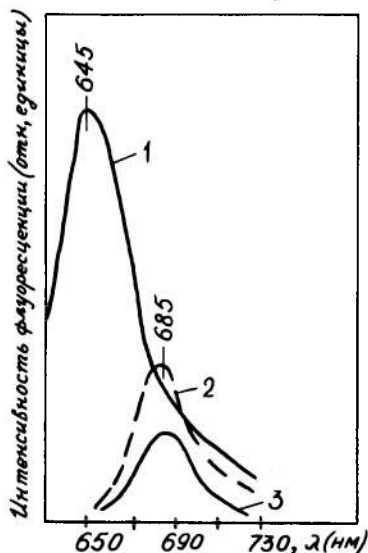


Рис. 62. Зависимость положения и интенсивности максимума флуоресценции ФП in vivo от его флористической принадлежности 1 — синезеленые; 2 — зеленые; 3 — диатомовые водоросли.

способность, поглощая солнечный свет, флуоресцировать. В зависимости от сочетания пигментов, различные представители ФП обнаруживают характерный эмиссионный спектр (рис. 62).

В полевых условиях проявление естественной флуоресценции ФП в спектрах $R(O, \lambda)$ было обнаружено по полосе при 685 нм [129, 125]. Теоретическое обоснование возможности отнесения возрастания интенсивности $R(O)$ при $\lambda = 685$ за счет флуоресценции ФП было предпринято в работе [156]. Автор рассматривал акт флуоресценции как неупругое рассеяние фотонов, длины волн которых лежат в полосе возбуждения с центром при λ_E и шириной $\Delta\lambda_E$. Вводя в рассмотрение малый объем ΔV флуоресцирующего вещества, в котором естественным освещением создана энергетическая облученность $H(\lambda_E)$ Вт/м²нм, и обозначая через $\tau(\theta, \lambda_F)$ (Вт/стер нм) интенсивность флуоресцентного излучения, наблюдаемого в телесном угле Ω под углом θ к направлению распространения потока возбуждающего излучения Гордон [156] параметризует коэффициент флуоресценции $\Phi(\lambda_E, \lambda_F)$ ($\text{м}^{-1} \text{нм}^{-1}$) следующим соотношением:

$$\Phi(\lambda_E, \lambda_F) = \int_{\Omega} \frac{\Delta \lambda_F \int_{\Delta \lambda_E} I(\Theta, \lambda_F) d\lambda_F}{\Delta V \int H(\lambda_E) d\lambda_E} d\Omega. \quad (40)$$

В таком случае квантовый выход флуоресценции может быть представлен в виде отношения:

$$\eta(\lambda_F, \lambda_E) = \lambda_F / \lambda_E \cdot \Phi(\lambda_F, \lambda_E) / a(\lambda_E) \cdot \Delta \lambda_F \quad (41)$$

где $a(\lambda_E)$ — коэффициент поглощения возбуждающего излучения с $\lambda = \lambda_E$ флуоресцирующим веществом в заданном объеме ΔV .

Поскольку интенсивность полосы флуоресценции ФП в спектре $R(O, \lambda)$ должна быть прямо пропорциональна величине η , принципиальным вопросом оказывается оценка тех значений η , при которых, по спектру $R(O, \lambda)$ возможно зарегистрировать флуоресценцию ФП. Оказалось, что экспериментально наблюдаемые в спектрах $R(O, \lambda)$ интенсивности полосы при 685 нм могут быть объяснены в рамках предложенной Гордоном параметризации, если принять $\eta = 0,7 \div 0,8\%$. Эти значения η не только не превосходят, но даже ниже тех, что были получены в лабораторных условиях при измерениях *in vivo* квантового выхода флуоресценции ХлФ_а в различных культурах ФП. Так по данным [157] среднее значение для образцов различных представителей ФП составило 5%. Таким образом, согласно Гордону, полоса при 685 нм в спектре $R(O, \lambda)$ может быть с большой долей уверенности отнесена за счет флуоресценции ХлФ_а. Отсюда с необходимостью следовало, что возрастание величины $R(O)$ при 685 нм возможно использовать в целях дистанционного зондирования ФП. В этой связи были сделаны оценки глубины Z_{90} с которой 90% неупруго рассеянной (высвеченной ХлФ_а) радиации достигает поверхности океана [158].

Оказалось, что глубина проникновения Z_{90} излучения с $\lambda = 685$ нм для концентрации ХлФ_а (вместе с феопигментами) $C_2 = 0-5$ мг/м³ составляет около 3 м, а при $C_2 = 10$ мг/м³ $Z_{90} = 2$ м. Были также выполнены измерения уходящего с водного горизонта излучения в диапазоне длин волн 380—750 нм на глубинах 1, 6, 11 м в условиях безоблачного неба. Измерения позволили установить связь между естественной флуоресценцией *in vivo* ФП на длине волны 685 нм и $C_{ХлФ_а}$ для вод типа 1* по классификации Мореля и Приёра [129]. При значительном содержании ХлФ_а в воде** интенсивность полосы флуоресценции на горизонте z оказалась нелинейно связанной с $C_{ХлФ_а}$:

$$I_z / E_z = A [C_{ХлФ_а}(z)]^B, \quad (42)$$

где E_z общая облученность горизонта z сверху, A и B — постоянные коэффициенты.

* Т. е. вод, первичные гидрооптические характеристики которых в основном определяются присутствием ФП (и детрита).

** При малых $C_{ХлФ_а}$ зависимость (42) не выполняется.

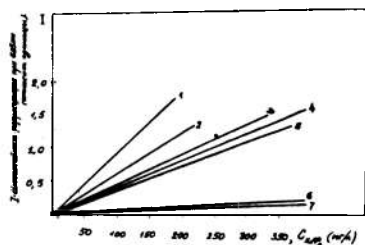


Рис. 63. Зависимость интенсивности полосы флуоресценции при 685 нм от $C_{chl a}$ для различных культур ФП.

1 — *Gyrosigma*, 2 — *Phaeodactylum*, 3 — *Selenastrum*, 4 — *Chlorella*, 5 — *Scenedesmus*; 6 — *Nostoc*, 7 — *Anabaena*.

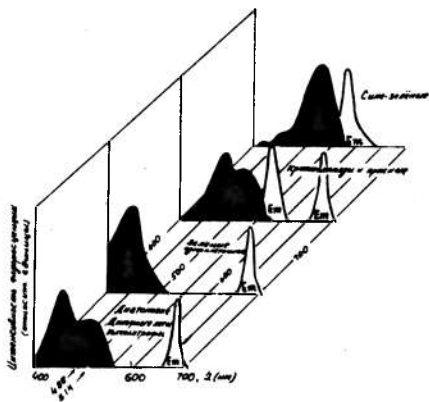


Рис. 64. Спектры поглощения и флуоресценции основных океанических групп ФП. (Ех — возбуждение, Ем — эмиссия).

В [159] сообщается о попытке использования интенсивности флуоресцентной полосы ХлФ_а при 685 нм для количественной оценки дистанционными методами содержания ХлФ_а в воде. Спектр радиации от поверхности воды регистрировался в диапазоне 400—800 нм с высоты 3 м. На каждой станции определялся вертикальный профиль $C_{\text{ХлФ}_a}$ и вычислялась средневзвешенная (эффективная) концентрация ХлФ_а. Затем искалась корреляция между $C_{\text{эф ХлФ}_a}$ и интенсивностью полосы при 685 нм. В отличие от результатов предыдущей работы эта связь оказалась линейной. Автор считает, что метод обладает удовлетворительной чувствительностью при $C_{\text{эф ХлФ}_a} \geq 1 \text{ мг/м}^3$.

Представляется, что к результатам упомянутых работ следует подходить с осторожностью. Как можно было видеть на рисунке 60, интенсивность полосы флуоресценции при 685 нм обнаруживает явную изменчивость в зависимости от флористической принадлежности ФП. Это еще более отчетливо следует из рис. 63 [80]. Можно ожидать, что в естественных условиях с разнообразными и изменчивыми в пространстве и во времени флористическими композициями популяций ФП в водоемах, зависимость интенсивности флуоресценции ФП (оцениваемой исключительно по интенсивности полосы при $\lambda=685 \text{ нм}$) от $C_{\text{ХлФ}_a}$, установленная для какой-либо конкретной ситуации, едва ли может быть универсально репрезентативна*.

Внимательное изучение спектров возбуждения флуоресценции ХлФ_а в ФП показало [161—162], что определенным флористическим группам водорослей можно соотнести вполне определенную спектральную кривую возбуждения (рис. 64). Различия в спектрах возбуждения объясняются наличием в ПС** клеток ФП специфических пигментов. Так например, наличие фукоксантина в диатомовых или перидинина в динофлагелятах обуславливает возбуждение флуоресценции ХлФ_а не только излучением с $\lambda=450 \text{ нм}$, но и с $\lambda=525\text{—}530 \text{ нм}$. Отсутствие каротиноидо-протеинового комплекса у зеленых приводит к тому, что спектр возбуждения сужается до одной полосы при 450 нм. Многие, в особенности океанические, представители ФП содержат в ПС фикобилины, поглощающие излучение в районе 500 нм и флуоресцирующие в довольно широкой полосе с центром при 560—580 нм.

Таким образом, спектр излучения ФП, в зависимости от его флористической принадлежности, может быть представлен либо одной полосой (при 685 нм или 560—580 нм), либо — двумя (при 685 нм и 560—580 нм) (рис. 64). Указанное различие в эмиссионных спектрах ФП разных форм в принципе позволяет разработать такую методику дистанционной индикации ФП, которая позволяет осуществлять диагностику принадлежности ФП обследуемого водоема к тем или иным группам (например, группам представите-

* К этому следует добавить, что интенсивность флуоресценции ХлФ_а, как указывается в [160] существенно зависит от физиологического состояния клетки ФП, определяемого уровнем трофики в водоеме и условиями освещения.

* ПС-пигментная система.

Таблица 13

Наблюдаемые полосы флуоресценции у различных групп ФП [162]

Группа ФП	Дополнительные (к ХлФ _а) пигменты	Наличие в спектре полосы флуоресценции при		1 (530,685) 1 (450,685)
		685нм	560— 580 нм	
Диатомовые	ХлФ _с , фукоксатин	да	нет	0,8—0,9
Динофлагелляты (перидиней)	ХлФ _с , перидинин	да	нет	0,7—0,8
Кокколитофориды	ХлФ _с , НКК*	да	нет	0,3—0,4
Золотисто- коричневые одноклеточные	ХлФ _с , НКК*	да	нет	0,3—0,4
Зеленые одноклеточные	ХлФ _б	да	нет	0,1—0,2
Криптомонады	ХлФ _с , фикоцианин, фикоэритрин	да	нет	0,1—0,8
Цианобактерии	—, фикоцианин, фикоэритрин	нет**	да	—

* НКК — неидентифицированный каротиноидный комплекс

** не наблюдается у молодых морских культур; у старых культур регистрируется слабое излучение на этой длине волны.

лей ФП содержащим или не содержащим фикобилины, таблица XIII).

Интересно отметить, что согласно [162], одновременный анализ спектров возбуждения, флуоресценции, а также распределения по размерам ФП в заливе Бусбей (Майн, США) привел к выводу о том, что флуоресцентная полоса при 560—580 нм обнаруживалась исключительно в отфильтрованных пробах, содержащих частицы ФП с размерами ~ 10 мкм.

Такие, пусть и весьма ограниченные, таксономические и аллометрические возможности флуоресцентного метода, по мнению авторов [162], могут лечь в основу экспрессной, по крайней мере контактной, диагностики водных масс. Что касается применения естественной флуоресценции ФП для его дистанционной (пассивной) индикации, то здесь следует признать малую перспективность данного подхода *. Причин тому несколько. Прежде всего в спектре $R(O, \lambda)$ до сих пор уверенно наблюдалась лишь полоса при 685 нм,

* Существует и иная точка зрения по этому вопросу. В работах [163—164] высказывается мнение, что при соответствующих технических усовершенствованиях приемной аппаратуры, мониторинг ФП, основанный на регистрации естественной флуоресценции ФП, можно будет осуществлять даже с борта орбитального космического аппарата.

причем ее относительная интенсивность не превышала 1% [129] и как отмечалось выше, она может нести информацию лишь о существенно поверхностном слое воды. В связи с этим уместно напомнить о тех неопределенностях, которые возникают при попытках найти корреляцию между $I(685)$ и $S_{\text{хлф}}$. Наблюдения эмиссионной полосы при 560—580 нм в слабо структурированном спектре $R(O, \lambda)$ (или $B_w(\lambda)$) весьма затруднительно: помимо процессов рассеяния и поглощения многочисленными оптически активными компонентами естественных вод, формирующих спектр $R(O, \lambda)$ определенную роль могут играть и эмиссии, обусловленные флуоресценцией не только ФП, но и РОВ, а также нефтяных slickов (если, разумеется, таковые присутствуют)*. Действительно, согласно [93] флуоресценция РОВ** в морской воде возбуждается не только ультрафиолетовыми, но и видимым излучением. В частности, полосы флуоресценции РОВ, возбуждаемые излучением с $\lambda = 312, 365$, и 436 нм имеют максимумы при $\sim 415, 450$ и 520 нм, соответственно, а их полуширины составляют 140—160 нм. В работе [165] сообщается о том, что излучение с длинами волн в диапазоне 308—420 нм вызывает флуоресцентное свечение нефтяных пленок (толщиной Δ от 0,01 мкм до 1 мм), характеризующееся широкими эмиссионными полосами***, которые в совокупности перекрывают широкую спектральную область от 400 до 600—650 нм и имеют максимумы при 400, 450, 550 и ~ 620 нм (отметим, что квантовый выход флуоресценции варьировал для разных $\lambda_{\text{возб}}$ от 6 до 55%).

В последнем столбце таблицы 13 приведены значения отношений интенсивностей полос флуоресценции ФП при 685 нм, возбужденные излучением с $\lambda = 450$ нм и $\lambda = 530$ нм. Из этих данных можно видеть, что указанное отношение может быть в принципе использовано для усовершенствования таксономической функции флуориметрического метода. Однако осуществление этой задачи возможно лишь с использованием лазерной техники, т. е. путем активного зондирования. Именно с ним, в последнее время, связываются большие надежды в развитии дистанционных методов индикации ФП. Остановимся кратко на методической стороне этого типа зондирования (без учета влияния атмосферы).

Фотоны когерентного лазерного излучения при прохождении через водную среду испытывают со стороны последней поглощение и рассеяние, причем рассеяние обусловлено тремя механизмами: упругим и неупругим рассеянием на молекулах воды и, в общем случае, на растворенных в ней веществах (подобное рассеяние называют, соответственно, релеевским и рамановским или комби-

* Что, кстати сказать, лишний раз свидетельствует о сложности интерпретации спектров $R(O, \lambda)$ и $B_w(\lambda)$ с целью восстановления по ним $S_{\text{хлф}}$.

** Флуоресцируют, по-видимому, преимущественно низко- и средне-молекулярные фракции РОВ [93].

*** Интенсивность флуоресценции почти линейно растет с увеличением толщины пленки вплоть до значений $\Delta = 10^{-5}$ м; при больших Δ наступает насыщение.

национным рассеянием), а также упругим рассеянием на гидрозоле (рассеяние Ми). Согласно [103], из трех упомянутых видов рассеяния самый слабый эффект производит релеевское рассеяние.

Введем следующие обозначения: z — расстояние от флуориметра до поверхности воды (м); m — коэффициент преломления воды; C_L, C_R, C_F — эффективные коэффициенты ослабления (m^{-1}) для, соответственно, лазерного излучения; комбинационно рассеяного света (КР) и флуоресцентного излучения; N_M, N_R, N_F — концентрации в воде агентов, обуславливающих, соответственно, рассеяние Ми (РМи), КР и флуоресценцию (m^{-3}); σ_M, σ_R — сечения рассеяния Ми и Кр (m^2); σ_F — сечение флуоресценции (m^2); K_1, K_2, K_3 — спектральные коэффициенты, учитывающие излучаемую лазером мощность, инструментальные параметры и отражательные свойства водной поверхности для, соответственно, РМи, КР и флуоресцентного излучения.

Мощность сигнала, воспринимаемого дистанционным флуориметром, равна сумме основных составляющих P_R, P_M, P_F , представляющих собой монотонности световых потоков, обусловленные КР, РМи и флуоресценцией. Согласно [166], эти составляющие могут быть описаны следующими формулами:

$$\begin{aligned} R_R &= (K_2/m^2 z^2) (N_R \sigma_R / C_L + C_R) \\ P_M &= (K_1/m^2 z^2) (N_M \sigma_M / 2 C_L) \\ P_F &= (K_3/m^2 z^2) (N_F \sigma_F / C_L + C_F) \end{aligned} \quad (43)$$

Как можно видеть из (43), P_R помимо зависимости от K_2 , полностью определяется оптическими свойствами воды, как таковой, в точке зондирования, в то время как P_M, P_F зависят, соответственно, от K_1, K_2 и концентрации гидрозоля и флуоресцирующего вещества. Для расчета P_F необходимо, кроме того, знание величины C_F . Все это весьма осложняет задачу оценки сигнала от флуоресцирующего агента. Однако, ввиду того, что было сказано о P_R , возможно использовать [167] рамановскую составляющую регистрируемого сигнала как нормализующий фактор, т. е. рассматривать не сами величины P_M, P_F , а следующие соотношения:

$$\begin{aligned} (P_M/P_R) &= K_4 [(N_M \cdot \sigma_M) / (N_R \cdot \sigma_R)] [(C_L + C_R) / 2 C_L] \\ (P_F/P_R) &= K_5 [(N_F \cdot \sigma_F) / (N_R \cdot \sigma_R)] [(C_L + C_R) / (C_L + C_F)] \end{aligned} \quad (44)$$

где $K_4 = K_1/K_2$; $K_5 = K_3/K_2$

Таким образом, появляется возможность оценивать мощность сигналов P_M и P_F в долях P_R — своеобразного внутреннего «репера»,

Кроме того, отношения (44) удобны и потому, что они уже не зависят от мощности лазера, высоты прибора над поверхностью воды, а также в значительной мере и от параметров аппаратуры.

В работах [166—171] сообщается об экспериментальной проверке выполнимости соотношений (44) и апробации этой методики в лабораторных и полевых условиях. На рис. 65 приведены полученные спектры сигналов, зарегистрированные от двух возбуждаю-

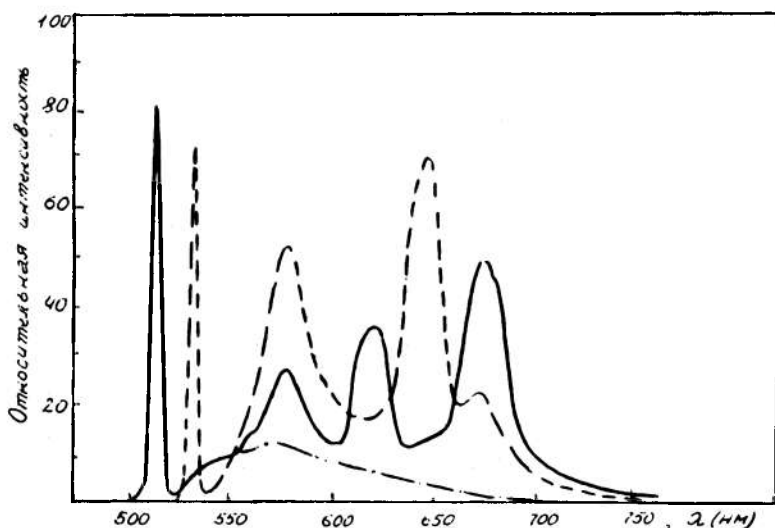


Рис. 65. Спектры сигналов, воспринимаемые дистанционным флуориметром при облучении водной поверхности лазерным излучением с $\lambda=514,5$ нм (—) и $\lambda=532,0$ нм (---). —·— спектр выделенного сигнала, обусловленного флуоресценцией растворенных органических веществ.

щих излучений. Отчетливо проявляются полосы флуоресценции при 580 и 685 нм, которые, как следует из сказанного выше, принадлежат, соответственно, фикоэритрину и ХлФ_а. Кроме того имеются полосы, обусловленные РМи и КР, а также широкая несимметричная полоса флуоресценции РОВ, проявляющаяся в виде плеча при $\sim 530-540$ нм (ее максимум для $\lambda_{\text{возб}}=514,5$ нм находится, по-видимому, при $\sim 560-570$ нм). Таким образом, интенсивности полос флуоресценции фикоэритрина и ХлФ_а не свободны от влияния по крайней мере трех дополнительных полос.

Возникает вопрос о выборе оптимальной длины волны возбуждающего излучения, при котором это влияние будет легче всего учесть при оценке отношений (44). Для уменьшения влияния флуоресцентной полосы РОВ следует снизить длину возбуждающего излучения. [93]. Однако уже при $\lambda_{\text{возб}}=532,0$ нм (рис. 64) полоса КР, значительно возрастающая по интенсивности, сдвигается в длинноволновую область, на ее фоне полоса флуоресценции ХлФ_а при 685 нм проявляется лишь как плечо. В связи с этим авторы обсуждаемых исследований считают, что оптимальной длиной волны возбуждающего лазерного излучения следует признать $\lambda_{\text{возб}}=520$ нм.

Оценка выполнимости соотношений (44) дала положительные результаты: были получены линейные зависимости отношений (P_M/P_R) и (P_F/P_R) от концентраций, соответственно, гидрозоля и $XлФ_a$.

Исследования, осуществленные рядом научных коллективов [169—173] на разнообразных водных объектах (океаны, морские заливы, озера, водохранилища) с применением метода активной лазерной локации показали, что для определенных пределов значений $C_{XлФ_a}$ действительно может быть установлена линейная регрессионная связь между (P_F/P_R) и $\langle C_{XлФ_a} \rangle$. Так, согласно В. В. Фадееву [170], корреляционный анализ результатов измерений с борта НИС «Дмитрий Менделеев» в океанских водах, привел к следующему эмпирическому выражению:

$$\langle C_{XлФ_a} \rangle \text{ (мгк/л)} = (2,6 \pm 0,3) (P_F/P_R) \quad (45) \\ (\lambda_{возб} = 532 \text{ нм})$$

Фактор насыщения флуоресценции γ в случае однокомпонентной примеси в воде, когда поглощают и флуоресцируют одни и те же молекулы, равен: $\gamma = 1 + \sigma_n \cdot \tau F$, где σ_n — сечение поглощения примеси на длине волны возбуждения, τ — время жизни возбужденного уровня, F — плотность потока фотонов возбуждающего лазерного излучения (фотон/см²с). В случае многокомпонентной примеси, в которой происходит перенос энергии возбуждения, фактор γ может нелинейно зависеть от F . В ходе лидарных зондирований с борта НИС «Дмитрий Менделеев» было установлено, что фактор насыщения γ линейно зависит от F и равен $\gamma = 2,2 \pm 0,2$ при максимальной плотности фотонов $F_{\max} \approx 3 \cdot 10^{26}$ фотон/см²с.

Измерения с борта вертолета над заливом Лас Вегас [169] также обнаружили линейную связь между отношениями (P_F/P_R) и $\langle C_{XлФ_a} \rangle$ до значений $\langle C_{XлФ_a} \rangle$ порядка 20—22 мг/м³. Характерно, что, в отличие от зависимости (45), прямая, связывающая нормированный флуоресцентный сигнал с концентрацией $XлФ_a$ в заливе Лас Вегас не проходит через начало координат, что указывает на наличие в водах этого залива небольшого количества флуорофоров иной природы, нежели флорофилл фитопланктона. При больших же количествах $XлФ_a$ в воде обсуждаемая связь носит нелинейный характер.

Летом 1985 года с помощью лидарного комплекса, установленного на борту Ми-8, были осуществлены экспериментальные дистанционные определения концентраций $XлФ_a$ на оз. Севан, Куйбышевском водохранилище и Онежском озере [173]. Комплекс содержал лазер АИГ, колебровочный источник света, приемно-передающую оптическую систему, приемный оптический телескоп, полихроматор, систему фотоприемников, систему усилителей, задержек и аналоговых преобразователей, информационно-вычислительную систему на базе крейта КАМАК и микро-ЭВМ, предназначенную для автоматизации сбора, накопления, обработки

спектрометрической информации и вывода данных. Оптический сигнал, поступавший на вход спектрометра, состоял из эхо-сигнала, обусловленного комбинационным рассеянием и флуоресценцией ФП и РОВ, и фоновой засветки, вызванной отраженным от водной поверхности прямого и рассеянного атмосферой солнечного излучения. Разделение этих компонентов и выделение сигнала фоновой засветки реализовывалось в спектрометре на машинном уровне: сигнал фоновой засветки регистрировался с задержкой в несколько сот микросекунд в режиме получения полезного сигнала, но без срабатывания лазера; при такой задержке, с учетом скорости полета, ~ 100 м/с, и периода изменения состояния водной поверхности, $\sim 0,01$ с, фоновый сигнал формировался от того же объема, что и объем, который до этого зондировался лазерным лучем, причем состояние объема за это время оставалось практически без изменения. Выделение из полезного сигнала «мешающей» компоненты, обусловленной флуоресценцией РОВ, осуществлялось по методу вычитания «пьедестала»: принимая, что при $\lambda=600$ нм $P_R=0$, а при $\lambda=700$ нм $P_{РОВ}=0$, можно вычесть из суммарного сигнала $P_{РОВ}$ при известном контуре полосы флуоресценции РОВ.

Анализ сравнения контрастных и лидарных данных по Онежскому озеру (являющемуся олиготрофным водоемом) привел к линейной регрессионной зависимости вида

$$\langle C_{Хл.} \rangle \text{ (мг/м}^3\text{)} = -0,6 + 3,33 (P_F/P_R) \quad 46$$

Для Куйбышевского водохранилища, трофический статус которого — эвтрофный водоем, оказалось, что аналогичное регрессионное уравнение имеет другие коэффициенты:

$$\langle C_{ХлФ.} \rangle \text{ (мг/м}^3\text{)} = -1,5 + 11 (P_F/P_R) \quad (47)$$

(причем при $C_{ХлФ.} > 22 - 25$ мг/м³ уравнение (47) становится неработоспособным).

Тот факт, что полученные для океанских акваторий и внутренних водоемов, регрессионные уравнения $\langle C_{ХлФ.} \rangle = f(P_F/P_R)$ различны, является непосредственным следствием различий в гидрооптических свойствах этих водных объектов. Действительно, возвращаясь к формулам (44) можно видеть, что отношение (P_F/P_R) зависит не только от концентрации флуорофора, но и члена, отражающего гидрооптические условия зондирования: $(c_L + c_R)/(c_L + c_F)$. Строго говоря, значение последнего члена остается постоянным только в пределах однородной водной массы водоема. Можно ожидать, что в сложном в гидрооптическом отношении озере этот член может меняться от района к району. Тем более естественно ожидать различий в его значениях для различных (в том числе и по трофическому статусу) водоемов. Практически это означает, что алгоритмы типа (45—47) должны создаваться как минимум, индивидуально для каждого предназначенного для мониторинга водоема, а в случае существенно «лоскутного» характера гидро-

оптических полей того или иного водоема — и для определенных его районов.

Следует отметить, что дисперсии экспериментальных точек при установлении зависимости $\langle C_{\text{ХлФ}_a} \rangle = f(P_F/P_R)$ во всех обсуждавшихся выше реализациях метода лазерной локации были значительными. По-видимому, этот эффект закономерен по причинам, обсуждавшимся выше. Более высокая точность определения концентрации групп ФП может быть достигнута применением либо двух лазеров с разными $\lambda_{\text{возб}}$ (см. табл. 13), либо лазера с пере-страиваемой длиной волны, а также точным учетом контура эмиссионной полосы РОВ для каждой $\lambda_{\text{возб}}$.

При этом, однако, возникает необходимость учета того фактора, что глубина зондирования на разных $\lambda_{\text{возб}}$ (в особенности, если они существенно разнесены) различна. Это достаточно сложный методический вопрос, который, насколько нам известно, еще не рассматривался и ждет своего решения. В этой же связи уместно напомнить и о проблеме восстановления по данным дистанционных измерений вертикальной стратификации поля концентрации ФП (ХлФ). Здесь есть определенные основания надеяться, что флуоресцентная методика может оказаться достаточно эффективной: по крайней мере уже сейчас, согласно [174—178], существует возможность при активном лазерном зондировании восстанавливать вертикальный профиль $C_{\text{ХлФ}}$ при ее линейном изменении с глубиной.

Отдавая должное достоинствам метода активного лазерного зондирования (которые следовало бы определить в значительной мере как потенциальные, нежели уже реализованные), необходимо подчеркнуть, однако, что этот метод не свободен и от ограничений. Здесь прежде всего имеется в виду зависимость результатов восстановления концентрации хлорофилла от изменчивости отношения $C_L + C_R / C_L + C_F$ и состояния водной поверхности (волнение, солнечные блики, наличие нефтяных пленок и т. д.) Серьезным ограничением в применении метода может явиться и необходимость использования лазеров большой мощности при зондировании с высоколетящих носителей *). Тем не менее, необходимость дальнейшей разработки этого направления и его перспективность не вызывают сомнений.

Заканчивая эту главу, в которой мы попытались рассмотреть совокупность методических вопросов, связанных с индикацией ФП, следует еще раз подчеркнуть, что несмотря на несомненные успехи, достигнутые в этом направлении, существует еще ряд нерешенных проблем. Они связаны прежде всего с установлением более адекватных биооптических алгоритмов, которые были бы чувствительны к флористической принадлежности ФП и обладали высокой точностью в случае водоемов, характеризующихся значительными концентрациями ЖВ и МВ. Заслуживает самого пристального вни-

* Иллюстрацией этому могут служить оценки [167], согласно которым подъем лидара от поверхности воды до высоты только 150 м требует повышения отношения сигнал/шум в 60 раз.

мания и необходимость разработки методик восстановления по данным дистанционных измерений распределения ФП (ХлФ) по глубине. К этому следует добавить и круг вопросов, оставшихся за пределами обзора, но имеющих чрезвычайно важное значение для дистанционного мониторинга — а именно: разработка алгоритмов атмосферной коррекции в условиях, когда, с одной стороны, в водоеме велики концентрации ХлФ, РОВ и МВ, а, с другой — дымка над поверхностью столь оптически сложных вод морфологически горизонтально неоднородна [133, 176—180]. Таковы, по-видимому, основные задачи, от решения которых во многом зависит успешное развитие в будущем практических методов дистанционного мониторинга естественных водоемов.

Глава 4.

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Лазеры используются в приборах для дистанционных исследований — лидарах (от английского Laser Detection and Rangind) практически с момента своего создания. Одним из первых лидаров был оптический дальномер, в котором в качестве источника светового излучения использовался твердотельный лазер на рубине [181, 182]. В настоящее время дальномеры широко используются в геодезии, метеорологии, астрономии, навигации и других областях народного хозяйства. Они позволяют измерять дальность до объекта с точностью до нескольких сантиметров на расстояниях в сотни километров. В дальномерах наиболее широко используются твердотельные лазеры на рубине ($\lambda = 694$ нм), иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ, $\lambda = 1,06$ мкм) и газовые гелий-неоновые лазеры [183].

В 1963 г. были начаты лидарные исследования атмосферы [184, 185]. В настоящее время это наиболее развитая область дистанционных лидарных исследований. С помощью лидаров на основе твердотельных лазеров на рубине и кристаллах ИАГ были проведены измерения параметров атмосферы для оценки ее газового состава, степени загрязнения и динамических характеристик. Полученные данные позволяют сделать предположение о том, что в будущем лидарные системы смогут поставлять информацию, необходимую для изучения свойств атмосферы с целью предсказания погоды.

В концах 60-х годов лидары начали устанавливать на борту летательных аппаратов [186, 187]. Первоначально это были лазерные сканирующие системы для получения изображения местности [187]. В этих системах использовались непрерывные газовые лазеры: аргоновые ($\lambda = 480 + 520$ нм) и гелий-неоновые ($\lambda = 632$ нм). В дальнейшем появились бортовые лидары, позволяющие вести исследования физических параметров водной среды. В начале это были системы для определения параметров волнения водной поверхности [188], а затем лидары для проведения батиметрических исследований (глубиномеры) [189]. В этих лидарах используются импульсные лазеры, работающие в сине-зеленой области спектра—

газовые неоновые ($\lambda=540$ нм) и твердотельные на кристаллах ИАГ ($\lambda=532$ нм).

Эти исследования дали начало применению лидаров для изучения явления флуоресценции органических веществ водной среды, возбуждаемой лазерным излучением. Первые работы в этом направлении были посвящены исследованию спектров флуоресценции сырой нефти и нефтепродуктов. Они показали, что каждый тип нефтепродуктов можно однозначно охарактеризовать спектром и временем затухания флуоресценции [190, 191]. В этих работах используются генерирующие в УФ диапазоне лазеры: твердотельные на рубине ($\lambda=347$ нм), на кристаллах ИАГ ($\lambda=355$ нм и $\lambda=266$ нм), газовые лазеры на азоте ($\lambda=337,1$ нм) и эксимерные лазеры ($\lambda=308$ нм и др.). Дальнейшее развитие дистанционных флуоресцентных исследований было направлено на изучение спектров флуоресценции растений суши и фитопланктона моря. В применяемых для этих целей лидарах в основном используются перестраиваемые лазеры на красителях, которые работают в широком спектральном диапазоне ($\lambda=260-900$ нм) [183, 192, 193]. Необходимость использования перестраиваемых лазеров связана с тем, что живые организмы имеют сложный спектр возбуждения флуоресценции.

4.1. Основные физико-технические принципы построения лидаров

Практически все лидары состоят из одинаковых функциональных элементов и работают по одному и тому же принципу (рис. 66). Лазерное излучение через выходное оптическое устройство (2), служащее для формирования зондирующего пучка, направляется к исследуемому объекту. Преобразованное объектом излучение собирается приемным оптическим устройством (3) и направляется на спектроанализатор (4), выделяющий исследуемую часть спектра принимаемого излучения. После спектроанализатора излучение поступает на систему фотодетектирования (5), где оно преобразуется в систему сбора и обработки информации (6).

Приведем краткие технические характеристики перечисленных основных элементов лидара.

Лазеры являются почти идеальными приборами для дистанционного зондирования окружающей среды. Они являются источниками электромагнитного излучения большой мощности и малой угловой расходимости в широком спектральном диапазоне. В качестве рабочего вещества в лазерах могут использоваться газы и их смеси, диэлектрические кристаллы и стекла, растворы органических красителей и др. [183]. В таблице 14 представлены основные типы отечественных и зарубежных лазеров, пригодных для использования в лидарах.

Среди газовых лазеров особый интерес для зондирования био-

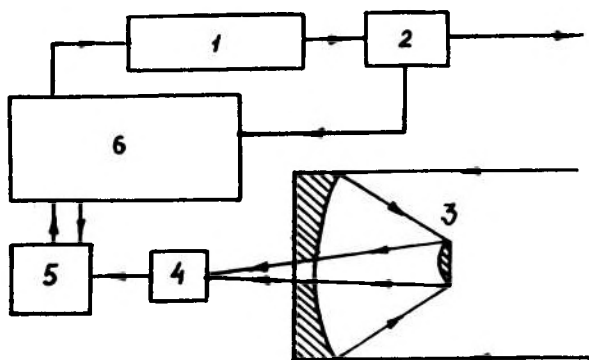


Рис. 66. Функциональная схема лидара: 1 — лазер, 2 — выходное оптическое устройство, 3 — приемное оптическое устройство, 4 — спектроанализатор, 5 — система фотодетектирования, 6 — система сбора и обработки данных.

логических объектов представляет азотный лазер [194]. Благодаря короткой длине волны излучения ($\lambda = 337,1$ нм), он пригоден для возбуждения флуоресценции большого класса органических веществ. Высокая частота генерации импульсов (1 кГц и более) при малой их длительности (5—20 нс) позволяет проводить наблюдения с хорошим пространственным разрешением.

Твердотельные лазеры обладают высокой мощностью при малой длительности импульса излучения. Возможность преобразования частоты генерации способствовала их широкому применению в системах зондирования водной поверхности — длина волны генерации второй гармоники излучения лазера на иттрий-алюминевой гранате лежит в области максимальной прозрачности воды (рис. 67). Однако одним из недостатков этих лазеров является низкая частота генерации импульсов (сотни герц) и малая долговечность, вследствие использования оптических ламп накачки [183].

Наиболее перспективными для использования в дистанционном зондировании являются перестраиваемые лазеры на красителях [193]. Они имеют широкий диапазон перестройки длины волны излучения — от ближнего ультрафиолетового диапазона (300 нм) до ближнего инфракрасного (950 нм). Эти лазеры имеют высокую импульсную мощность при частоте повторения импульсов до 1 кГц и длительности импульса от 5 до 250 нс. Благодаря возможности перестройки длины волны излучения эти лазеры широко используются для избирательного возбуждения флуоресценции различных органических веществ [195—197].

Разработка новых лазеров на основе галогенидных соединений инертных газов (ArF , KrF , XeF , XeCl , XeBr , KrCl) [183] способст-

Таблица 14.

Серийно-выпускаемые отечественные и зарубежные лазеры

Тип лазера	Активная среда	Длина волны излучения, нм	Мощность излучения, Вт	Длительность импульса излучения, нс	Частота повторений Гц
1	2	3	4	5	6
Твердотельные импульсные лазеры					
Арзни 207	Рубин	694	$20 \cdot 10^6$	20	2
Apollo Laser	Рубин	694	$100 \cdot 10^6$	20	1
ЛТИ-5	ИАГ ¹	1064	$5 \cdot 10^6$	10	100
ЛТИПЧ-6	ИАГ	532 ²	$3 \cdot 10^5$	10	100
ЛТИПЧ-7	ИАГ	355 ³	$1 \cdot 10^5$	10	100
ЛТИПЧ-8	ИАГ	266 ⁴	$1 \cdot 10^5$	10	100
Holobeam Laser	ИАГ	266	$1 \cdot 10^6$	15	20
Intl Laser System	ИАГ	1064	$100 \cdot 10^6$	15	30
Газовые импульсные лазеры					
ЛГИ-21	N ₂	337	$3 \cdot 10^3$	10	100
ЛГИ-501	N ₂	337	$20 \cdot 10^3$	10	500
ЛГИ-503	N ₂	337	$3 \cdot 10^5$	5	10
АЛ-202	N ₂	337	$5 \cdot 10^5$	10	20
Molecton	N ₂	337	$1 \cdot 10^6$	10	50
Lambda Physik	N ₂	337	$1 \cdot 10^6$	3	100
Avco Everett	N ₂	337	10^5	8	500
ЛГИ-40	Ar	430—560	$5 \cdot 10^3$	300	200
ЛПМИ-75	Cu	510, 578	—	—	10^4
Laser consultants	Cu	510, 578	$5 \cdot 10^4$	20	10^4
Avco Everett	Ne	540	10^4	3	100
Непрерывные газовые лазеры					
ЛГ-106М	Ar	480—520	1		
ЛГ-109	Ar	480	1		
ЛГН-404А	Ar	454—514	1		
ЛГН-404Б	Kr	620—680	0,6		
ЛПМ-11	He-Cd	440,	$20 \cdot 10^{-3}$		
	He-Cd	325	$2 \cdot 10^{-3}$		
ЛГ-62	He-Cd	440	$120 \cdot 10^{-3}$		
ЛГ-36А	He-Ne	632	$80 \cdot 10^{-3}$		
ЛГ-52-1	He-Ne	632	$18 \cdot 10^{-3}$		
ЛГ-126	He-Ne	632	$20 \cdot 10^{-3}$		
		1150	$20 \cdot 10^{-3}$		
		3392	$20 \cdot 10^{-3}$		

1	2	3	4	5	6
Перестраиваемые импульсные лазеры на красителях					
Phase-R	кумарин	230—960	$0,5 \cdot 10^6$	250	10
Lambda Physik	—	250—780	$1,5 \cdot 10^5$	3	100
Phase-R	кумарин	420—850	$6 \cdot 10^6$	250	5

1 — иттрий — алюминиевый гранат

2 — вторая гармоника ИАГ

3 — третья гармоника ИАГ

4 — четвертая гармоника ИАГ

вует расширению возможностей существующих лидаров. Эти лазеры обеспечивают высокую мощность излучения (до 100 Мвт) на коротких длинах волн (193, 249, 350, 308, 282, 223 нм). Например, лазер на основе фторида криптона имеет мощность излучения до 100 Мвт в импульсе при длине волны излучения 248,4 нм [198]. Одним из возможных применений этих лазеров может быть дистанционное зондирование нефтяных загрязнений.

Приемные оптические устройства лидаров выполнены на основе телескопических систем. Основные требования, предъявляемые к ним, следующие: а) изображение, создаваемое оптической системой, должно иметь минимальные аберрации, т. е. обеспечивать высокую разрешающую способность; б) материал оптических элементов должен пропускать излучение в исследуемой области спектра с минимальными потерями; в) оптическая система должна обеспечивать наибольшую светосилу, позволяющую полностью реализовать разрешающую способность спектроанализатора. Этим требованием удовлетворяют приемные объекты, выполненные на основе систем Ньютона, Кассегрена, Грегори (рис. 68). Наиболее широко в современных лидарах используют объективы Кассегрена — при большом фокусном расстоянии они имеют наименьшие габариты. Необходимо также отметить использование линз Френеля в приемных объективах лидаров [204]. Однако большие оптические искажения этих линз существенно ограничивают область их использования.

Для выделения исследуемой части спектра принимаемого излучения используют спектроанализаторы. Их можно разделить на три категории: абсорбционные фильтры, интерференционные фильтры и диспергирующие приборы [200].

Абсорбционные фильтры используются как для ослабления лазерного излучения, так и для выделения спектральных интервалов большой ширины (десятки и сотни нанометров) из излучения, принимаемого от объекта.

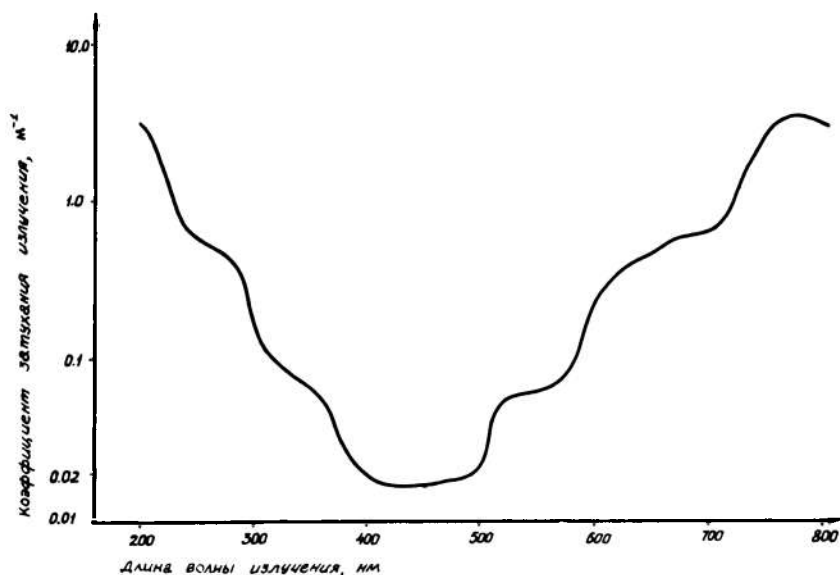


Рис. 67. Зависимость коэффициента затухания излучения в воде от длины волны излучения.

Интерференционные фильтры используются для выделения узкого спектрального диапазона (единицы и доли нанометров).

Для выделения очень узких (ангстремы) спектральных линий используются интерферометры Фабри-Перо. В случае, когда требуется измерение всего спектра исследуемого излучения, используются полихроматоры и спектрометры. Использование полихроматора целесообразно при измерении определенного числа хорошо известных спектральных интервалов.

Для преобразования электромагнитного излучения в электрический сигнал используют фотодетекторы. При выборе фотодетектора основными характеристиками служат: область спектральной чувствительности, квантовый выход, частотная характеристика, усиление по току, темновой ток, габариты и устойчивость к различным воздействиям [201]. Во многих случаях при выборе класса фотодетектора руководствуются длиной волны регистрируемого излучения. Для диапазонов волн от 200 до 1000 нм обычно используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Они обладают высоким коэффициентом усиления и малым шумом. ФЭУ способны регистрировать одиночные фотоны. Это привело к созданию систем детектирования светового излучения низкого уровня, которые основаны на методе счета отдельных фотонов [202].

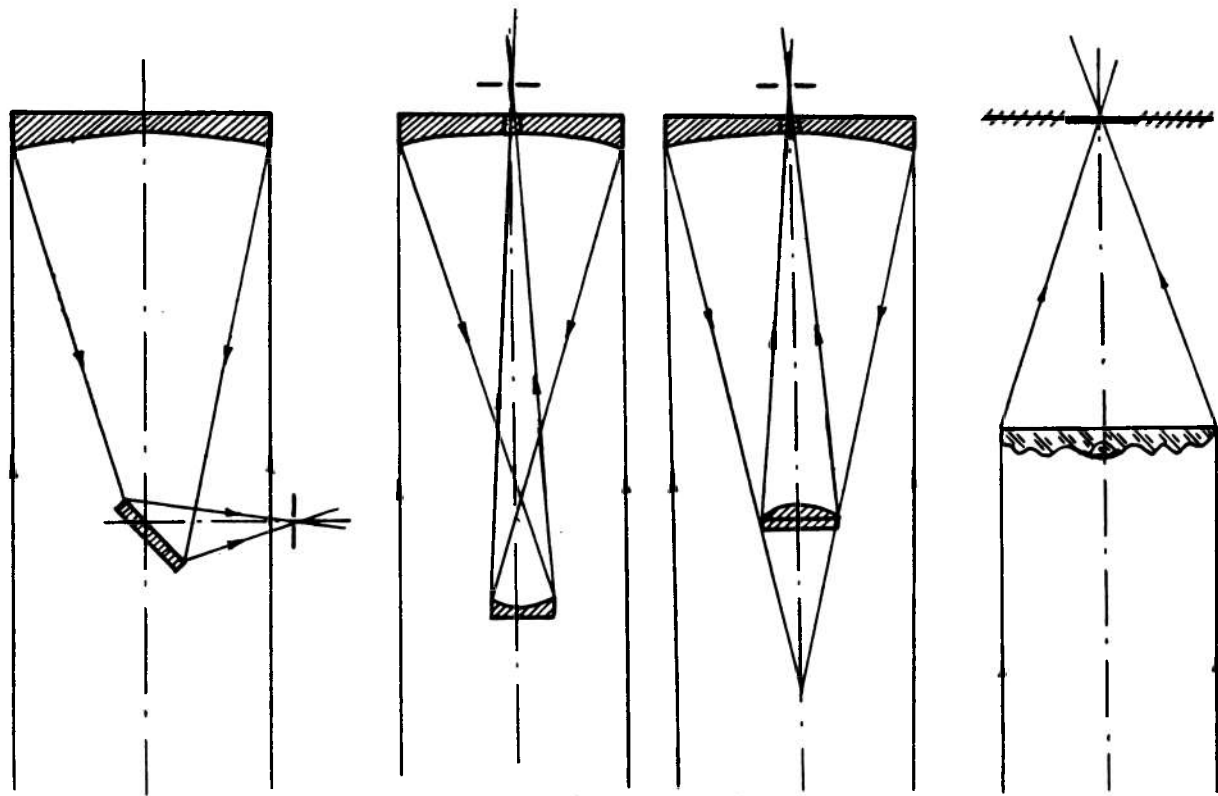


Рис. 68. Основные типы приемных объективов: а — система Ньютона; б — система Грегори, в — система Кассегрена, г — линза Френеля.

4.2. Технические характеристики бортовых лидаров, используемых в дистанционных исследованиях

С начала 60-х годов в отечественной и зарубежной литературе [187, 204—213] приводятся многочисленные описания конструкций бортовых лидаров, устанавливаемых на вертолетах и самолетах с целью решения различных задач дистанционного исследования природных ресурсов Земли. В таблице 14 мы попытались обобщить основные литературные данные по бортовым лидарам, созданным за последние 20 лет.

Остановимся более подробно на описании наиболее типичных образцов бортовых лидаров.

Одноканальный лидар-флуориметр изготовлен в США [203] и прошел испытание в 1971—1972 г. г. на акватории озера Онтарио. Лидар устанавливался на борт вертолета Bell — 204В и был предназначен для определения концентрации хлорофилла фитопланктона в воде. Лидар позволяет определять концентрацию хлорофилла фитопланктона от 0 до 30 мг/м³. Лидар состоит из двух блоков: в состав первого блока входит лазерный передатчик, источник питания и приемник; в состав второго — пульт управления, модуль обработки и записи сигнала. Лазерный передатчик и приемник смонтированы в некоаксиальном исполнении. В передатчике используется коаксиальный перестраиваемый лазер с оптической накачкой. В качестве рабочего вещества лазера используется раствор Родамина 6Ж. Лазер излучает импульсы мощностью 1 МВт, длительностью 300 нс и частотой повторения 2 импульса в минуту. Длина волны генерации лазера 590 нм. Часть лазерного излучения используется для запуска осциллографа и аналогово-цифрового преобразователя, а также для контроля мощности лазера.

Приемник лидара выполнен на основе объектива Ньютона диаметром 19 см и включает в себя диафрагму, коллимирующую линзу, диск с двумя фильтрами (685 и 735 нм) и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Для защиты ФЭУ от высокочастотных шумов лазера используется электростатическая и электромагнитная экранировка. Сигнал с усилителя ФЭУ подается на аналогово-цифровой преобразователь и далее на печатающее устройство.

Лазерный луч направляется на поверхность моря с помощью зеркала, имеющего радиус кривизны 10 м, что обеспечивает расходимость луча около 30 мрад. Система работает в дневное время и обеспечивает соотношение «сигнал-шум» более чем $10^6:1$. Лидар прост в исполнении и надежен в эксплуатации, однако класс решаемых им задач ограничен ввиду отсутствия дополнительного опорного канала для регистрации комбинационного рассеяния воды, что не позволяет определять концентрацию хлорофилла фитопланктона с достаточной точностью [196]. Плохое разрешение лидара на местности обусловлено низкой частотой генерации импульсов [2 имп/мин].

Одноканальный лидар [197] изготовлен в ФРГ совместно с Гидрографическим институтом и университетом г. Олденбург (рис. 69). Во время проведения испытаний в Северном море в 1979—1980 г. г. определялась концентрация растворенного в морской воде красителя Родамин В, используемого в гидрографических исследованиях. Лидар состоит из передатчика (мощный лазер на красителе), приемного объектива системы Ньютона и электронной системы для обработки данных.

Передатчик настроен на длину волны 536 нм, являющуюся оптимальной для возбуждения флуоресценции используемого красителя. Мощность лазерного излучения контролируется с помощью пирозлектрического приемника. Приемник настроен на длину волны 595 нм — максимум флуоресценции красителя. Для выделения сигнала флуоресценции и подавления отраженного излучения лазера в приемнике используются абсорбционный и интерференционный светофильтры. Управление работой лидара на борту вертолета ведется с помощью бортовой ЭВМ.

При проведении экспериментов не учитывалось влияние на интенсивность флуоресценции красителя таких факторов как температура и соленость воды.

Чувствительность лидара ограничивалась высокочастотными шумами от лазера и соответствовала концентрации красителя 10^{-1} г/см³.

Основным недостатком лидара является одноканальность приемного тракта.

Двухканальный лидар [204] изготовлен в США и предназначен для определения концентрации хлорофилла фитопланктона с борта вертолета. Испытания лидара проводились в 1979 г. Лидар состоит из лазерного передатчика и телескопического приемника, смонтированных в некоаксиальном исполнении (рис. 70, 71). В передатчике используется перестраиваемый лазер с оптической накачкой. Мощность лазера контролируется фотодиодом. Лазерный сигнал используется для запуска электронных блоков приемника и системы обработки информации. Настройка лазера на оптимальную длину волны (470 нм) возбуждения в воде флуоресценции хлорофилла проводится в начале каждого полета по максимальной интенсивности сигнала опорного канала, регистрирующего рамановское рассеяние воды. Приемник лидара выполнен на основе линзы Френеля диаметром 30 см и включает в себя диафрагму, установленную в фокальной плоскости линзы Френеля, коллимирующую линзу, светоделитель и два ФЭУ с набором фильтров. Фильтры используются для выделения сигналов флуоресценции хлорофилла рамановского рассеяния воды, а также для подавления отраженного от воды излучения лазера. Насыщение ФЭУ, вызванное продолжительной экспозицией при дневном освещении, устраняется стробированием ФЭУ по питанию на время прихода полезного сигнала. Во время проведения экспериментов для привязки к местности велась съемка на видеоманитофон.

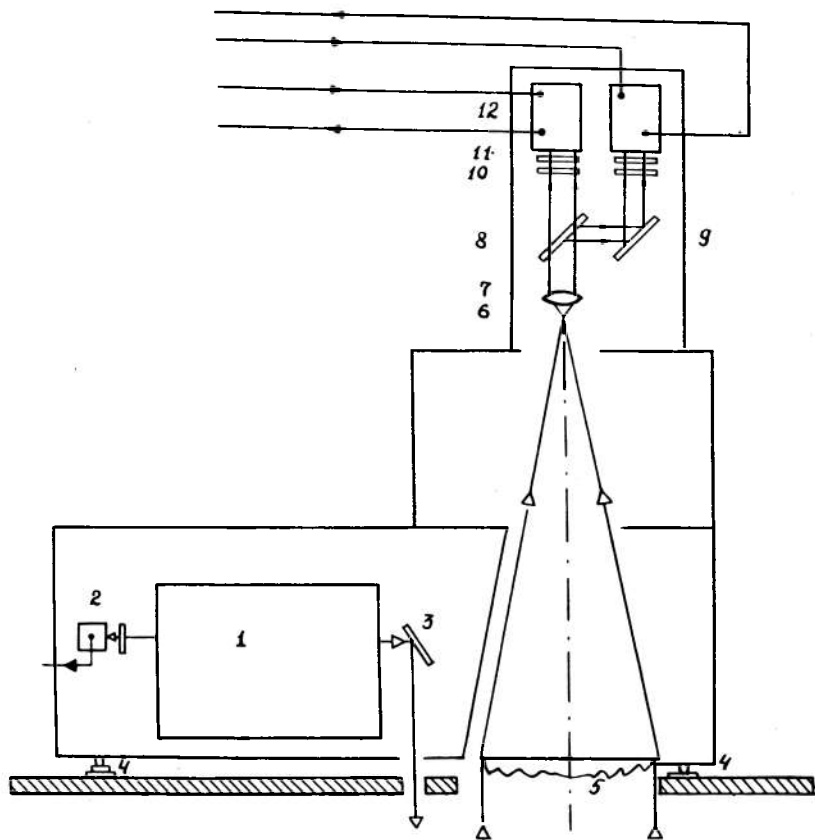


Рис. 70. Оптическая схема двухканального лидара: 1 — перестраиваемый лазер, 2 — детектор мощности лазера, 3 — поворотное зеркало; 4 — амортизатор, 5 — линза Френеля, 6 — диафрагма, 7 — коллимирующая линза, 8 — светоделительное зеркало, 9 — поворотное зеркало, 10 — абсорбционный светофильтр, 11 — ФЭУ.

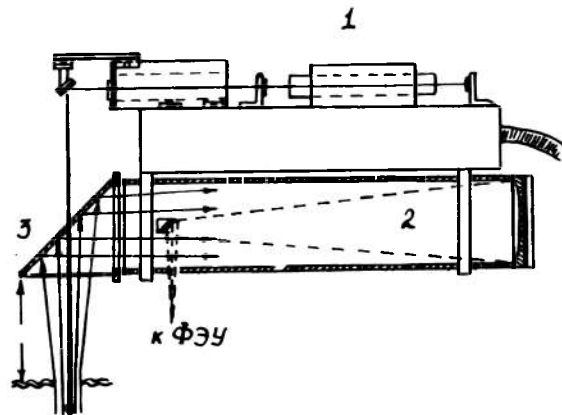


Рис. 69а. Оптическая схема одноканального лидара: 1 — лазер, 2 — приемный объектив, 3 — приемное зеркало. Рис. 69б. Функциональная схема одноканального лидара: 1 — приемник, 2 — припирозлектрический детектор; 3 — р-и-п диод, 4 — лазер, 5 — бортовой вычислитель, 6, 8 — самописец, 7 — цифро-аналоговый преобразователь, 9 — аналоговоцифровой преобразователь, 10 — магнитофон, 11 — таймер, 12 — микроЭВМ.

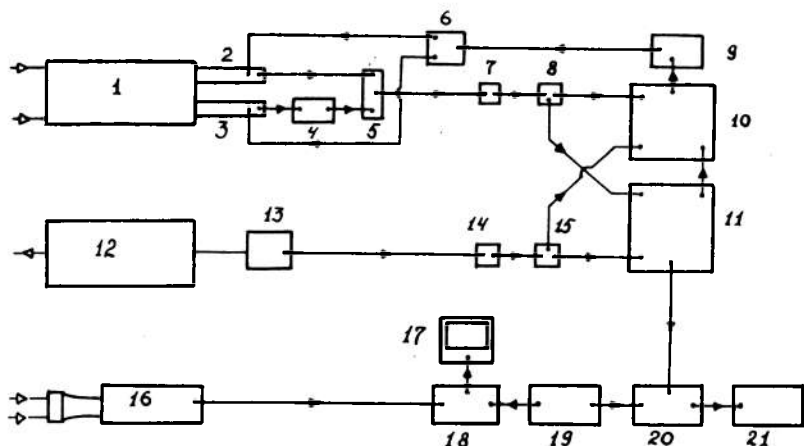


Рис. 71. Функциональная схема двухканального лидара: 1 — приемный объектив, 2, 3 — ФЭУ, 4 — импульсная линия задержки, 5 — сумматор, 6 — генератор импульсов стробирования, 7—14 — фильтр нижних частот, 8, 15 — импульсный делитель, 9 — генератор импульсов, 10 — двухлучевой осциллограф, 11 — цифровой преобразователь, 12 — перестраиваемый лазер, 13 — p-i-n — фотодиод, 16 — телевизионная камера, 17 — видеомонитор, 18 — видеоманитофон, 19 — таймер, 20 — интерфейс, 21—9 — каналный цифровой магнитофон.

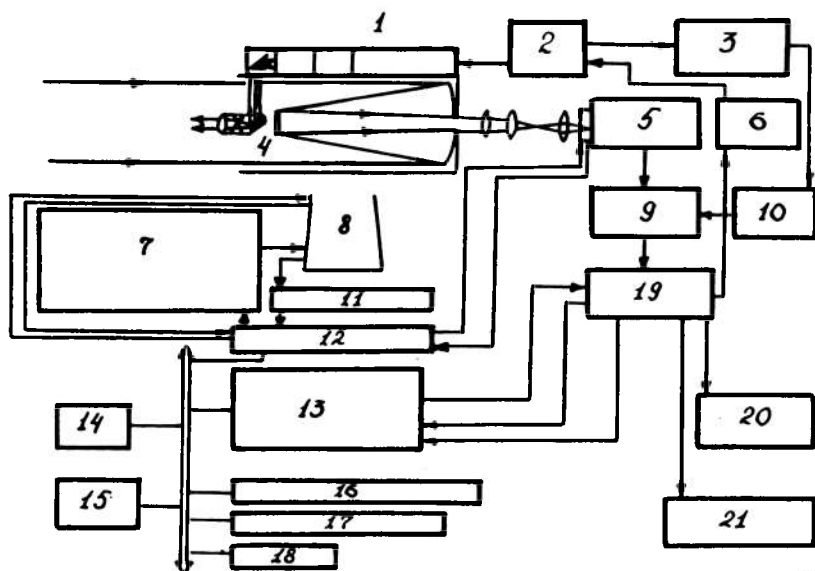


Рис. 72. Функциональная схема многоканального лидара: 1 — лазер, (ИАГ: Nd^{3+}); 2 — источник питания лазера, 3 — генератор импульсов, 4 — приемный объектив, 5 — полихроматор, 6 — линия задержки, 7 — система контроля сканирования; 10 — стробирующий генератор, 11 — аналогово-цифровой преобразователь, 12 — контрольный интерфейс, 13 — интерфейс, 14 — дисковод, 15 — графический дисплей, 16 — центральный процессор, 17 — блок памяти, 18 — телетайп, 19 — многоканальный контролер, 20 — двухкоординатный самописец, 21 — скоростной осциллограф.

К достоинствам этого лидара можно отнести наличие опорного канала, который позволяет исключить влияние различных факторов (изменения коэффициентов поглощения и отражения воды, вариации усиления отдельных блоков лидара и мощности лазера, изменения высоты полета) на результаты измерений концентрации флорофилла фитопланктона. Использование в приемном объективе пластиковой линзы Френеля значительно удешевило и упростило конструкцию лидара.

Одним из главных недостатков является необходимость юстировки оптики лидара перед каждым полетом.

Многоканальный сканирующий лидар изготовлен в Японии и прошел испытания в 1977 году в Японском море [205]. Лидар предназначен для обнаружения и классификации загрязнений водной поверхности. Лидар выполнен в коаксиальном исполнении (рис. 72). В передатчике используется твердотельный импульсный лазер на кристалле ИАГ с модуляцией добротности. Лазер генерирует излучение на второй (532 нм) и четвертой (266 нм) гармониках. Частота следования импульсов — 30 Гц, длительность импульса — 8 нс. Импульсная мощность излучения на второй гармонике — 3 МВт, и 200 кВт — на четвертой.

В приемнике, выполненном на основе объектива Кассегрена диаметром 50 см, используется полихроматор и оптический многоканальный анализатор ОМА. Схема временного стробирования приемного канала лидара позволяет использовать лидар в дневных условиях. Сканирование приемного канала и обработка данных ведется автоматически и контролируется ЭВМ.

В процессе испытаний лидара получены спектры флуоресценции керосина и тяжелой нефти при возбуждении на двух длинах волн. Сравнение измеренных дистанционно спектров органических веществ со спектром, заложенным в память ЭВМ, позволяет оперативно классифицировать типы загрязнений водной поверхности нефтепродуктами.

К недостаткам лидара можно отнести то, что он выполнен в береговом варианте.

Многоканальный лидар [206] изготовлен в Канаде и прошел испытание в США в 1976 году. Лидар устанавливается на борту самолета и предназначен для обнаружения, идентификации, картирования и слежения за перемещением нефтяных пленок на поверхности воды и определения хлорофилла в воде (рис. 73).

Лидар состоит из лазерного передатчика и приемника, смонтированных в коаксиальном исполнении. В передатчике используется азотный лазер со следующими параметрами: длина волны генерации — 337,1 нм, энергия лазерного импульса — 1 мДж, длительность — 3 нс, частота следования импульсов — 100 Гц, расходимость лазерного луча — 3×1 мрад. Пучок имеет прямоугольное сечение. В состав лидара входит блок определения высоты полета.

Приемник лидара выполнен на основе объектива Кассегрена диаметром 20,5 см и состоит из двух подсистем: спектрометра и высотомера. Спектрометр включает в себя входную оптику, гологра-

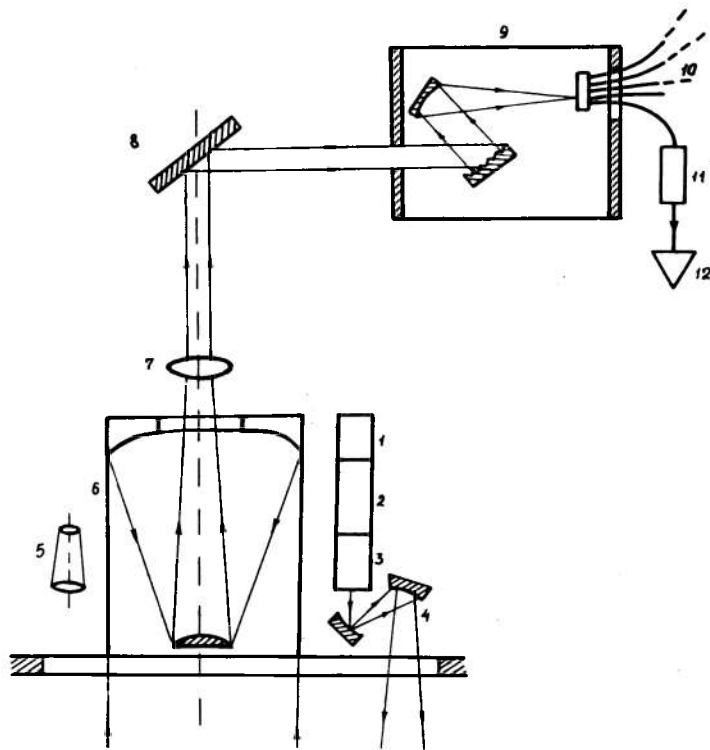


Рис. 74. Оптическая схема бортового лидарного комплекса: 1 — лазер (ИАГ: Nd^{3+}), 2 — усилитель, 3 — преобразователь частоты излучения, 4 — выходное оптическое устройство, 5 — контрольный окуляр, 6 — приемный объектив, 7, 8 — выходное оптическое устройство, 9 — спектрометр МДР-3, 10 — световодный коллектор, 11 — ФЭУ, 12 — усилитель.

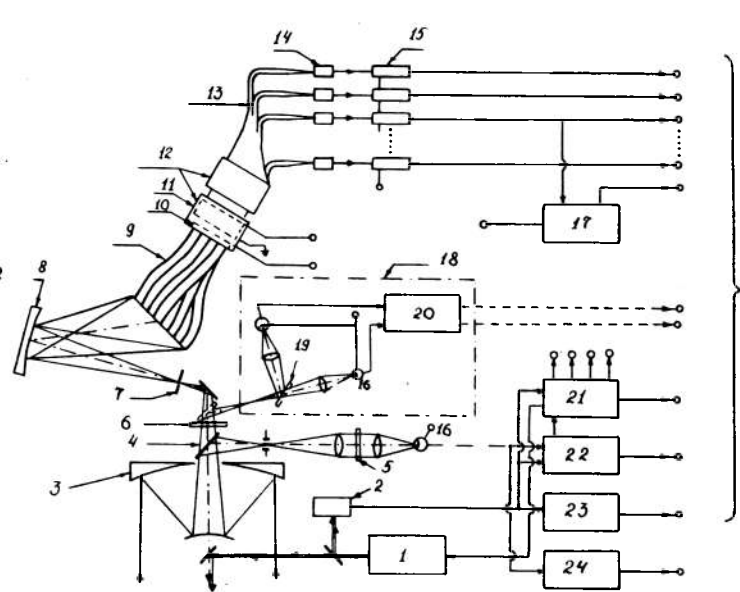


Рис. 73. Функциональная схема многоканального лидара: 1 — лазер, 2 — быстродействующий фотоприемник, 3 — приемный объектив, 4 — светоделиватель 10:90, 5 — интерференционный светофильтр, 7 — диафрагма, 8 — вогнутая дифракционная решетка, 9, 13 — световодный коллектор, 10 — фотокатод, 11 — каналный усилитель, 12 — усилитель изображения, 14 — фотодиод, 15 — устройство выборки-хранения, 16 — фотоприемник (ФЭУ), 17 — аналогово-цифровой преобразователь, 18 — двухканальный спектрометр, 19 — дихроническое зеркало, 20 — двухканальный цифровой преобразователь, 21 — генератор синхронимпульсов, 22 — высотометр, 23 — измеритель мощности лазера, 24 — измеритель коэффициента отражения.

фическую дифракционную решетку, входной и выходной световодный коллектор, два канальных оптических усилителя и устройство регистрации и обработки сигналов.

Коэффициент усиления первого канального усилителя может меняться от 25 до 5300 путем изменения напряжения питания. Второй канальный усилитель подключен к выходу первого и имеет фиксированный коэффициент усиления. Первый усилитель стробируется на время прихода полезного сигнала, чем достигается необходимое соотношение сигнал/шум. Это позволяет работать с лидаром в дневных условиях. Спектрометр имеет разрешение 20 нм в диапазоне длин волн от 380 до 700 нм. Первый канал спектрометра настроен на рамановское излучение воды (381 нм), возбуждаемое азотным лазером, и имеет полуширину полосы 8 нм. Спектральный диапазон приемника от 400 до 660 нм разбит на четырнадцать каналов с разрешением 20 нм. Шестнадцатый канал настроен на длину волны флуоресценции хлорофилла фитопланктона 685 нм и имеет полуширину полосы пропускания 7 нм.

В ходе испытаний лидара при ярком солнце были проведены эксперименты по обнаружению светлой и тяжелой нефти и красителя Родамин ВТ с высот 450, 300 и 180 м. При обработке данных учитывалась высота полета, коэффициент усиления приемника и мощность лазера. Испытания показали, что лидар может быть использован для обнаружения нефти, для идентификации типов нефтяных загрязнений и измерения концентрации хлорофилла в воде.

Отмечено, что возможности лидара существенно расширятся, если в передатчике использовать эксимерный лазер, работающий на более коротких длинах волн (249 нм, 308 нм). Это повысит эффективность возбуждения флуоресценции нефти, несмотря на то, что поглощение атмосферы на этих длинах волн выше.

Особенностью описанного лидара является использование оптических канальных усилителей вместо ФЭУ. Небольшие габариты, высокое быстродействие, высокий коэффициент усиления и малый шум делают эти усилители перспективными для регистрации слабых световых потоков в лидарных измерениях.

В Институте общей физики АН СССР [207] разработан бортовой лидарный комплекс, предназначенный для предварительного диагностирования физических параметров состояния водных поверхностей. Имеются также ссылки на использование лидара для диагностики физиологического состояния растений суши по спектрам флуоресценции хлорофилла. В состав комплекса входят: стойка с приемной оптикой, блок питания, бортовая ЭВМ и лазерный передатчик на основе азотного или твердотельного лазера на иттрий-алюминиевом гранате (рис. 74).

Лазерный передатчик состоит из задающего генератора (1), усилителя на кристаллах ИАГ (2), термостабилизированного удвоителя частоты или генератора третьей гармоники (3). Выходящее излучение с помощью четырехкратного зеркального телескопа (4) фокусируется на поверхность исследуемого объекта. Частота

повторения лазерных импульсов — 10 Гц, длительность — 10 нс, энергия импульса во второй гармонике (532 нм) — 50 мДж. Долговременная стабильность мощности излучения — около 3%. Контроль мощности лазера обеспечивается бортовой ЭВМ. Приемный объектив (6), собранный по схеме Кассегрена, имеет относительное отверстие 1/4 и диаметр 30 см. Излучатель и приемный объектив смонтированы таким образом, что оптические оси лазера и приемного объектива пересекаются на расстоянии 500—1200 м. Приемный объектив через систему линз и зеркал (7,8) согласован со спектрометром МДР-4 (9), оптическая схема которого изменена и приспособлена к задачам дистанционного зондирования. На выходе спектрометра сигналы, соответствующие различным спектральным составляющим исследуемого излучения (люминесценция, комбинационное рассеяние воды и азота воздуха и др.), через световодный коллектор (10) подаются на фотоэлектронные умножители (11). С выхода ФЭУ сигналы поступают на входы усилителей (12), а затем в стробируемые аналого-цифровые преобразователи, с которых через магистраль КАМАК поступают в память ЭВМ или через интеграторы на вход многоканального самописца. Одновременно в память ЭВМ записывается информация о сигнале рассеяния солнечного излучения, передаваемая с трех радиометров.

После обработки на ЭВМ данные в реальном масштабе времени могут быть представлены на графическом дисплее или цифропечатающем устройстве.

С помощью описываемого бортового лидара возможно проведение картирования фитопланктона в верхних слоях водоемов, сравнительного анализа содержания в воде растворенных органических веществ и хлорофилла, батиметрических измерений и исследований мутности воды. Имеются данные по использованию лидара для диагностики урожайности сельскохозяйственных культур [207] и определения районов океана, перспективных в отношении рыбных промыслов [208].

Двухканальный лидар [8,34], разработанный в 1984 г. в Институте ботаники АН УССР, предназначен для оценки физиологического состояния растительности суши с борта вертолета МИ—8. Испытания лидара проводились в 1985 г. Конструктивно он выполнен в двух блоках: приемно-передающего и источника питания. Лазерный передатчик и приемник смонтированы в некоаксиальном исполнении. В передатчике используется импульсный азотный лазер АЛ-202, работающий в ультрафиолетовой области спектра. Часть лазерного излучения используется для контроля мощности передатчика, управления электронными блоками приемника и системой обработки информации.

Приемник лидара выполнен на основе объектива Кассегрена диаметром 355 мм и включает в себя диафрагму, установленную в фокальной плоскости объектива, светоделитель и два ФЭУ с набором светофильтров для выделения сигналов флуоресценции, подавления отраженного от подстилающей поверхности излучения лазера и рассеянной солнечной радиации.

Измерение сигналов флуоресценции и мощности излучения лазера производится в блоке аналогово-цифрового преобразования, выполненного на основе быстродействующих АЦП, с последующей обработкой информации на бортовом вычислительном комплексе и записью на магнитофон.

К достоинствам этого лидара можно отнести простоту конструкции, надежность в эксплуатации и возможность выбора двух спектральных каналов в широком спектральном диапазоне (440—750 нм). Двухканальный лидар [17] с пространственно-разнесенными фотоприемниками разработан в 1984 г. в Институте ботаники АН УССР и предназначен для оценки геометрических параметров сельскохозяйственных культур с борта вертолета КА-26. Конструктивно лидар выполнен в одном блоке. Передатчик лидара выполнен на основе серийно выпускаемого азотного лазера ЛГИ-21, работающего в ультрафиолетовой области спектра ($\lambda=337$ нм). Часть лазерного излучения используется для контроля мощности лазера и управления работой электронными блоками лидара. Лидар имеет два аналогичных пространственно разнесенных приемных канала, выполненных на основе объективов Кассегрена диаметром 90 мм. Приемники включают в себя интерференционные светофильтры для выделения отраженного от исследуемого объекта лазерного излучения и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84-3. Приемники лидара разнесены на расстояние 1,5 м, что обеспечивает синхронное отслеживание лазерного пятна на поверхности РП в двух направлениях визирования в области обратного рассеяния, отличающихся на 3° для высоты полета 30—40 м. Измерение сигналов с приемных объективов и мощности излучения лазера производится в трехканальном измерителе, выполненном на основе быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей. Обработка информации производится на бортовом вычислительном комплексе с последующей записью на магнитофон [4].

Лидар имеет простую конструкцию и надежен в эксплуатации. Многоканальный сканирующий океанографический лидар [213] разработан NASA и установлен на борт летающей лаборатории С-54. Этот лидар может использоваться для решения различных океанографических задач: в топографии и батиметрии; для исследования флуоресцентных характеристик объектов в спектральном диапазоне от 350 до 800 нм с разрешением 11,25 нм; для измерения времени затухания флуоресценции с временным разрешением от 8 до 150 нсек.

Лидар состоит из двух модулей: приемно-передающего и обработки данных. Приемно-передающий модуль имеет несколько блоков: блок системы сканирования и оптический блок. Оптический блок состоит из объектива системы Кассегрена диаметром 30,5 см, 40-канального спектрометра, блока флуоресцентных приемников (40 штук ФЭУ), батиметрического приемника, многоканального высоковольтного источника питания. В состав передающего блока могут входить лазеры различных типов: неоноый — для проведения батиметрических исследований, азотный —

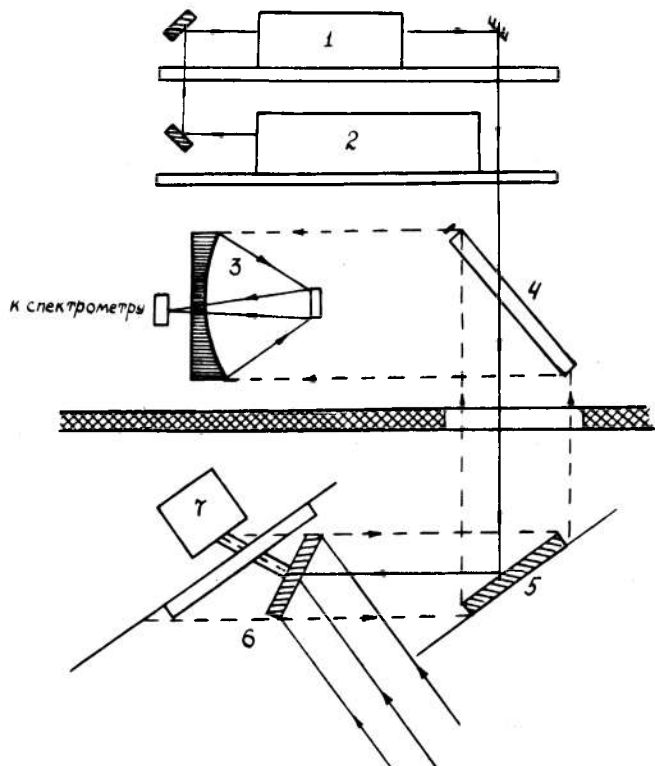


Рис. 75. Оптическая схема многоканального лидара: 1 — перестраиваемый лазер, 2 — эксимерный лазер, 3 — приемный объектив, 4, 5 — приемоподающее зеркало, 6 — сканирующее зеркало.

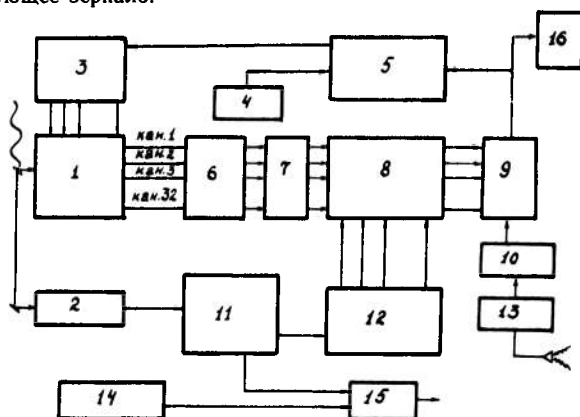


Рис. 76. Функциональная схема многоканального лидара, 1 — флуоресцентный детектор (ФЭУ), 2 — батиметрический ФЭУ, 3 — 32 — каналный высоковольтный источник питания, 4 — терминал, 5 — миниЭВМ, 6—32 — каналный усилитель, 7 — линия задержки, 8 — цифровой преобразователь; 9 — шина данных КАМАК, 10 — микропроцессор, 11 — аналогово-цифровой преобразователь, 12 — усилитель, 13 — радиометр, 14 — генератор старт-импульсов, 15 — высотомер, 16 — дисплей.

для возбуждения флуоресценции нефтепродуктов и для накачки перестраиваемого лазера на красителе, лазер на иттрий-алюминиевом гранате — для батиметрических исследований и для возбуждения флуоресценции хлорофилла, эксимерный — для накачки лазера на красителе, перестраиваемый лазер на красителе — для возбуждения флуоресценции исследуемых веществ. Конструкция лидара позволяет быстро проводить установку различных лазеров (рис. 75).

Система сканирования обеспечивает угол обзора 5° , 10° , и 15° с частотой сканирования 5 Гц. 40-канальный спектрометр имеет батиметрический и флуоресцентный канал. Он включает в себя светофильтр для подавления излучения лазера, зеркально отраженного от поверхности исследуемого объекта, дифракционную решетку, имеющую 600 штрихов на миллиметр, фокусирующую линзу и световодный коллектор из 40 кварцевых световодов. Батиметрический канал включает в себя узкополосный фильтр с полушириной полосы пропускания 0,4 нм, фокусирующую линзу и быстродействующий фотоприемник (рис. 76).

Модуль обработки данных лидара выполнен на основе мини-ЭВМ и микропроцессорной системы обработки информации в реальном масштабе времени (рис. 77).

В настоящее время это наиболее совершенный лидар, позволяющий решать многие задачи по дистанционному зондированию подстилающей поверхности. Однако большой вес, габариты и стоимость пока ограничивают его широкое применение.

4.3. О некоторых технических проблемах лидарных измерений

При работе с лидарами одной из основных проблем является выделение полезного сигнала на фоне помех. Помехи можно разделить на два вида: внешние и внутренние.

Основным источником внешних помех естественного происхождения является рассеяние подстилающей поверхностью солнечного излучения. На верхней границе атмосферы плотность потока солнечного излучения равна $1,98 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$ [10]. Спектральное распределение внеатмосферного солнечного излучения приближенно соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой $T = 5700\text{—}5800^\circ \text{ К}$. При прохождении солнечного излучения через атмосферу изменяется не только плотность потока излучения, но и его спектральный состав (рис. 78). В зависимости от прозрачности атмосферы плотность потока прямого излучения Солнца у поверхности Земли в околополуденные часы для умеренных широт колеблется в пределах $1,0\text{—}1,4 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$.

В дневное время рассеянное солнечное излучение практически преобладает над всеми формами шума. Плотность потока рассеянного излучения безоблачного неба около полудня находится в пределах $0,1\text{—}0,25 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$, а в условиях сплошной облачности —

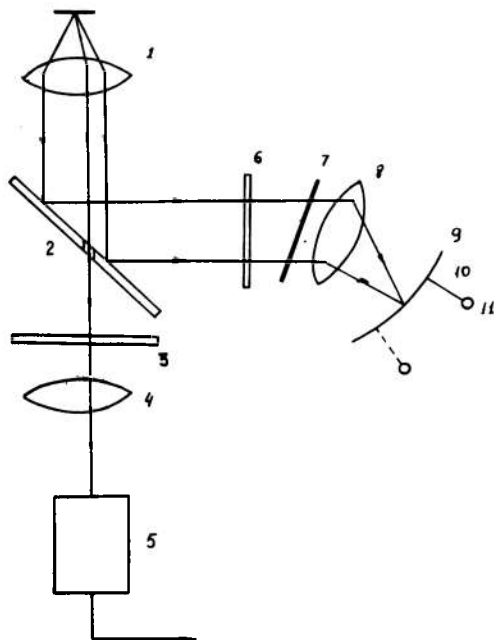


Рис. 77. Оптическая схема многоканального спектрометра: 1 — коллимирующая линза, 2 — делительное зеркало, 3 — батиметрический фильтр, 4 — фокусирующая линза, 5 — быстродействующий ФЭУ, 6 — жидкостный светофильтр, 7 — дифракционная решетка, 8 — фокусирующая линза, 9 — фокальная плоскость, 10 — кварцевые световоды, 11 — ФЭУ.

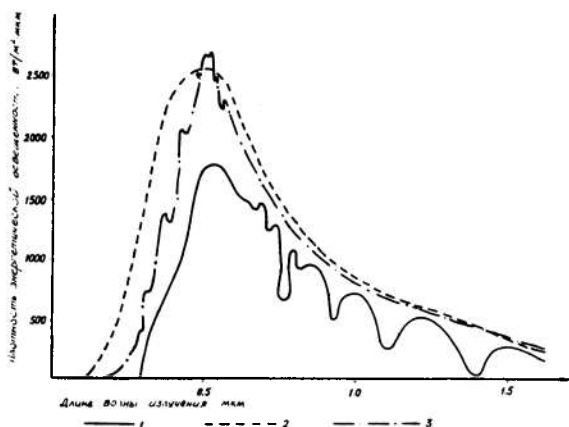


Рис. 78. Спектральная плотность энергетической освещенности Земли: 1 — кривая излучения абсолютно черного тела при $T=6000$ К; 2 — кривая излучения Солнца, наблюдаемая за пределами Земли; 3 — кривая излучения Солнца, наблюдаемая на поверхности Земли.

0,05—0,10 кал/см²мин [10]. На рис. 79 представлено спектральное распределение восходящих потоков рассеянного излучением поверхности моря солнечного излучения.

Восходящие потоки рассеянного излучения измерялись с борта самолета на высоте 200 м при высоте Солнца 55° в условиях слоистой облачности, нижняя кромка которой находилась на высоте 400 м, а верхняя — на высоте 950 м [42]. Отсутствие облачности приводит к росту величины восходящих потоков рассеянной радиации в несколько раз и более.

Приведенные в качестве примера данные позволяют наглядно представить уровни фоновых помех, вызванных рассеянной солнечной радиацией и имеющих место при лазерной флуоресцентной диагностике поверхности моря с малых высот. Если рассеянная подстилающей поверхностью солнечная радиация является основной внешней помехой для приемного канала лидара, то для его передающего тракта основной естественной помехой является атмосфера.

Атмосфера может оказывать существенное влияние на процесс распространения лазерного излучения, рассеивая и поглощая световую энергию [214].

Теоретически рассеяние может быть разделено на два различных типа в зависимости от соотношения между длиной волны рассеиваемого излучения и размером частиц, вызывающих рассеяние.

Молекулярное рассеяние (рассеяние Релея) имеет место, когда длина волны излучения много больше размера рассеивающих частиц. Тогда коэффициент объемного рассеяния σ_r определяется выражением:

$$\sigma_r = 4\pi^2 NV / \lambda^4 (n^2 - n_0^2 / n_0^2 + n^2)^2 \quad (48)$$

где N — плотность частиц, V — объем рассеивающих частиц, λ — длина волны излучения, n , n_0 — показатель преломления частиц и среды.

Так как коэффициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны, излучение более коротких волн рассеивается сильнее.

Дифракционное рассеяние (рассеяние Ми) имеет место в случае, когда длина волны излучения сравнима с размерами рассеивающих частиц. Для коэффициента рассеяния при этом можно записать выражение:

$$\sigma_{\text{Ми}} = 10^5 \cdot \pi \cdot \int_{a_1}^{a_2} N(a) \cdot K(a, n) a^2 da, \quad (49)$$

где $N(a)$ — число частиц в интервале $(a, a + da)$, $K(a, n)$ — поперечное сечение, a — радиус частиц, n — показатель преломления частиц.

Этот вид рассеяния является несимметричным: вперед рассеивается больше энергии излучения, чем назад.

Ми-рассеяние проявляется в видимой и ближней инфракрасной

Характеристики бортовых лидаров

№	Страна-изготовитель	Характеристики передатчика					Характеристики приемника					Назначение	Литература
		тип лазера	длина волны, нм	импульсная мощность, кВт*	длительность импульса, нс	частота генерации, Гц	тип оптической системы	диаметр объектива, мм светосила	тип фотоприемника	спектральный диапазон, нм	спектральное разрешение, нм		
1	США, МК II, 1964 г.	He—Ne	632	0,1*	—	—	—	—	фотодиод	632	4	получение изображения местности с борта самолета	[187]
2	США, AN/AVD2, 1968 г.	Ar	488—520	1*	—	—	телеобъектив	—	фото-пленка	488—520	40	получения изображения местности с борта самолета	[187]
3	США, Lapss, 1969 г.	Ar	488—520	10*	—	—	—	—	фотодиод	488—520	40	получение изображения местности с борта самолета	[187]
4	США, МКVIIIА, 1973 г.	Ga As	850	0,1	—	—	телеобъектив	—	фото-пленка	850	4	получение изображения местности с борта самолета	[187]
5	СССР, 1979 г.	He—Ne	632	$14 \cdot 10^{-3}$ *	—	—	объектив Кассегрена	$\frac{180}{2,8}$	ФЭУ-51	632	15	светодальномер для картографирования местности с высоким разрешением с борта самолета Ан-2	[211]
6	СССР, 1984 г.	N ₂	337	3	10	100	объектив Кассегрена	$\frac{90}{2,2}$	ФЭУ-84-3	337	40	двухканальный измеритель отражающих характеристик растительности для оценки ее геометрических параметров с борта вертолета Ка-26	[212]
7	СССР, 1979 г.	ИАГ: Nd ³⁺	1064 532	$3 \cdot 10^3$ 500	10	20	объектив Кассегрена	—	—	1064 532	15	лидар для обнаружения загрязнения водной поверхности нефтепродуктами с борта самолета Ил-18	[210]
8	СССР, 1976 г.	ИАГ: Nd ³⁺	532 355	500 80	10	100	телеобъектив	—	ФЭУ-100	—	—	флуориметр сканирующий многоканальный для исследования концентрации хлорофилла фитопланктона, температуры и солености воды с борта судна	[209]

№	Страна-изготовитель	Характеристики передатчика					Характеристики приемника					Назначение	Литература
		тип лазера	длина волны, нм	импульсная мощность, кВт*	длительность импульса, нс	частота генерации, Гц	тип оптической системы	диаметр объектива, мм светосила	тип фотоприемника	спектральный диапазон, нм	спектральное разрешение, нм		
9	США, 1973 г.	Родамин 6Ж с оптической накачкой	590	10^3	300	1/30	объектив Ньютона	190	ФЭУ	650—750 1 канал	4	флуориметр-профилومتر одноканальный для определения концентрации хлорофилла фитопланктона с борта вертолета Bell-204B	[203]
10	Япония, 1978 г.	ИАГ: Nd ³⁺	532 266	$3 \cdot 10^3$ 200	8	30	объектив Кассегрена	500 —	оптический многоканальный анализатор ОМА	350—700 10 каналов	5,5	флуориметр сканирующий многоканальный для обнаружения и идентификации нефтяных пленок на водной поверхности с берега	[205]
11	Канада, 1980 г.	N ₂	337	300	3	100	объектив Кассегрена	$\frac{205}{3,1}$	канальный усилитель изображения	386—690 16 каналов	20	флуориметр сканирующий, многоканальный для обнаружения нефтяных пленок на водной поверхности с борта самолета	[206]
12	ФРГ, 1981 г.	кумарин 6 с оптической накачкой	536	300	$3 \cdot 10^3$	1	объектив Ньютона	$\frac{200}{5}$	ФЭУ	595	10	флуориметр-профилومتر одноканальный для определения концентрации родамина Б, растворенного в воде с борта вертолета Bell-26	[197]
13	США, 1981 г.	кумарин 311 с оптической накачкой	470	200	250	1	линза Френеля	$\frac{300}{1,8}$	ФЭУ	560 685	10 20	флуориметр-профилومتر одноканальный для определения концентрации хлорофилла фитопланктона с борта вертолета	[204]
14	США, АОЛ, 1981 г.	Ne ИАГ: Nd ³⁺ краситель с лазерной накачкой	540 532 308/ 422 337— 600	10 $3 \cdot 10^3$ 700 3—30	3 8 5 8	400 50 25 100	объектив Кассегрена	$\frac{305}{4}$	ФЭУ	350—800 40 каналов	11, 25	флуориметр сканирующий многоканальный для картографирования флуоресцирующих объектов (хлорофилл, нефтепродукты, красители и др.) и батиметрических исследований с борта самолета С-54	[213]

№	Страна-изготовитель	Характеристики передатчика					Характеристики приемника					Назначение	Литература
		тип лазера	длина волны, нм	импульсная мощность, квт*	длительность импульса, нс	частота генерации, Гц	тип оптической системы	диаметр объектива, мм светосила	тип фото-приемника	спектральный диапазон, нм	спектральное разрешение, нм		
15	СССР, 1984 г.	ИАГ: Nd ³⁺ N ₂	532 337	10 ⁴ 25	10 8	10 100	объектив Кассегрена	$\frac{300}{4}$	ФЭУ	560, 620 651, 685	—	флуориметр-профилометр четырехканальный, для определения концентрации флуоресцирующих веществ и батиметрических исследований с борта самолета Ан-30	[207]
16	СССР, 1985 г.	N ₂	337	500	10	20	объектив Кассегрена	$\frac{355}{4}$	ФЭУ-84-3	440— 750 2 канала	10	флуориметр-профилометр двухканальный для диагностики физиологического состояния сельскохозяйственных посевов с борта вертолета Ми-8	[52]
17	СССР, 1985	N ₂	500	500	10	20	объектив Кассегрена	250 —	ФЭУ-79	440— 750	10	флуориметр сканирующий многоканальный для картографирования флуоресцирующих веществ на водной поверхности с борта вертолета Ми-8	[212]

* Для непрерывных лазеров мощность в ваттах.

областях спектра. Среднее значение коэффициента ослабления Ми-рассеяния $\sigma_{\text{Ми}}$ можно связать с видимостью эмпирическим соотношением:

$$\bar{\sigma}_{\text{Ми}} = 3,91/w (550/\lambda)$$

где w — дальность видимости, при которой пропускание излучения с длиной волны $\lambda = 550$ нм составляет 2% [195].

Кроме рассеяния, одним из основных факторов, определяющих спектральную зависимость ослабления излучения в атмосфере, является селективное молекулярное поглощение. Молекулярная структура составляющих атмосферу газов сложна и для определенного газа возможны несколько резонансных частот поглощения энергии излучения. Механизмы поглощения и рассеяния определяют спектральную зависимость коэффициента пропускания излучения в атмосфере (рис. 80). Влияние атмосферы на работу лидаров необходимо учитывать при зондировании подстилающей поверхности с больших высот, а также при использовании лазеров, излучающих в ультрафиолетовой области спектра.

Кроме внешних помех, на лазерные измерения существенное влияние оказывают внутренние помехи. Эти помехи обусловлены,

прежде всего, внутренними шумами аппаратуры. Причинами внутренних шумов аппаратуры могут быть такие факторы, как температура, влажность, давление, вибрации, акустические воздействия, электромагнитные наводки и другие, воздействующие на лидар и его отдельные элементы.

Конструктивные меры и средства борьбы с шумами, возникающими при воздействии указанных эксплуатационных факторов, лучше опробованы на практике, чем изучены в теоретических исследованиях. Имеются экспериментальные данные о влиянии температуры на параметры отдельных узлов лидара — главным образом на элементы приемников излучения и электронных схем [216].

Гораздо меньше известно о влиянии температуры на оптические элементы. Явно недостаточно изучено влияние вибраций, приводящих, например, к возникновению микрофонного шума в электронных блоках и броуновского шума в механических элементах приборов.

К важнейшим видам внутренних шумов лидара относятся шумы приемника и шумы электронных схем. Не останавливаясь подробно на физической природе и механизме действия отдельных видов шумов приемников излучения и электронных схем [215—

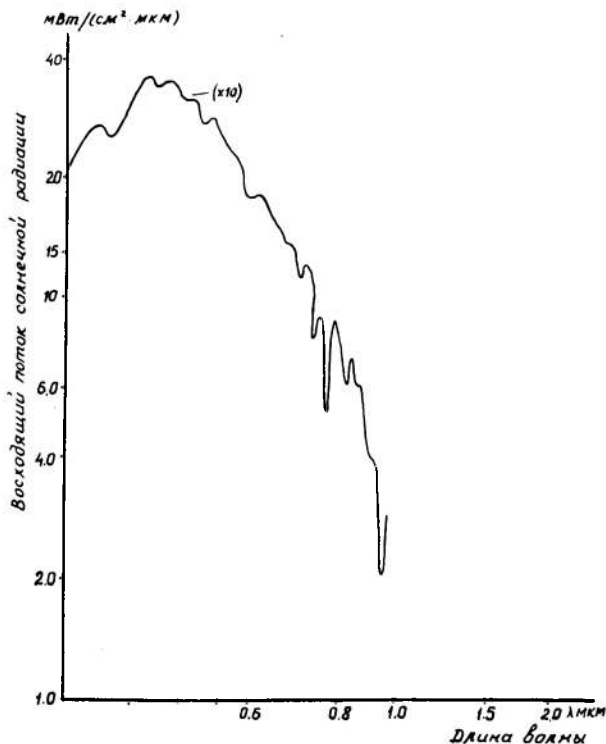


Рис. 79. Спектральное распределение потока восходящей от поверхности моря солнечной радиации на высоте 200 м при наличии слоистой облачности (нижняя кромка — 400 м, верхняя — 850 м).

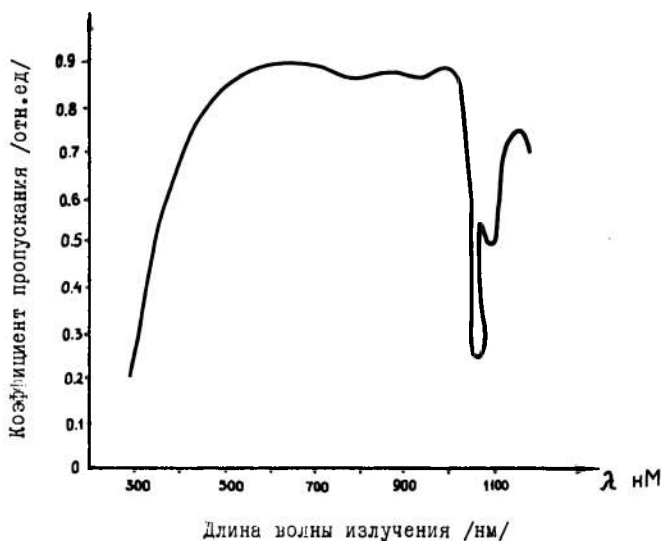


Рис. 80. Зависимость коэффициента пропускания чистой атмосферы от длины волны излучения.

217], приведем формулы спектральной плотности мощности основных составляющих шума и их краткие характеристики. Обратимся к таблице 16. Радиационный шум определяет минимально достижимый уровень регистрируемого потока излучения. Он возникает из-за флуктуаций числа фотонов, поступающих на чувствительный слой приемника и определяется как внешними фоновыми засветками, так и излучением частей самого приемника.

Т а б л и ц а 16.

Характеристика шумов приемников излучения.

Вид шума	Физическая природа	Спектральная плотность мощности шума	Примечание
Радиационный	Флуктуации потока излучения	$8\epsilon k\sigma A(T_{\phi}^5 + T_{\pi}^5)$	Для интегрального потока (тепловые приемники)
(фотонный)	Флуктуации числа фотонов	$\frac{\Phi\nu}{h\nu [1 - \exp(-\frac{h\nu}{kT_{\pi}})]}$	Для монохроматического потока (фотонные приемники)
Температурный	Флуктуации температуры	$\frac{4kT_{\pi}^2 x \frac{h\nu}{kT_{\pi}}}{x^2 + (2\pi f c)^2 [\exp(\frac{h\nu}{kT_{\pi}}) - 1]}$	Для монохроматического потока
Тепловой (Джонсона)	Флуктуации напряжения	$\frac{2kT_{\pi} R \frac{h\nu}{kT_{\pi}}}{\exp(\frac{h\nu}{kT_p}) - 1}$	при малых $\frac{h\nu}{kT_{\pi}}$ $V_w^2 = 4kT_{\pi} R \Delta f$
Дробовой	Флуктуация числа электронов (тока), образующих фототок	$2ei_0$	Для фотоэмиссионных приемников

T_{π} — температура приемника излучения; T_{ϕ} — температура фона; ϵ — излучательная (поглощательная) способность чувствительности слоя приемника; σ — постоянная Стефана-Больцмана ($5,69 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^2 \text{К}^{-4}$); A — площадь чувствительного слоя; k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-1}$); c — теплоемкость приемника; x — постоянная тепловых потерь приемника в окружающую среду; f — частота модуляции; h — постоянная Планка ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{Вт} \cdot \text{с}$); e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{К}$); $\Phi\nu$ — монохроматический поток излучения; i_0 — средняя величина фототока; Δf — полоса пропускания приемника.

Температурный шум возникает из-за флуктуаций температуры чувствительного слоя. Причины их могут заключаться в неустойчивости теплообмена между чувствительной площадкой приемника и окружающей средой, а также между отдельными элементами приемника.

Шум Джонсона возникает в электрических схемах лидара и обусловлен тепловым движением носителей тока в проводниках, в целом находящихся в тепловом равновесии.

Дробовой шум является типичным видом шума для электронно-вакуумных приборов и связан с флуктуацией числа электронов, образующих фототок. Эти виды шумов характерны для фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) — основного типа фотоприемника лидара. Для ФЭУ эти шумы определяются несколькими факторами: типом ФЭУ, характеристиками фотокатода, коэффициентом усиления, сведениями о предшествующем использовании. Основным источником внутренних шумов ФЭУ является темновой ток, возникающий вследствие процессов термо- и автоэлектронной эмиссии с электродов. Он имеет величину от 10^{-13} до 10^{-17} А при комнатной температуре. Следует отметить, что темновой ток может быть понижен до величины порядка одного электрона в секунду путем охлаждения ФЭУ [218].

Для сведения до минимума влияния как внутренних, так и внешних помех на лидарные измерения применяются следующие способы защиты от помех. Борьба с помехами ведется двумя методами: путем рационального конструирования прибора и путем выбора оптимального способа обработки принятого сигнала.

Как было показано выше, существенное влияние на работу приемного канала лидара оказывают влияние помехи в виде рассеянной солнечной радиации. Если эта помеха и полезный сигнал находятся в разных частях спектра принимаемого излучения, то в этом случае для устранения помехи используются оптические фильтры. Обычно для этой цели применяют абсорбционные и интерференционные фильтры. Особенностью использования интерференционных фильтров при работе с ультрафиолетовыми лазерами является возможная флуоресценция этих фильтров под воздействием рассеянного лазерного излучения [219]. Этот эффект устраняется подбором фильтров с малой флуоресценцией, а также использованием жидкостных светофильтров [196].

В случае, когда источник оптических помех находится за пределами поля зрения приемника (боковые помехи) — используют бленды. Они предназначены для снижения интенсивности рассеянного на элементах конструкции приемника лидара излучения от источника боковых помех. Одним из основных параметров бленды является отношение освещенности от боковой помехи на входе бленды к освещенности, создаваемой рассеянным светом на ее выходе — коэффициент ослабления бленды ($K_{осл.} = 5 \cdot 10^8$), круговые ($K_{осл.} = 0,5 \cdot 10^6$), кольцевые ($K_{осл.} = 10^5$), сотовые ($K_{осл.} = 10^3$) (рис. 81). Практически во всех случаях для уменьшения уровня

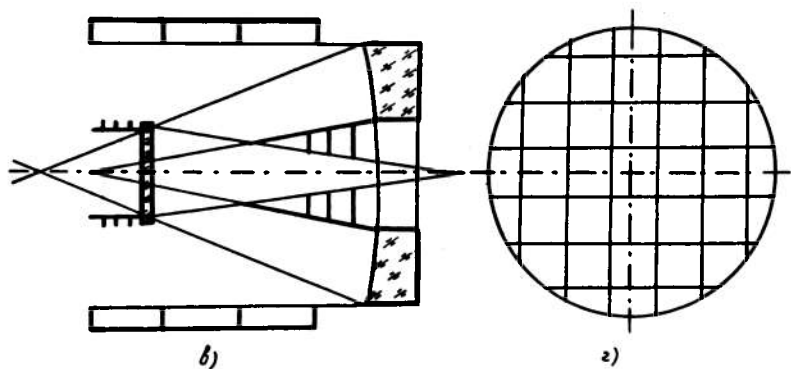
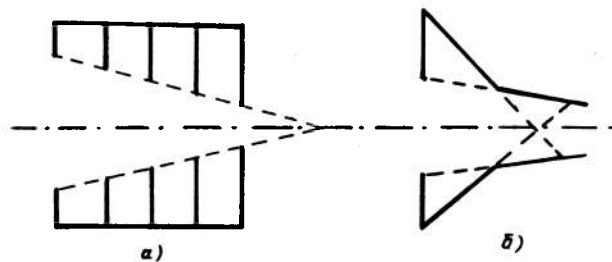


Рис. 81. Типы бленд: а — круговая; б — двойная; в — кольцевая; г — сотовая с квадратной ячейкой.

прямых и боковых оптических помех используется диафрагмирование поля зрения приемника.

Одним из эффективных способов снижения уровня внешних помех при работе с импульсными лазерами является стробирование фотоприемника и электронного тракта лидара на время прихода полезного сигнала. Стробирование проводится с использованием скоростных оптических затворов, размещенных перед фотокатодом ФЭУ, или управлением работой ФЭУ с помощью питающего напряжения. Этот способ позволяет реализовать предельную чувствительность приемной системы за счет подавления шумов ФЭУ и значительного ослабления светового фона зондируемой поверхности. При использовании в лидарах непрерывных лазеров существенное повышение соотношения сигнал-шум достигается за счет модуляции лазерного излучения по амплитуде в узком частотном диапазоне с последующей обработкой принятого сигнала на частоте модуляции [202].

В настоящей главе освещены лишь некоторые аспекты конструирования и эксплуатации бортовых лидаров. Этот вопрос охватывает очень широкий круг задач науки и техники и представляет собой самостоятельное направление. В ближайшие годы следует ожидать бурного развития этого направления в различных областях народного хозяйства.

Заключение

Приведенный в монографии обширный теоретический и экспериментальный материал убедительно доказывает, что лазерные методы занимают одно из первых мест в дистанционных исследованиях растительности. Эти методы позволяют всестороннее исследовать растительность как на популяционном, так и на клеточном и организменном уровне. Информация, получаемая при зондировании растительности с помощью лазерных систем, не может быть получена путем использования традиционных пассивных методов. Это, прежде всего, относится к определению геометрических параметров растений суши на основе измерений их отражательных характеристик в малой области углов обратного рассеяния и к оперативной оценке физиологических параметров растений по их люминесцентным характеристикам. Арсенал методов зондирования растительности в оптическом диапазоне еще далеко не исчерпан и в ближайшие годы следует ожидать их бурного развития.

1. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральные отражательные свойства растительности и почв. Л.: Гидрометеиздат, 1982, 216 с.
2. Космические исследования земных ресурсов. Методы и средства измерений и обработка информации. М.: Наука, 1976. 384 с.
3. Каневский В. А., Росс Ю. К. Применение метода Монте-Карло для исследования влияния архитектуры хвойного дерева на угловую зависимость его коэффициента спектральной яркости. — Исслед. Земли из космоса, 1983, № 4, с. 100—102.
4. Каневский В. А., Рязанцев В. Ф., Мовчан Я. И. Использование лазерных систем с пространственно разнесенными приемными каналами для дистанционных исследований фитометрических параметров растительности — Исслед. Земли из космоса, 1986, № 1, с. 84—87.
5. Карнаухов В. Н. Люминесцентный спектральный анализ клетки. М.: Наука, 1978, 207 с.
6. Рубин Б. А., Гавриленко В. Ф. Биохимия и физиология фотосинтеза. М.: МГУ, 1977, 286 с.
7. Frank E., Noge R., Swift K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants. — Appl. Opt., 1983, vol. 22, № 19, p. 2991—3000.
8. Каневский В. А. Федак В. С., Рязанцев В. Ф. и др. Опыт применения электронно-оптических систем для дистанционного исследования люминесценции растений. — Исслед. Земли из космоса, 1983, № 6, с. 87—90.
9. Шифрин К. С., К теории альбедо. Труды ГГО, 1953, вып. 39, № 101, с. 244—257.
10. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1975, 342 с.
11. Тамме Э., Сырмус И. О решении уравнения переноса излучения для анизотропного рассеяния. Изв. АН ЭССР, Физика, Математика, 1967, № 4, с. 412—418.
12. Анисимов О. А. Менжулин Г. В., Фертман А. Я. О решении задач переноса радиации в растительности с использованием численных методов. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 16—19.
13. Росс К., Нильсон Т., Росс Ю. Модель расчета радиационного режима растительного покрова. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 12—15.
14. Руднев Н. И. Модель переноса энергии излучения в деятельном слое леса. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 40—42.
15. Нильсон Т. Теория пропускания радиации неоднородным растительным покровом. — В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом, Таллин, 1977, с. 7—70.
16. Нильсон Т. Расчет эффекта обратного блеска для древостоев. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). 1980, с. 117—120.
17. Каневский В. А. Росс Ю. К., Рязанцев В. Ф. и др. Исследование архитектуры растительности по ее обратному блеску с помощью дистанционного лазерного зондирования. — Исслед. Земли из космоса, 1983, № 5, с. 81—84.
18. Кууск А. Эффект обратного блеска однородного растительного покрова. — Исслед. Земли из космоса, 1983, № 4, с. 90—99.
19. Кууск А. Обратный блеск пластинчатой среды. В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 121—125.
20. Марчук Г. И. Методы расчета ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1961, 666 с.
21. Марчук Г. И. Уравнение для ценности информации с метеорологических спутников и постановка обратных задач. — Космические исследования, 1964, т. 2, № 3, с. 462—477.
22. Марчук Г. И., Михайлов Г. А. О решении задач атмосферной оптики методом Монте-Карло. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967, т. 3, № 4, с. 258—273.
23. Марчук Г. И., Михайлов Г. А., Назаралиев М. А., Дарбинян Р. А. Решение прямых и некоторых обратных задач атмосферной оптики методом Монте-Карло. Новосибирск, Наука, 1968, 100 с.

24. Михайлов Н. А., Назаралиев М. А. Оптимизация оценки функциональных зависимостей методом Монте-Карло. — Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1970, т. 10, № 3, с. 734—740.
25. Михайлов Г. А., Назаралиев М. А. Расчет поляризации света в сферической атмосфере методом Монте-Карло. — Изв. АН СССР, Сер. физика атмосферы и океана, 1971, т. 7, № 4, с. 385—395.
26. Михайлов Н. А. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. М.: Наука, 1974, 142 с.
27. Михайлов Г. А. Модификация локальной оценки потока частиц методом Монте-Карло. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1983, т. 13, № 3, с. 574—582.
28. Tanaka S. Estimation of sinlit leaf area in tobacco plant community by the Monte-Carlo method. Estimation of sky radiation. — In: Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III Experiments 1969. Tokyo, 1970, p. 80—84.
29. Smith J. A., Oliver R. E. Plant canopy models for simulating composite scene spectroradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer region. — In: Proc. 8 th Int. Symp. Remote Sensing Environment. Michigan, 1972, p. 1333—1353.
30. Shwarcbaum I., Shaviv G. A Monte-Carlo model for the radiation field in plant canopies. — Agric. Meteorol., 1976, vol. 17, № 5, p. 333—352.
31. Tanaka S. Estimation of sinlit leaf area in tobacco plant community by the Monte-Carlo method. Estimation of direct sunlight. — In: Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III Experiments 1968. Tokyo, 1969, p. 76—79.
32. Каневский В. А., Росс Ю. К. Расчет радиационного режима ели методом Монте-Карло. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии, Таллин, 1980, с. 8—11.
33. Каневский В. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование радиационного режима хвойного дерева методом Монте-Карло. Препринт. Тарту, 1982, 32 с.
34. Каневский В. А., Росс Ю. К., Рязанцев В. Ф. Изучение архитектуры растительного покрова с помощью дистанционного лазерного зондирования. — Докл. АН УССР, 1982, сер. Б, № 6, с. 56—58.
35. 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.
36. Красильщиков Л. Б. Некоторые результаты измерений спектральных индикатрис коэффициентов яркости естественных поверхностей. — В кн.: Труды 2-го межведомственного совещания по актинометрии и атмосферной оптике. Л.: Гидрометеониздат, 1961, с. 15—18.
37. Brennau B., Bandoen W. R. Anisotropic reflectance characteristics of natural Earth's surfaces. — Appl. Opt., 1970, vol. 9, № 12, p. 1419—1423.
38. Корзов В. И. Методические вопросы измерения спектрального альбеда с самолета. — Труды ГГО, 1976, вып. 370, с. 72—81.
39. Шифрин К. С., Коломийцев В. Ю. Влияние анизотропии отражения от подстилающей поверхности на определение потока уходящей коротковолновой радиации по измерениям с ИСЗ. — Труды ГГО, 1968, вып. 221, с. 57—60.
40. Герман А. И. Измерение углового распределения интенсивности коротковолновой радиации с автостратостатов. — Труды ЦАО, 1966, вып. 70, с. 42—45.
41. Ючевич Ю. К. Оптические характеристики природных образований. — В кн.: Исследование оптических свойств природных объектов и их аэрофотографические изображения. Л.: Наука, 1970, 325 с.
42. Кондратьев К. Я., Биненко В. И., Дьяченко Л. Н. и др. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1981, 232 с.
43. Корзов В. И. Красильщиков Л. Б. Самолетные приборы для измерения отражения. Спектральный индикатометр. — В кн.: Труды ГГО, 1972, вып. 275, с. 219—225.
44. Росс К., Аплей В., Ахо А и др. Индикатрисы отражения некоторых растительных объектов. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 113—116.
45. Куус А., Антон Я., Нильсон Т. и др. Индикатрисы отражения растительных покровов. — Исслед. Земли из космоса, 1984, № 5, с. 68—75.
46. Сулев М. Четырехканальный телеспектрофотометр. — В кн.: XI Всесоюзное совещание по актинометрии (тез. докл.). Таллин, 1980, с. 153—155.

47. Каневский В. А., Росс Ю. К., Шварева С. Г. и др. Применение ручного спутникового спектрографа РСС-2 для измерения с борта самолета углового распределения отраженной от растительного покрова солнечной радиации. — Украинский ботанический журнал., 1981, т. 37, № 3, с. 67—69.
48. Рвачев В. П. Методы оценки светорассеивающих сред в физике и биологии. Минск: Изд. БГУ им. В. И. Ленина, 1978, 240.
49. Харин Н. Г. Дистанционные методы изучения растительности. М.: Наука, 1980, 102 с.
50. McFarlane J. C., Watson R. D., Tteisen A. F. Plant stress detection by remote measurement of fluorescence. — Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 3287—3289.
51. Hemphill W. R., Stoertz G. E., Markle D. Remote sensing of luminescent materials. — Proc. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. Michigan, 1969, p. 565—585.
52. Каневский В. А., Рязанцев В. Ф., Перекрест О. Н. и др. О возможности дистанционной лазерной диагностики состояния сельскохозяйственных культур по их люминесцентным характеристикам. — Исслед. Земли из космоса, 1985, № 6, с. 37—39.
53. Власов Д. В., Букин А. Ф., Слободянин В. П. и др. Использование лазеров в океанографии. — Журнал прикладной спектроскопии, 1982, т. 37, № 4, с. 533—540.
54. Emmet W. Chapelle, Frank M. Wood, Gr. Games. Lazer-induced fluorescence of green plants. A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation. — Appl. Opt., 1984, vol. 23, B 1, p. 134—142.
55. Watson R. D., Hemphill W. R. Use of airborne Fraunhofer line discriminator for the detection of solar stimulated luminescence. — Geological Sirvey Open-File Report 76—202. USA, 1976, 110 p.
56. Клейтон Р. Фотосинтез: Физические механизмы и химические модели. М.: Мир, 1984, 350 с.
57. Гуринович Г. П., Севченко А. Н., Соловьев К. Н. Спектроскопия хлорофилла и родственных соединений. Минск: Наука и Техника, 1968, 420 с.
58. Chapelle E. W., McMirtrey J. E., Frank M. W. Laser-induced fluorescence of green plants caused by nutrient deficiencies in corn. — Appl. Opt., 1984, vol. 23, № 1, p. 139—142.
59. Chappelle E. W., Frank M. W., Newcomb J. W. Laser-induced fluorescence of green plants. LIF spectral signatures of five major plant types. — Appl. Opt., 1985, vol. 24, № 1, p. 74—80.
60. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. — Л., Наука, 1982, 304 с.
61. Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. т. 1, Л.: Наука, 1969, 657 с.
62. Woblewski J. S., O'Brien J. J. A spatial model of phytoplankton patchiness. — Marine Biology, 1976, vol. 35, p. 161—175.
63. Denman K. L. The chlorophyll fluctuation spectrum in the sea. — Limnol. Oceanogr., 1977, vol. 22, № 6, p. 1033—1037.
64. Jones R. I., Francis R. C. Dispersion patterns of phytoplankton in lakes. — In: Lakes and water management. Proc. of the 30 — year Symposium of the Finnish Limnological Society. Helsinki, 22—23 September 1980. Eds. Limavirta V., Jones R. I., Person P.-E. — Hague: W. Junk Publ., 1982, p. 21—28.
65. Арст Х. Ю., Каск Х. К., Сомер В. Ю. К вопросу об интерпретации спектров диффузного отражения моря. — В кн.: Исследование изменчивости оптических свойств Балтийского моря. Таллин, 1983, с. 89—111.
66. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977, 398 с.
67. Limavirta V. Dynamics of phytoplankton in Finnish lakes. — In: Lakes and water management. Proc. of the 30-uear Symp. of the Finnish Limnological Societu. Helsinki, 22—23 September 1980. Eds. V. Limavirta, R. I. Jones, Person P.-E. Hague, 1982, W. Junk Publ., 1982, p. 11—20.
68. Давыдова Н. Н., Петрова Н. А. Эколого-систематическая характеристика водорослей Ладожского озера. — В кн.: Растительные ресурсы Ладожского озера. Л. 1986, с. 175—199.
69. Петрова Н. А. Фитопланктон Ладожского озера. — В кн.: Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Изд-во ЛГУ, 1968, ч. с. 73—131.

70. Бекасова О. Д., Цветкова А. М., Евстигнеев В. Б. Об изменениях пигментной системы океанического фитопланктона. — В кн.: Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: 1975, с. 235—242.
71. Карабышев Г. С., Бекасова О. Д. О соотношении между концентрацией и люминесценцией пигментов океанического фитопланктона. — В кн.: Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975, с. 95—99.
72. Карабышев Г. С. Q неконтактном зондировании океана. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск. Наука, 1979, с. 68—80.
73. Сидько Ф. Я., Франк Н. А., Шур Л. А. и др. Исследование распределения хлорофилла фитопланктона в Красноярском водохранилище и на р. Енисей. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск. Наука, 1979, с. 297—299.
74. Yentsch C. S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. — *Limnol. and Oceanogr.*, 1962, vol. 7, p. 207—217.
75. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Изд-во Наука и техника, 1975, с. 504.
76. Бульон В. В. Содержание феопигментов в планктоне. — Гидробиологический журнал, 1978, т. 16, № 3, с. 62—70.
77. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. — *Limnol. and Oceanogr.*, 1967, vol. 12, p. 343—346.
78. Marker A. F. H., Nusch E. A., Rai H. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: conclusions and recommendations. — *Ergebnisse der Limnologie*, 1980, Beiheft 14, s. 91—106.
79. Moss B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheopigments in extracts of algal. — *Limnol. and Oceanogr.*, 1976, vol. 12, p. 335—340.
80. Nusch E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. — *Ergebnisse der Limnologie*, 1980, B. 14, s. 14—36.
81. Daley R. J., Gray C. B., Brown S. R. A quantitative semiroutine method for determining algal and sedimentary chlorophyll derivatives. — *J. Fish. Res. Board. Can.*, 1973, vol. 30, № 3, p. 345—356.
82. Yentsch C. S., Menzel D. W. A method for determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. — *Deep-Sea Res.*, 1963, vol. 10, № 3, p. 221—231.
83. Петрова Н. А. Итоги применения метода люминесцентного анализа при изучении фитопланктона Ладожского и Онежского озер. — В кн.: Вопросы современной лимнологии. Л.: Наука, 1973, с. 195—207.
84. Кобленц-Мишке О. И., Ведерников В. И. Первичная продукция. — В кн.: Биология океана. М.: Наука, 1977, т. 2, с. 183—209.
85. Бондаренко А. И. Сезонные изменения содержания хлорофилла в среднем Каспии в 1976 г. — *Океанология*, 1981, т. 21, вып. 4, с. 691—698.
86. Сидько Ф. Я., Шерстянкин П. П., Апонасенко А. Д. и др. Исследование пространственного распределения фитопланктона озера Байкал оптическими методами. — *Исследование Земли из космоса*, 1983, № 5, с. 11—15.
87. География озер Таймыра. Л.: Наука, 1985, 186 с.
88. Трифонова И. С. Содержание хлорофилла и феопигментов в фитопланктоне Ладожского озера в 1975—1976 гг. — В кн.: Биология внутренних вод. Л.: Наука, 1981, с. 12—22.
89. Кобленц-Мишке О. И., Пелевин В. Н., Семенова М. А. Пигменты фитопланктона и использование солнечной энергии в процессе фотосинтеза. — В кн.: Экосистемы пелагиали Тихого океана. М.: Наука, 1975, с. 140—152.
90. Yentsch C. S. Distribution of chlorophyll and phaeophytin in the open ocean. — *Deep-Sea Res.*, 1965, vol. 12, № 5, p. 653—666.
91. Ведерников В. И., Коновалов Б. В., Кобленц-Мишке О. И. Результаты применения спектрофотометрического метода определения феофетина «а» в пробах морской воды. — *Труды ин-та океанологии АН СССР*, 1973, т. 95, с. 138—146.
92. Пырина И. Л., Десяткин В. Г., Елизарова В. А. Экспериментальное изучение влияния подогрева на развитие и фотосинтез фитопланктона. — *Труды ИБВВ АН СССР*, 1975, № 30, с. 67—84.
93. Оптика океана. Том I. Физическая оптика океана. — М.: Наука, 1983, 372 с.

94. Скопинцев Б. Л. Органическое вещество в воде океанов. — В кн.: Успехи советской океанологии. — М.: Наука, 1979, с. 64—86.
95. Gagosian R. B., Stuevermer D. H. The cycling of biochemical sompounds and their diagenetically transformed products in the sea water. — *Mar. shem.*, 1977, vol. 5, p. 605—632.
96. Кузнецов С. И. Микрофлора озера и ее геохимическая деятельность. — Л.: Наука, 1970. 440 с.
97. Bukata R. P., Bruton J. E., Jerome J. H. et al. Optical water quality model of lake Ontario. II: Delermination of chlorophyll and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. — *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, № 9, p. 1704—1714.
98. Kalle K. The problem of the Gellstoff in the sea. — *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, 1966, vol. 4, p. 91—104.
99. Shapiro J. Chemical and biological studies on the yellow organic acids of lake water. — *Limnol. and Oceanogr.*, 1957, vol. 2, p. 161—179.
100. Atkins W. R. G., Poole H. H. An experimental study of the scattering of light by natural waters. — *Proc. Roy. Soc. London*, 1952, Ser. B., vol. 140, p. 321—338.
101. Пелевина М. А. Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворенным органическим желтым веществом в водах Балтийского моря. — В кн.: Световые поля в океане. — М.: ИОАН СССР, 1979, с. 92—97.
102. Plass G. N., Humphreys T. G., Kattawar G. W. Color of the ocean. — *Appl. Opt.*, 1978, vol. 17, № 9, p. 1432—1446.
103. Ерлов Н. Г. Оптика моря. — Л.: Гидрометеониздат, 1980, 248 с.
104. Карабышев Г. М., Соловьев А. Н., Зингалис К. П. Фотолюминесценция вод Атлантического и Тихого океанов. — В кн.: Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. — М.: Наука, 1974, с. 143—149.
105. Brown M. Laboratory measurements of fluorescence spectra of Baltic waters. — *Rep. Inst. Fys. Oceanogr. Univ., Copenhagen*, 1974, № 29.
106. Карбышев Г. С. О неконтактном флюоресцентном зондировании океана. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск. Наука, 1979, с. 68—80.
107. Сидько Ф. А., Ерошин К. С., Белянин В. Н. Исследование оптических свойств популяций одноклеточных водорослей. — В кн.: Непрерывное управляемое культивирование микроорганизмов. — М.: Наука, 1976, с. 38—69.
108. Kalle K. Chemische Untersuchungen in der Irminger sea in Juni 1955. — *Beitr. Dtsch. Komm. Meeresforsch.*, 1957, vol. 14, s. 313—328.
109. Лисицин А. П., Богданов Ю. А. Гранулометрический состав взвеси Тихого океана. — *Океанологические исследования*, 1968, № 18, с. 53—74.
110. Родина А. Г. Кормовое значение и строение детрита. — В кн.: Биологические ресурсы водоемов, пути их реконструкции и использования. — М.: Наука, 1966, с. 35—42.
111. Inoue N., Nishizawa S., Fukida M. The perfection of a turbidity meter and the photographic study of suspended matter and plankton in the sea using an undersea observation chamber. — In: *Proc. UNESCO Symp. Phys. Oceanogr.*, Tokyo, 1955, p. 53—58.
112. Bukata R. P., Jerome J. H., Bruton J. E. Optical water quality model of lake Ontario. I: Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in lake Ontario. — *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, № 9, p. 1696—1714.
113. Brun-Cottan J. C. Etude de la granulométrie des particules marines: mesures effectiées avec un compteur Coulter. — *Cah. océanogr.*, 1971, vol. 23 (2), p. 193—205.
114. Шифрин К. Я., Копелевич О. В., Буренков В. И. Использование индикатрис расcеяния для исследования морской взвеси. — В кн.: Оптика океана и атмосферы. — Л., Наука, 1972, с. 25—44.
115. Карабышев Г. С., Бекасова О. Д. О соотношении между концентрацией и люминесценцией пигментов океанического фитопланктона. — В кн.: Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. — М.: Наука, 1975, с. 95—99.
116. Маньковский В. И. Экспериментальные и теоретические данные о точке пересе-

- чения индикатрис рассеяния света морской взвеси. — И в. АН СССР, сер. ФАО, 1975, т. 11, № 12, с. 1284—1293.
117. Jonasz M. The particle size distribution in the Baltic. — In: Proc. of the XMMM Conf. of Baltic oceanographers, 24—27 August 1982, vol. 11. Helsinki, p. 406—419.
 118. Кобленц-Мишке О. И., Коновалов Б. В. Спектральное поглощение лучистой энергии морской взвесью. — В кн.: Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. — М.: Наука, 1974, с. 280—292.
 119. Harris J. E. Characterization of suspended matter in the Gulf of Mexico. — Deep-Sea Res., 1977, vol. 24 (11), p. 1055—1061.
 120. Sheldon R. W., Prakash A., Sutcliffe W. H. The size distribution of particles in the ocean. — Limnol. and Oceanogr., 1972, № 3, p. 327—340.
 121. Zaneveld J. R. V., Roach D. M., Pak H. The determination of the index of refraction distribution of oceanic particulates. — J. Geophys. Res., 1974, vol. 79, p. 4091—4095.
 122. Коновалов Б. В. Некоторые особенности спектрального поглощения взвеси морской воды. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск, Наука, 1979, с. 58—65.
 123. Буренков В. И., Копелевич О. В. Использование данных светорассеяния для исследования морской взвеси. — В кн.: Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. — М.: Наука, 1974, с. 116—123.
 124. Маньковский В. И. Характеристики индикатрис рассеяния света в водах озера Байкал. — В кн.: Автоматизация лимнологических исследований и световой режим водоемов. — Новосибирск: Наука, 1984, с. 125—138.
 125. Винберг Г. Г. Содержание хлорофилла как показателя количественного развития фитопланктона. — В кн.: Вопросы экологии, т. 1, Минск, 1957, с. 15—18.
 126. Gordon H. R., Brown O. B., Jacobs M. M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. — Appl. Opt., 1975, vol. 14, p. 417—427.
 127. Козлянинов М. В., Пелевин В. Н. Об использовании одномерного приближения при исследовании распространения оптического излучения в море. — Тр. ИОАН СССР, 1965, т. 77, с. 73—79.
 128. Preisendorfer R. W. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. — Hydrologic Optics, 1976, vol. 5, p. 16—27.
 129. Morel A., Prieur L. Analysis of variation in ocean color. — Limnol. Oceanogr., 1977, vol. 22, p. 709—722.
 130. Kirk J. T. Monte Carlo study of the nature of the underwater light field and the relationships between optical properties of turbid yellow waters. — Aust. J. Mar. Freshwater Res., 1981, vol. 32, p. 517—532.
 131. Bukata R. P., Bruton J. E., Jerome J. H. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. — Remote Sens. Environ., 1983, vol. 13, p. 161—177.
 132. Bukata R. P., Jerome J. H., Bruton J. E. Optical water quality model of lake Ontario. I: Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in lake Ontario. — Appl. Opt., 1981, vol. 20, № 9, 1696—1714.
 133. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Дистанционные методы слежения за качеством природных вод. Л.: Наука, 1985, 64 с.
 134. Smith R. C., Baker K. S. Optical classification of natural waters. — Limnol. Oceanogr., 1978, vol. 23, № 2, p. 260—267.
 135. Kiefer D. A., Olson R. L., Wilson W. H. Reflectance spectroscopy of marine phytoplankton. Part I. Optical properties as related to age and growth rate. — Limnol. Oceanogr., 1979, vol. 24, № 4, p. 664—673.
 136. Yentsch C. S. The influence of phytoplankton pigment on the colour of sea water. — Deep-Sea Res., 1960, vol. 7, p. 1—9.
 137. Doerffer R. Light field fluctuations in the photic zone. — Arch. Hydrobiol., 1979, vol. 86, p. 119—123.
 138. Трифонова И. С. Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка. Л.: 1979, 168 с.
 139. Хит О. Фотосинтез, М., 1972, 315 с.
 140. Bricaud A., Morel A., Prieur L. Optical efficiency factors of some phytoplankters. — Limnol. Oceanogr., 1983, vol. 28, № 5, p. 816—832.

141. Bryant F. D., Seiber B. A., Latimer P. Absolute optical cross sections of cells and chloroplasts. — Arch. Biochem. Biophys., 1969, vol. 135, p. 79—108.
142. Gordon H. R. Spectral variations in volume scattering function at large angles in natural waters. — J. Opt. Soc. Amer., 1974, vol. 64, p. 773—775.
143. Morel A., Bricaud A. Theoretical result concerning the optics of phytoplankton with special reference to remote sensing applications. — In: Oceanography From Space CASPAR/SCOR/IUCRM Symp. Plenum, 1981, p. 313—327.
144. Motoaki K., Booth Ch. R., Okami N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter, and pure water. — Limnol. Oceanogr., 1984, vol. 29, № 2, p. 340—349.
145. Smith R. C. Remote sensing and depth distribution of ocean chlorophyll. — Mar. Ecology Progr. Ser., 1981, vol. 5, p. 359—361.
146. Fischer J., Gassel H. Upward radiances in and above an ocean depending on phytoplankton, sediment, yellow substances and bacteris concentration. — In: A Collection of extended abstracts presented at the Symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of ocean properties. IAMAP Third Scientific Assembly, 17—28 August 1981, Hamburg, FRG. — Boulder, Solorado: Rublisation of COSPAR, 1981, p. 73—75.
147. Gordon H. R. Remote sensing of optical properties in continously stratified waters. — Appl. Opt., 1978, vol. 17, № 12, p. 1893—1897.
148. Gordon H. R., Clark D. K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. — Appl. Opt., 1980 a, vol. 19, № 20, p. 3428—3430.
149. Zaneveld J. R. V. Remotely sensed reflectance and its dependence on vertical structure: a theoretical derivation. — Appl. Opt., 1982, vol. 24, № 22, p. 4146—4150.
150. Халтурин В. И., Толкаченко Г. А. Оценка возможностей дистанционного определения неоднородностей вертикальной стратификации океана. — В кн.: Неcontactные методы океанографических параметров. М. 1983, с. 112—116.
151. Fischer J., Koepeke P. The influence of perturbing water properties in chlorophyll mapping. — Proc. of IGARSS'84 Symp., Strasbourg 27—30 August 1984. — Strasbourg: ESA Scientific Technical Publications Branch, 1984, p. 709—713.
152. Kirk J. T. O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. — Limnol. Oceanogr., 1984, vol. 29, № 2, p. 350—356.
153. Austin R. W. The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface. — In: Optical Aspects of Oceanography, N. G. Jerlow & E. S. Nielsen, Eds. — London: Academic Press, 1974, p. 317—344.
154. Kondratyev K. Ya. Radiation processes in the atmosphere. — WMO Monogr. № 309, Geneva, 1972, 214 r.
155. Neville R. A., Gower J. F. R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence. — J. Geophys. Res., 1977, vol. 82, № 24, p. 3487—3493.
156. Gordon H. R. Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685 nm. — Appl. Opt., 197a, vol. 18, № 18, p. 1161—1166.
157. Kiefer D. A. Fluorescence properties of natural phytoplankton populations. — Mar. Biol., 1973, vol. 22, p. 263—269.
158. Gordon H. R. Estimation of the depth of sinlight penetration in natural waters for the remote sensing of chlorophyll-a via in vivo fluorescence. — Appl. Opt., 1979b, vol. 18, № 12, p. 1883—1884.
159. Gower J. F. R. Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. — Boundary-Layer Meteorol., 1980, vol. 18, p. 235—245.
160. Heaney S. I. Some observations of the in vivo fluorescence technique to determine chlorophyll-a in natural populations and cultures of fresh water phytoplankton. — Freshwater Biology, 1978, vol. 8, p. 115—126.
161. Yentsch C. S., Yentsch C. M. Fluorescence spectral signatures: the characterization of phytoplankton populations by the use of excitation and emission spectra. — J. Mar. Res., 1979, vol. 37, № 3, p. 471—483.
162. Yentsch C. S., Phinney D. A. Spectral fluorescence: an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations. — Bigelow Laboratory for Ocean Sciences Contributions, 1984, № 84019, 30 p.

163. Gower J. F. R. On the possibility of observing natural chlorophyll-a fluorescence from space. — In: A Collection of extended abstracts presented at the Symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of ocean properties. IAMAP Therd Scientific Assembly, 17—28 August 1981, Hamburg, FRG. — Boulder, Colorado: Publication of COSPAR, 1981, p. 113—116.
164. Schlüssel P., Grassl H. Transmission of the oceanic fluorescence to the top of the atmosphere. — Dt. hydrogr., 1984, Z. 37, H. 2, s. 57—69.
165. Burlamacchi P., Cecchi G., Mazzinghi P. Performance evaluation of UV sources for lidar fluorescing of oil films. — Appl. Opt., 1983, vol. 22, № 1, p. 48—53.
166. Exton R. J., Houghton W. M., Esaia W. et al. Laboratory analysis of techniques for remote sensing of estuarine parameters using laser excitation. — Appl. Opt., 1983, vol. 22, № 1, p. 54—64.
167. Клышко Д. И., Фадеев В. В. Дистанционное определение концентрации примесей в воде методом лазерной спектроскопии с калибровкой по комбинационному рассеянию. — ДАН СССР, 1978, т. 238, № 2, с. 320—323.
168. Houghton W. M., Exton R. J., Gregory R. W. Field investigation of techniques for remote laser sensing of oceanographic parameters. — Remote Sens. Environ., 1983, vol. 13, № 1, p. 17—32.
169. Bristow M., Nielsen D., Bundy D., Furtek R. Use of water Raman emission to correct airborne fluorosensor data for effects of water optical attenuation. — Appl. Opt., 1981, vol. 20, № 17, p. 2889—2906.
170. Фадеев В. В. Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов. — Квантовая электроника, 1978, том 5, № 10, с. 2221—2226.
171. Hoge F., Swift R. Airborne dual laser excitation and mapping phytoplankton photopigments in a Gulf Stream warm core ring. — Appl. Opt., 1983, vol. 22, № 15, p. 2272—2281.
172. Аброскин А. Г., Георгиев Г. М., Девятков А. А. и др. Определение органических примесей в морской воде методом лазерной флуориметрии. — Bulg. J. Phys., 1981, том 3, № 3, с. 267—273.
173. Кондратьев К. Я., Атанесян В. Г., Барышева Л. Ф., Назарян А. А. и др. Лидарное флуоресцентное зондирование хлорофилла в водах Онежского озера с борта самолета. — В кн.: Дистанционное зондирование озер. — Л.: Наука, 1986, с.
174. Venoble D. D., Punjabi A. R., Pode L. R. Sensitivity of airborne fluorosensor measurements to linear vertical gradients in chlorophyll concentration. — Appl. Opt., 1984, vol. 23, № 7, p. 970—972.
175. Демидов А. А., Фадеев В. А. О возможности получения вертикального распределения примесей в воде методом лазерного зондирования. — Доклады АН СССР, 1980, т. 225, № 4, с. 850—853.
176. Gordon H. R., Clark D. K. Atmospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments. — Boundary-Layer Meteorol., 1980b, vol. 18, p. 299—313.
177. Gordon H. R., Clark D. K., Brown J. W. et al. Satellite measurement of the phytoplankton pigment concentration in the surface waters of a warm core Gulf Stream ring. — J. Marine Res., 1982, vol. 40, № 2, p. 491—502.
178. Tanis F. J., Lyzega D. R. Development of Great Lakes algorithms for the Nimbus-G Coastal Zone Color Scanner. Michigan: Environmental Res. Inst. of Michigan Publ., 1981, 90 p.
179. Zimmermann G., Piesik B., Badaev W. W. et al. The MKS-M remote sensing experiment for determination of ocean and atmospheric parameters from Salut-7. — In: Proc. of the 35 Congress of the Int. Astronautical Federation, October 8—13, Lausanne, Swiss. — Swiss: IAF Publ., 1981, p. 282—293.
180. Guan F., Pelaez J., Stewart R. The atmospheric correction and measurement of chlorophyll concentration using the coastal zone scanner. — Limnol. Oceanogr., 1985, vol. 30, № 2, p. 273—285.
181. Maiman T. H. Stimulated optical radiation in ruby. — Nature, 1960, vol. 187, p. 493.
182. Справочник по лазерной технике. Киев, Техника, 1978, 288 с.
183. Справочник по лазерам. Т. 1, М.: Сов. радио, 1978, 504 с.
184. Fiocco G., Smullin L. D. Detection of scattering layers in upper atmosphere by optical radar. — Nature, 1963, vol. 199, p. 1275.

185. Gibbon A. J., Sandford M. C. W. Daytime laser radar measurements of the atmospheric sodium layer. — *Nature*, 1972, vol. 239, p. 509.
186. Hickman D., Hogg J. E. *Remote Sens. Environ.*, 1969, vol. 1, p. 47.
187. Mattheews W. F., Jung R. F. Laser line-scanning sensors. — *Opt. Eng.* 1975, vol. 14, № 2, p. 116.
188. Захаров В. М., Костко О. К., Герман А. И. и др. Способ измерения геометрических характеристик неровной водной и других поверхностей. — *Авт. свидетельство СССР № 415489*, 1974.
189. Kim H. H. Airborne bathymetric charting using pulsed blue-green laser. — *Appl. Opt.*, 1977, vol. 16, p. 46.
190. Fantasia J. F., Hard T. M., Ingraio H. G. An investigation of oil spills. — *Report No. DOT-TSC-USCG-71-7*. Transportation System Centre, Cambridge, 1971.
191. Measures R. M., Bristow M. *Canadian Astronautic Space J.*, 1971, vol. 17, p. 421.
192. Marling J. B., Hawley S. G., Liston E. M., Grant W. B., Lasing characteristics of seventeen visible-wavelength dye using a coaxial-flashlamp-pumped laser. — *Appl. Opt.*, 1974, vol. 13, p. 2317.
193. Лазеры на красителях. Пер. с англ. М.: Мир, 1976, 321 с.
194. Leonard D. A. Nitrogen cross-discharge laser. — *Appl. Phys. Lett.*, 1969, vol. 7, p. 83.
195. Аналитическая лазерная спектроскопия. Пер. с англ. М.: Мир, 1982, 606 с.
196. Hoge F. E., Swift R. N. Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water Raman backscatter. — *Appl. Opt.*, 1980, vol. 19, p. 3269.
197. Gehlhaar V., Gunter K. P., Luther J. Compact and highly sensitive fluorescence lidar for oceanographic measurements. — *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, p. 3318.
198. Bhaumik M. L., Bradford R. S., Ault A. R. High-efficient Kr-F excimer laser. — *Appl. Phys. Lett.*, 1976, vol. 28, p. 23.
199. Rhodes C. K. Ultraviolet lasers. — *IEEE J. of QE*, 1974, vol. QE—10, № 2, p. 153.
200. Скоков И. В. Оптические спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1984, 240 с.
201. Справочник по приемникам оптического излучения. Киев: Техника, 1985, 216 с.
202. Росс М. Лазерные приемники. Пер. с англ. М.: Мир, 1969, 520 с.
203. Kim H. H. New algae mapping technique by the use of an airborne laser fluorosensor. — *Appl. Opt.*, 1973, vol. 12, p. 1454.
204. Bristow M., Nielsen D., Bundy D., Purtek R. Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorosensor data to effect of water optical attenuation. — *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, p. 2889.
205. Sato T., Suziki Y., Kashiwagi H., Nanjo M., Kakui Y. Laser radar for remote detection of oil spills. — *Appl. Opt.*, 1978, vol. 17, p. 3798.
206. O'Neil R. A., Buja-Bijunas L., Rayner D. M. Field performance of laser fluorosensor for the detection of oil spills. — *Appl. Opt.*, 1980, vol. 19, p. 863.
207. Букин А. Ф., Власов Д. В., Галумян А. С. и др. Универсальный комплекс аппаратуры для дистанционного лазерного зондирования океана, атмосферы и сельскохозяйственных культур, — *Журнал технической физики*, 1984, т. 54, № 11, с. 2190.
208. Букин А. Ф., Власов Д. В., Миркамилов Д. М., Слободян В. П. О лазерном аэрозондировании профиля мутности и картирования распределения фитопланктона. — *ДАН СССР*, 1984, т. 279, № 2, с. 335.
209. Фадеев В. В., Клышко Д. Н., Рубин Л. Б. и др. Анализ состава водных сред методом флуоресценции и комбинационного рассеяния света. — В кн.: *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов*. Новосибирск: Наука, 1979, с. 96.
210. Герман А. И. Лазерные самолетные исследования контрастов отражательных свойств морской поверхности загрязненной нефтью. — В кн.: *Оптические методы изучения океанов и внутр. водоемов*. Новосибирск: Наука, 1979, с. 164.
211. Кулясов А. Г., Марасин Л. Е., Попов Ю. В. и др. Высокоточный светодальномер профилометр с газовым лазером. — *Оптико-механическая промышленность*, 1979, № 12, с. 18.
212. Абрамян Р. А., Аветисян В. М., Атанесян В. Г. и др. Многоцелевой лидар для

- зондирования окружающей среды. — Тезисы докл. IV Всесоюзной конференции по аэрозолям. Ереван, 1982, с. 161.
213. Hoge F. E., Swift R. N. Airborne dual laser — excitation and mapping of phytoplankton photopigments in a Gulf Stream warm core ring. — Appl. Opt., 1983, vol. 22, № 15, p. 2272—2281.
214. Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985, 264 с.
215. Круз П., Макглоулин Д., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. Пер. с англ. М.: Воениздат, 1964, 464 с.
216. Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и изменение инфракрасного излучения. Пер. с англ. М.: Иностранная литература, 1959, 448 с.
217. Физика и техника инфракрасного излучения. Пер. с англ. М.: Советское радио, 1965, 642.
218. Анисимова И. И., Глуховской Б. М., Фотоэлектронные умножители. М.: Сов. радио, 1974, 352 с.
219. Bristow M. Fluorescence of short wavelength cutoff filters. — Appl. Opt., 1979, vol. 18, p. 952.
220. Smith R. C., Baker K. S. Optical properties of the clearest natural water (200—800 nm). — Appl. Opt., 1981, vol. 20, p. 177.
221. Рябов С. Г., Торопкин Л. Н., Усольцев И. Ф. Приборы квантовой электроники (характеристики, применение, тенденции развития) М.: Сов. радио, 1985, 450 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	5
Глава 1. Дистанционные лазерные исследования архитектуры растительности	7
1.1. Теоретические основы процесса взаимодействия световой энергии с геометрической структурой растительности	7
1.1.1. Модель мутного слоя	7
1.1.2. Метод Монте-Карло и моделирование переноса излучения в растительном покрове	19
1.2. Дистанционные измерения индикатрис растительности	36
1.2.1. Пассивные дистанционные методы измерения индикатрис растительности	37
1.2.2. Активные дистанционные методы исследования отражательных характеристик растительности в оптическом диапазоне	45
Глава 2. Дистанционная лазерная диагностика состояния высшей наземной растительности на основе измерения ее люминесцентных характеристик	54
2.1. Теоретические основы люминесцентных методов	55
2.2. Дистанционные исследования флуоресценции растительности суши	57
2.2.1. Раннее прогнозирование стрессовых состояний растений	57
Глава 3. Принципиальные основы решения задачи дистанционного зондирования хлорофилла в естественных водах	69
3.1. Некоторые характеристики фитопланктона	71
3.2. Оптические свойства основных компонентов естественных вод	85
3.3. Физические основы подходов к решению задачи дистанционного восстановления содержания в воде хлорофилла а	101
Глава 4. Лазерные системы для дистанционных исследований растительности	128
4.1. Основные физико-технические принципы построения лидаров	129
4.2. Технические характеристики бортовых лидаров, используемых в дистанционных исследованиях	135
4.3. О некоторых технических проблемах лидарных измерений	145
Заключение	158
Литература	159