

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности
7-06-0713-02 «Электронные системы и технологии»*

Минск БГУИР 2024

УДК 615.47:681.78(076.5)
ББК 53.6я73+32.86-4я73
К32

Авторы:

С. К. Дик, В. М. Бондарик, К. Е. Мешкова,
И. И. Ревинская, С. И. Мадвейко

Рецензенты:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического университета
(протокол № 13 от 01.02.2024);

заведующий лабораторией микро- и наносенсорики
Государственного научно-производственного объединения
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
доктор технических наук, профессор Н. И. Мухуров

Квантовые приборы и системы в медицине. Лабораторный практикум :
К32 пособие / С. К. Дик [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – 69 с.
ISBN 978-985-543-778-0.

Содержит четыре лабораторные работы по изучению физических принципов работы и конструктивных особенностей квантовой медицинской аппаратуры, биологических механизмов терапевтического воздействия лазерного и светодиодного излучения, методик проведения экспериментальных исследований.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков в области использования квантовых приборов и систем медицинского назначения.

УДК 615.47:681.78(076.5)
ББК 53.6я73+32.86-4я73

ISBN 978-985-543-778-0

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование параметров излучения аппарата светотерапии БИОПТРОН	4
Лабораторная работа № 2. Исследование спектральных параметров излучения с помощью спектрометра <i>SL40-2-1024USB</i>	22
Лабораторная работа № 3. Измерение среднеквадратичных значений напряженности переменного электрического и магнитного полей с помощью прибора ЭКОФИЗИКА- <i>D</i>	38
Лабораторная работа № 4. Измерение коэффициента отражения на фиксированных длинах волн.....	57

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ АППАРАТА СВЕТОТЕРАПИИ БИОПТРОН

Цель работы: изучить механизмы воздействия световых волн на биологическую ткань, изучить конструкцию и принцип работы аппарата светотерапии БИОПТРОН *MedAll*, а также провести исследования характеристик излучения аппарата светотерапии.

Теоретические сведения

1.1 Свет естественный и поляризованный

Электромагнитную волну, излучаемую отдельным атомом, можно представить как колебания взаимно перпендикулярных векторов напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей. Оба вектора колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны \vec{v} (рисунок 1.1).

Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор \vec{E} , поэтому его называют световым вектором. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют линейно поляризованной, или плоскополяризованной.

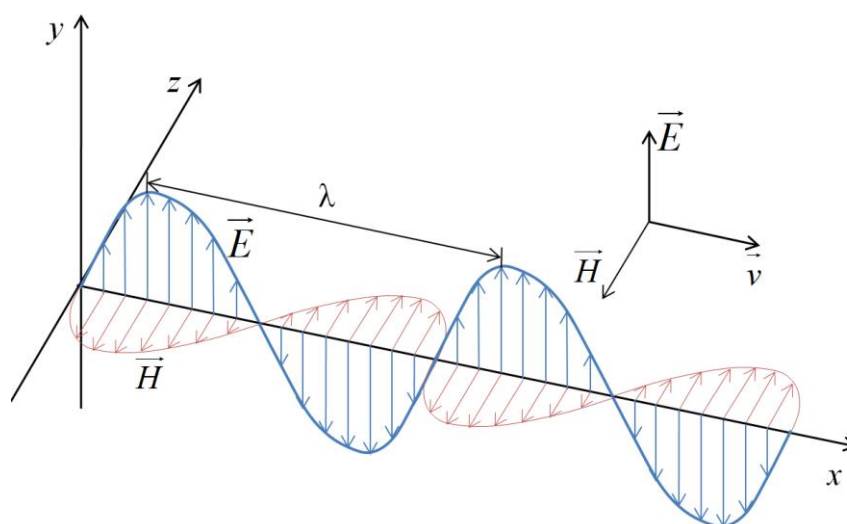


Рисунок 1.1 – Распространение электромагнитной волны

Свет от Солнца, накаливаемой нити лампы, газоразрядной трубки, пламени и других источников является деполаризованным, естественным. В таком свете векторы \vec{E} от различных элементарных микроизлучателей имеют различные

ориентации колебаний. Проекции векторов \vec{E} в естественном свете на плоскость, перпендикулярную скорости, будут иметь вид, представленный на рисунке 1.2, *a*. Все ориентации равновероятны и амплитудные значения \vec{E} одинаковы во всех направлениях.



Рисунок 1.2 – Проекции векторов \vec{E}

Если появляется предпочтительное направление колебаний, то такой свет называется частично поляризованным (рисунок 1.2, *б*). Естественный свет можно превратить в поляризованный с помощью устройств, называемых поляризаторами. Вид поляризованного света представлен на рисунке 1.2, *в*. Поляризаторы способны пропускать только составляющую вектора \vec{E} , лежащую в некоторой плоскости PP' , называемой главной плоскостью поляризатора (рисунок 1.3).

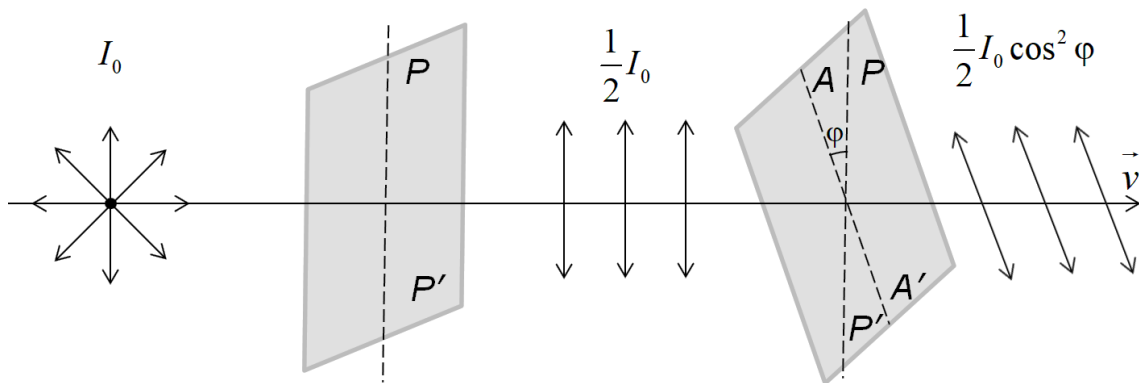


Рисунок 1.3 – Получение поляризованного света из естественного

При этом через поляризатор проходит поляризованный свет, интенсивность которого равна половине интенсивности падающего света:

$$I_0 = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{ест}}. \quad (1.1)$$

Величина P называется степенью поляризации света:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.2)$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света соответственно.

Для естественного или поляризованного по кругу света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P = 0$, а для плоскополяризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$.

При вращении поляризатора относительно луча естественного света поворачивается плоскость колебаний вышедшего плоскополяризованного света, но интенсивность его не изменяется. Поляризатор может быть использован для анализа поляризованного света, тогда его называют анализатором.

Если плоскополяризованный свет падает на анализатор с амплитудой \vec{E}_0 , то он пропускает только составляющую, равную

$$E = E_0 \cos \varphi, \quad (1.3)$$

где φ – угол между главными плоскостями поляризатора PP' и анализатора AA' .

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды колебаний E^2 , то

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1.4)$$

где I_0 – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;

I – интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Уравнение (1.4) выражает закон Малюса. Как видно из закона Малюса, при повороте анализатора относительно луча падающего плоскополяризованного света интенсивность вышедшего света изменяется от нуля до I_0 . Если при вращении анализатора относительно луча интенсивность вышедшего из него света не изменяется, то падающий свет является естественным, если же изменяется по закону Малюса, то свет является плоскополяризованным.

Термин «поляризация света» имеет два смысла. Во-первых, под этим понимают свойство света, характеризующееся пространственно-временной упорядоченностью ориентации электрического и магнитного векторов. Во-вторых, поляризацией света называют процесс получения поляризованного света.

1.2 Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков

Если угол падения света на границу двух диэлектриков не равен нулю, отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рисунке 1.4, a обозначены точками), а в преломленном – колебания, параллельные плоскости падения (на рисунке 1.4, a обозначены двусторонними

стрелками). Естественный луч условно обозначается чередующимися стрелками и точками.

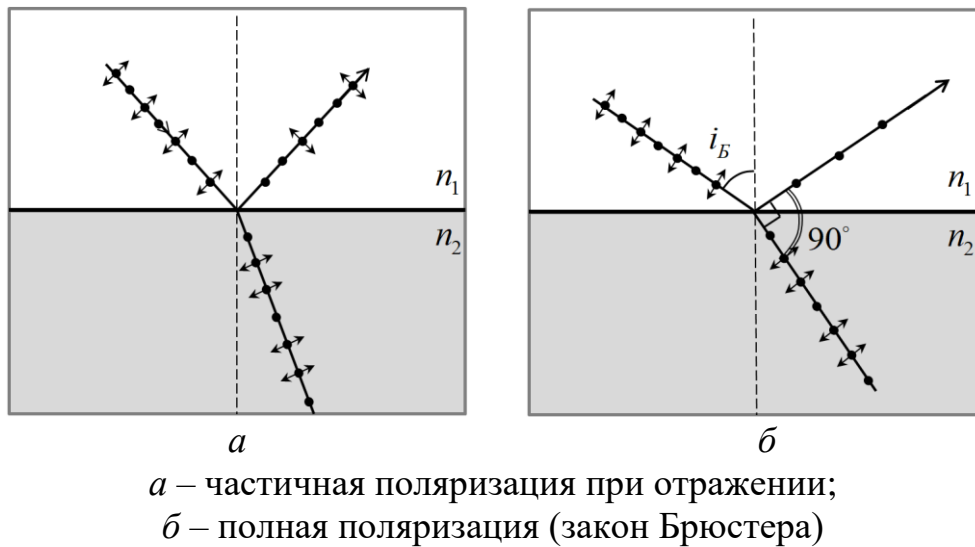


Рисунок 1.4 – Падающий, отраженный и преломленный лучи на границе двух сред

Степень поляризации зависит от угла падения лучей и показателя преломления отражающей среды. При угле падения, удовлетворяющем условию

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}, \quad (1.5)$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ — относительный показатель преломления второй среды относительно первой, отраженный луч полностью поляризован, преломленный — частично поляризован, но степень его поляризации наибольшая.

Соотношение (1.5) носит название закона Брюстера, угол i_B называется углом Брюстера, или углом полной поляризации. При падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны (см. рисунок 1.4, б).

Таким образом, граница двух диэлектриков или диэлектрика и вакуума является поляризатором.

Можно добиться, что и преломленный луч будет полностью поляризован. Для этого в качестве поляризатора используют стопку стеклянных пластинок, расположенных друг за другом. При выполнении закона Брюстера степень поляризации преломленного луча возрастает по мере прохождения пластинок.

1.3 Основные энергетические и световые величины

1.3.1 Характеристики световых величин. Основной величиной, которая позволяет количественно оценить излучение, является световой поток (Φ).

Световой поток – это величина энергии W световой волны, проходящая в единицу времени t через данную поверхность:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \text{ [лм]}. \quad (1.6)$$

Освещенность поверхности (E) – это отношение светового потока к площади этой поверхности S :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \text{ [лк]}. \quad (1.7)$$

Сила света источника (I) – это отношение светового потока к величине телесного угла, внутри которого этот поток распространяется:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ [кд]}, \quad (1.8)$$

где Ω – телесный угол [ср].

Яркость (L) – это величина, численно равная отношению светового потока внутри телесного угла к величине этого угла и к площади излучающей площадки:

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \alpha}, \quad (1.9)$$

где α – угол между нормалью к поверхности и осью телесного угла.

Телесный угол – это часть пространства, объединяющая все лучи, которые выходят из одной точки (вершина телесного угла) или проходят через некоторый участок поверхности. Исходя из светового потока $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$, яркость

можно записать в виде $L = \frac{I}{dS \cos \alpha}$.

1.3.2 Характеристики энергетических величин. Поток излучения, или лучистый поток (Φ_e) – это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку: $[\Phi_e] = \text{Вт}$, $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$. Энергия зависит от спектрального состава света.

Свет, падающий наклонно, вносит меньший вклад в энергетическую освещенность, чем падающий перпендикулярно, а свет, падающий снизу, вообще не дает вклада. Индуцированный светом нагрев биоткани или любой фотобиологический эффект зависит от величины поглощенной энергии. Для изотропных сред поглощение нечувствительно к углу облучения, поэтому адекватной дозиметрической характеристикой будет полная плотность потока энергии излучения или полная освещенность.

Поверхностная плотность потока энергии E_e (энергетическая освещенность) – это величина потока, приходящегося на единицу площади:

$$E_e = \frac{\partial \Phi}{\partial S} \text{ [Вт/м}^2\text{]}. \quad (1.10)$$

Энергетическая сила света – это поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла, в пределах которого он распространяется:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \text{ [Вт/ср]}. \quad (1.11)$$

Если площадь чувствительной области приемника не охватывает все пространство, в котором распространяется излучение, то измеренный приемником поток не является полным потоком излучения источника. Для того чтобы охарактеризовать, какую часть измеренный поток составляет от полного потока, используют понятие телесный угол. Величина телесного угла Ω определяется как отношение площади S , вырезаемой телесным углом на поверхности сферы с центром и в вершине телесного угла, к квадрату радиуса сферы:

$$\Omega = \frac{S}{r^2}. \quad (1.12)$$

Доза облучения D определяется произведением величины поверхностной плотности потока энергии на время воздействия световым излучением:

$$D = E_e \cdot t \text{ [Дж/см}^2\text{]}, \quad (1.13)$$

где t – время воздействия световым излучением, с.

1.4 Оптические свойства биологических тканей

Существует несколько видов взаимодействия излучения с биотканью, возникающего при падении электромагнитной волны от внешнего (первичного) излучателя на биоткань: отражение от кожи, преломление, рассеяние, поглощение. Из них полезным лечебным воздействием является лишь поглощение оптического излучения в биоткани.

Биологические ткани являются оптически неоднородными поглощающими средами, средний показатель преломления которых выше, чем у воздуха. За счет этого часть падающего излучения отражается на границе между биотканью и воздухом (френелевское отражение), а оставшаяся часть проникает в глубину биоткани. Распространение света в биоткани зависит от рассеивающих и поглощающих свойств ее компонентов: клеток, клеточных органелл и разнообразных волокнистых (фиброзных) структур. Размеры, форма и плотность этих структур, их показатель преломления по отношению к окружающему веществу, поляризация падающего света – все это играет важную роль в распространении света через биоткани.

Энергия поглощенного света превращается в тепло или испускается в виде флуоресценции, а также потребляется в фотобиохимических реакциях. Спектр поглощения зависит от типа доминирующих центров поглощения (пигментов) и содержания воды в биотканях (рисунки 1.5–1.8).

Абсолютные значения коэффициентов поглощения типичных биотканей лежат в интервале от 10^{-2} до 10^{-4} см^{-1} . В ультрафиолетовом (УФ) и инфракрасном (ИК) ($\lambda \geq 2000 \text{ нм}$) диапазонах свет сильно поглощается, что влечет за со-

бой невозможность глубокого проникновения излучения в биоткань (только на один или два клеточных слоя) и, как следствие, малый вклад рассеяния в распространение света в биоткани. Видимый свет проникает в типичные биоткани на глубину 0,5–2,5 мм. В этом случае происходит как рассеяние, так и поглощение, причем 15–40 % падающего излучения диффузно отражается. В диапазоне длин волн 600–1600 нм рассеяние преобладает над поглощением и свет проникает на глубину до 8–10 мм. Одновременно интенсивность диффузно отраженного излучения возрастает до 35–70 % от полной интенсивности падающего света (благодаря рассеянию назад).

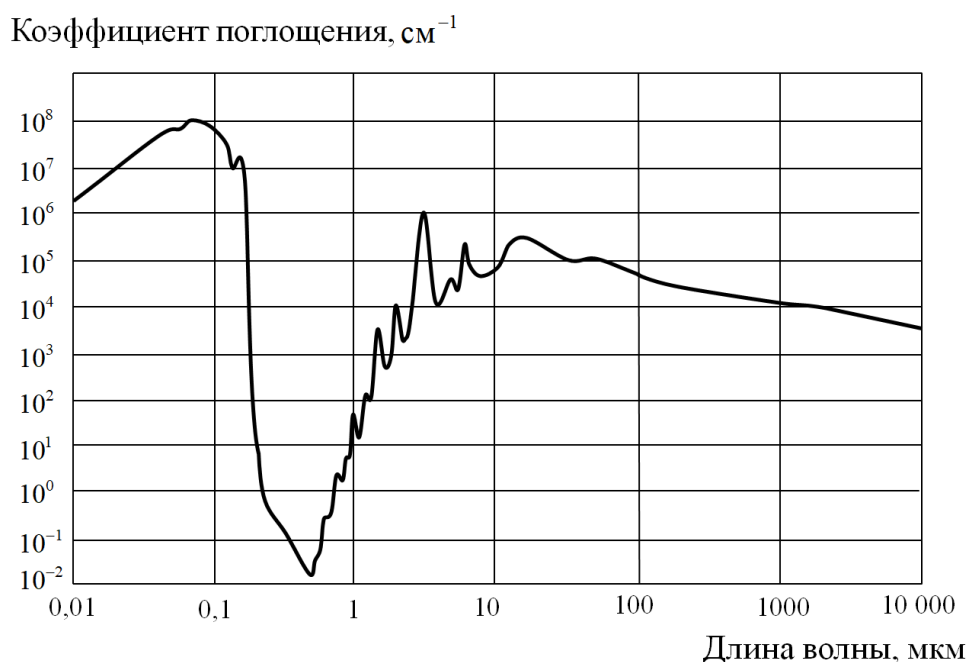
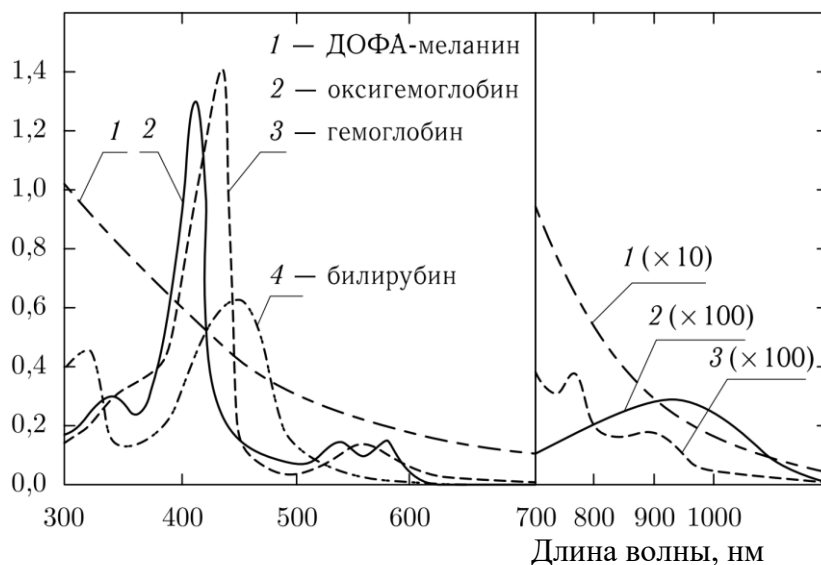


Рисунок 1.5 – Спектр поглощения воды

Взаимодействие света с многослойной и многокомпонентной кожей – очень сложный процесс. Роговой слой кожи отражает примерно 5–7 % падающего света. Из-за микроскопических неоднородностей поверхности кожи падающий коллимированный пучок света превращается в частично диффузный уже на границе между воздухом и роговым слоем. Основная часть отраженного света обусловлена рассеянием назад в различных слоях кожи (роговой слой, эпидермис, дерма, кровь, подкожная жировая клетчатка). Степень поглощения диффузного света пигментами кожи позволяет определить уровень содержания билирубина, концентрацию гемоглобина и его насыщение кислородом, а также концентрацию фармацевтических веществ в крови и биотканях, что широко используется в диагностике различных заболеваний (рисунок 1.6).

Фототерапевтические и диагностические методы видимого и ближнего ИК-диапазона обладают существенными достоинствами, например, благодаря хорошей способности видимого и ближнего ИК-света проникать через кожу в глубь тела на длинах волн, соответствующих «терапевтическому» или «диагностическому окну» (600–1600 нм) (рисунок 1.7).

Молярный коэффициент экстинкции $\times 10^5$, л·моль⁻¹·см⁻¹



1 – ДОФА (дигидроксифенилаланин)-меланин; 2 – оксигемоглобин;
3 – гемоглобин; 4 – билирубин

Рисунок 1.6 – Спектры молярного ослабления для растворов основных пигментов кожи человека, поглощающих видимый свет

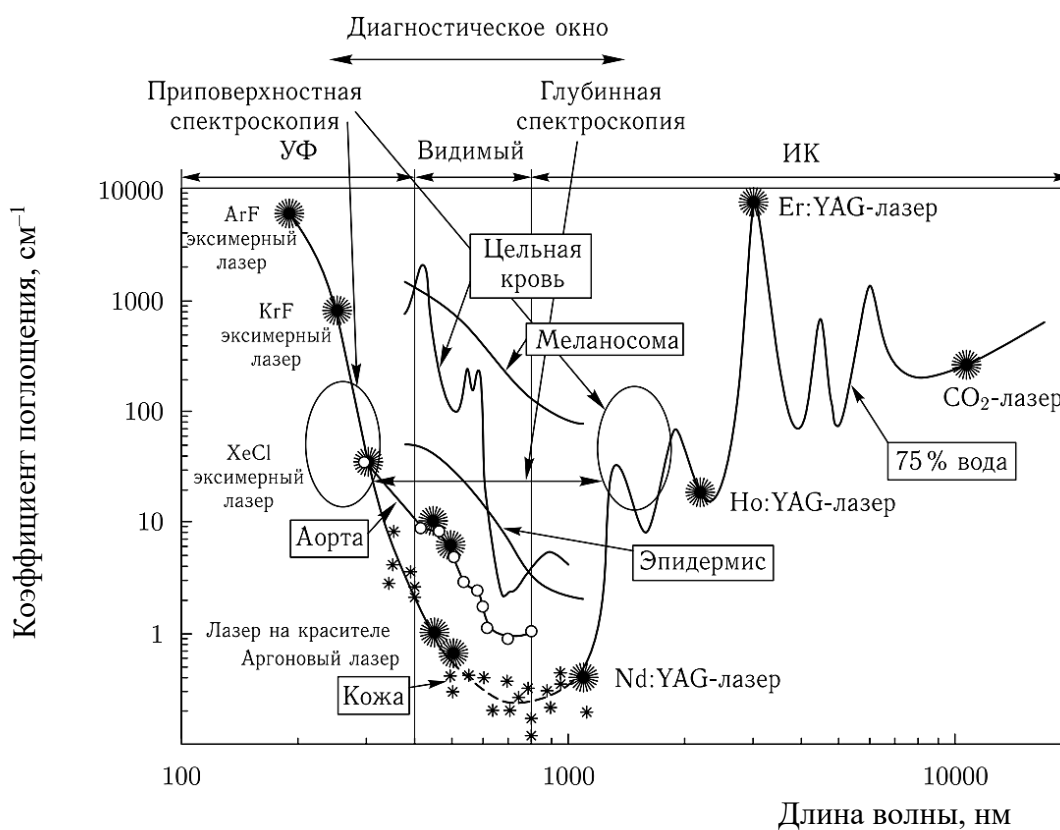
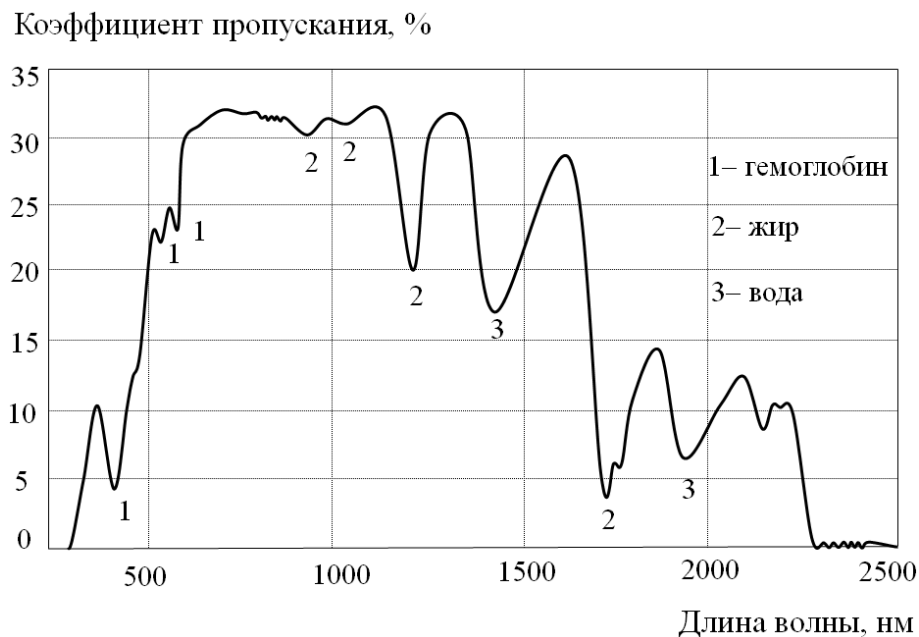


Рисунок 1.7 – Спектры поглощения кожи и аорты; спектры компонентов биоткани: воды (75%), эпидермиса, меланосом и цельной крови

Другим примером гетерогенно многокомпонентной биоткани является молочная железа, которая в основном образована жировой и фиброзной тканями. Полосы поглощения гемоглобина, липидов и воды ясно видны в спектре, измеренном *in vitro* в слое ткани молочной железы толщиной 3 мм (рисунок 1.8).



1 – гемоглобин; 2 – жир; 3 – вода

Рисунок 1.8 – Спектр пропускания слоя биоткани молочной железы толщиной 3 мм; вклады полос поглощения компонентов биоткани

Между 700 и 1100 нм имеется широкое «оптическое окно», более узкие «окна прозрачности»: около 1300 и 1600 нм, где процент ослабления света наиболее низок.

Твердые биоткани, такие как ткани ребра и черепа, а также цельная кровь тоже обладают высокой проникаемостью для видимого и ближнего ИК-света. Относительно высокая прозрачность кожи для длинноволнового УФ-излучения (УФА) обусловлена спектрами поглощения ДНК, триптофана, тирозина, урокаиновой кислоты и меланина, что является основой для ряда методов фотохимиотерапии кожных заболеваний с применением УФА-облучения.

Коллимированный (лазерный) пучок ослабляется в тонком слое биоткани толщиной d в соответствии с экспоненциальным законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I(d) = (1 - R_F) I_0 \exp(-\mu_t d), \quad (1.14)$$

$$\mu_t = \mu_a + \mu_s, \quad (1.15)$$

где $I(d)$ – интенсивность прошедшего света, измеренная удаленным фотоприемником с малой апертурой (коллимированное пропускание), Вт/см²;

R_F – коэффициент френелевского отражения при нормальном падении, равный $[(n-1)/(n+1)]^2$,

где n – относительный средний показатель преломления биоткани и окружающей среды;

I_0 – интенсивность падающего света, Вт/см²;

μ_t – коэффициент экстинкции, или полный коэффициент ослабления, см⁻¹;

μ_a – коэффициент поглощения, см⁻¹;

μ_s – коэффициент рассеяния, см⁻¹.

Строго говоря, закон, описываемый уравнением (1.15), верен только для сильно поглощающих сред, когда $\mu_a \gg \mu_s$, и отражает приближение однократного рассеяния.

Для анализа распространения света в условиях многократного рассеяния предполагается, что поглощающие и рассеивающие центры равномерно распределены по объему биоткани. УФА, видимое и ближнее ИК-излучение обычно претерпевают анизотропное рассеяние, характеризующееся выраженной направленностью распространения однократно рассеянных фотонов, которое определяется присутствием крупных клеточных органелл: митохондрий, лизосом и внутренних мембран (аппарат Гольджи).

1.5 Структура и анизотропия биотканей

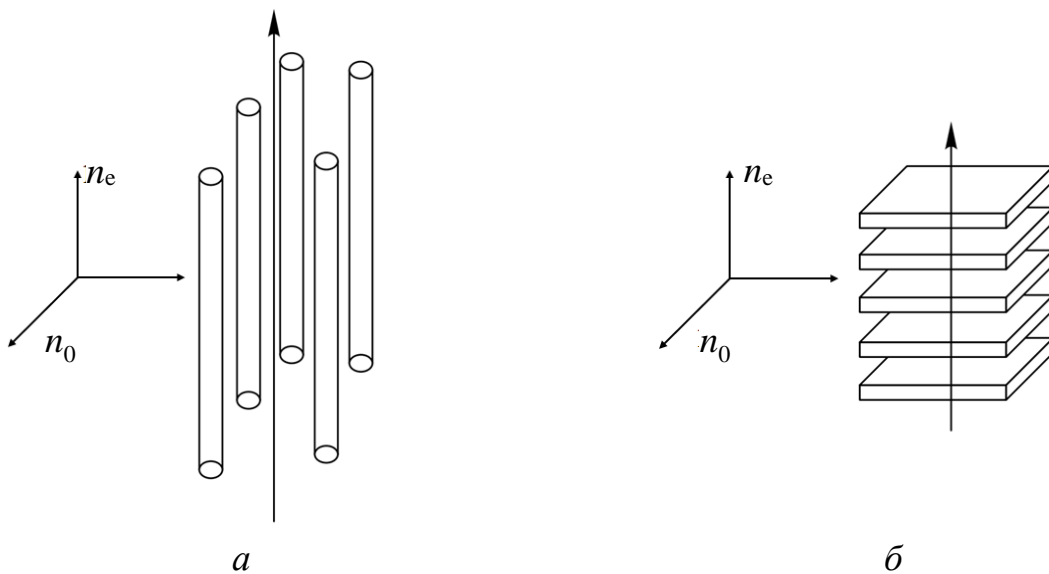
Многие биологические ткани обладают оптической анизотропией. Двухлучепреломление биотканей обусловлено главным образом линейной анизотропией волокнистых структур, которые образуют внеклеточные среды. Показатель преломления имеет большую величину вдоль волокон, чем поперек. Для таких биотканей характерна структура, состоящая из параллельных цилиндров, образующих одноосную двухлучепреломляющую среду с оптической осью, параллельной оси цилиндров. Это называется двухлучепреломлением формы. Такой тип двухлучепреломления характерен для множества разнообразных биотканей, таких как роговица глаза, хрящ, сухожилие, склера глаза, твердая мозговая оболочка, ткань яичка, мышца, нерв, сетчатка глаза, кость, зубы, миелин и др. Все эти биоткани содержат одноосные и/или двуосные двухлучепреломляющие структуры. Например, в костях и зубах это минерализованные структуры, происходящие из кристаллов гидроксиапатита, которые играют важную роль в двухлучепреломлении твердых биотканей.

Двухлучепреломление формы возникает, когда оптическая разность фаз между двумя ортогонально поляризованными компонентами отлична от нуля для света, рассеянного вперед. После многократных актов рассеяния вперед накапливается относительная разность фаз и между ортогонально поляризованными компонентами образуется запаздывание δ_{oe} , аналогичное тому, которое возникает в двухлучепреломляющих кристаллических средах. Для упорядочен-

ных линейных структур рост фазовой задержки можно характеризовать разностью эффективных показателей преломления для света, поляризованного вдоль и поперек длинной оси линейной структуры Δn_{oe} . Влияние двулучепреломления биоткани на распространение линейно поляризованного света зависит от угла между направлением поляризации падающего света и оптической осью вещества биоткани. Фазовая задержка δ_{oe} между ортогонально поляризованными компонентами пропорциональна расстоянию d , пройденному в двулучепреломляющей среде:

$$\delta_{oe} = \frac{2\pi d n_{oe}}{\lambda_0}. \quad (1.16)$$

Среда из параллельных цилиндров является положительной одноосной двулучепреломляющей средой ($\Delta n_{oe} = (n_e - n_0) > 0$) с оптической осью, параллельной осям цилиндров (рисунок 1.9).



a – система длинных диэлектрических цилиндров;
б – система тонких диэлектрических пластин

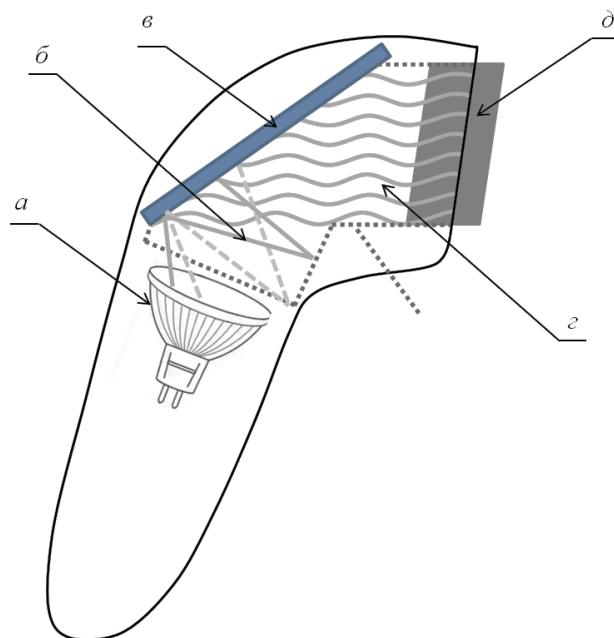
Рисунок 1.9 – Модели двулучепреломления ткани

Поэтому луч, у которого электрический вектор направлен параллельно осям цилиндров, будет называться необыкновенным, а луч, у которого электрический вектор перпендикулярен осям цилиндров, – обыкновенным. Электрический вектор необыкновенного луча лежит в главной плоскости, т. е. в той же плоскости, что и оптическая ось. Разность $(n_e - n_0)$ между показателями преломления необыкновенной и обыкновенной волн является мерой двулучепреломления среды, состоящей из цилиндров.

1.6 Описание конструкции и принципа работы аппарата светотерапии

Аппарат БИОПТРОН *MedAll* предназначен для светотерапии поляризованным, полихроматическим, некогерентным низкоэнергетическим излучением. Аппарат используется в профилактических и лечебных целях в медицинских учреждениях. Свет аппарата состоит из полезного для клеток кожи видимого фрагмента солнечного света длиной волны 480–760 нм и небольшой части инфракрасного (760–3400 нм) диапазона без ультрафиолета, что делает его безопасным для глаз и кожи, а также исключает возможность появления пигментаций в результате лечения.

1.6.1 Конструкция и технические характеристики аппарата БИОПТРОН *MedAll*. Источником света в аппарате (рисунок 1.10) служит галогеновая лампа (рисунок 1.10, *a*) номинальной мощностью 20 Вт и длиной волны излучения в диапазоне 480–3400 нм.



a – источник света (галогеновая лампа); *б* – рассеянный свет;
в – зеркало Брюстера; *з* – поляризованный свет; *д* – светофильтр

Рисунок 1.10 – Конструкция аппарата светотерапии

Неполяризованный свет (рисунок 1.10, *б*) от галогеновой лампы (рисунок 1.10, *a*) попадает на специальное многослойное зеркало Брюстера (рисунок 1.10, *в*), отражаясь от которого свет становится поляризованным (рисунок 1.10, *з*) и выходит через светофильтр (рисунок 1.10, *д*), который не пропускает УФ-излучение. Вместо светофильтра может быть установлен один из семи цветофильтров. Основные технические характеристики аппарата светотерапии приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики аппарата БИОПТРОН *MedAll*

Технические характеристики	Значение
Длина волны излучения	480–3400 нм
Диаметр фильтра	5 см
Номинальная мощность галогеновой лампы	20 Вт
Напряжение питания	100–240 В, 50/60 Гц
Степень поляризации	> 95 % (590–1550 нм)
Плотность потока световой энергии в минуту (среднее значение)	~ 2,4 Дж/см ²
Плотность мощности (среднее значение)	~ 40 мВт/см ²
Яркость света	min 10000 лк (люкс)
Класс безопасности	Класс I , IP 20

Характеристики света аппарата БИОПТРОН:

– поляризованный свет: волны распространяются в параллельных плоскостях, поэтому свет хорошо проникает в ткани. Поляризация создается путем использования зеркальной системы – зеркало Брюстера. Степень поляризации света составляет не менее 95 %;

– полихроматический свет: свет аппарата охватывает широкий диапазон длин волн от 480 до 3400 нм в отличие от лазерного излучения, ограниченного узким диапазоном спектра;

– некогерентный свет: не характерна временная или пространственная синхронизация движения световых волн, т. е. пики волн (и, следовательно, интенсивность света) не суммируются и не вычитаются друг из друга, обеспечивая постоянную интенсивность светового потока. Благодаря этому происходит быстрое и эффективное заживление тканей, кожа не краснеет и не покрывается загаром;

– низкоэнергетический свет: плотность светового потока составляет 2,4 Дж/см², что является безопасной дозой и исключает перегрев тканей. Стимулируются только естественные процессы, отсутствует риск развития злокачественных патологий.

Терапевтический эффект светотерапии заключается в том, что свет оказывает биостимулирующее действие: при попадании на кожу он стимулирует светочувствительные внутриклеточные структуры и биомолекулы. Это вызывает клеточные цепные реакции и запускает так называемые вторичные ответы, которые не ограничиваются только областью воздействия, а распространяются на весь организм. Светотерапия способствует улучшению микроциркуляции, укреплению защитной системы организма, стимуляции регенеративных и репаративных процессов, заживлению ран, а также снятию либо снижению болевых синдромов.

1.6.2 Измерение освещенности светового излучения. В работе используется автоматический цифровой измеритель освещенности *Victor 1010A* – прецизионный измерительный инструмент для экологического контроля, предназначенный для измерения освещенности в различных местах. Единицей измеряемой величины для этого прибора является люкс. Это величина освещенности, полученной на 1 м² поверхности, на которую падает поток 1 лм с расстояния 1 м от источника света.

Основные особенности измерителя:

- диапазон измерения: от 0,1–100 до 500 лк;
- разрешение до 0,1 лк;
- автоматический выбор диапазона (таблица 1.2);
- автоматическая компенсация воздействия рассеянного света;
- регистрация максимального значения;
- относительное измерение.

Таблица 1.2 – Измерительные характеристики прибора

Диапазон измерения	Разрешение	Погрешность
0,1–200	0,1	± 3 % показания + 3 лк
200–2000	1	± 2 % показания + 2 лк
2000–20 000 (показание прибора следует умножить на 10)	10	± 3 % показания + 8 лк
20 000–50 000 (показание прибора следует умножить на 100)	100	± 4 % показания + 10 лк
Свыше 50 000 (показание прибора следует умножить на 100)	100	Погрешность не регламентирована

Назначение кнопок и символов:

- *POW* – кнопка выключения питания;
- *H* – кнопка фиксации показания;
- *MAX* – кнопка фиксации максимального значения;
- Δ – кнопка режима относительных измерений;
- \square – индикация разряженной батареи питания;
- *AUTO* – индикация автоматического выбора диапазона измерения;
- *Lux* – единица освещенности;
- *X10* – индикатор, указывающий необходимость умножить показание прибора на 10;
- *X100* – индикатор, указывающий необходимость умножить показание прибора на 100;
- *OFF* – индикатор нахождения прибора в режиме энергосбережения.

Инструкция по эксплуатации прибора:

1 После установки батареи питания нажмите кнопку *POW*, услышав тикающий звук, отпустите кнопку. При этом на ЖК-дисплее отобразятся все его

элементы. Убедитесь, что на ЖК-дисплее отсутствует индикатор \square . В противном случае это означает, что напряжение на батарее ниже нормального уровня, и она не может обеспечить нормальную работу и точность измерителя освещенности. Батарея должна быть заменена.

2 Снимите защитную крышку с фотодатчика и обеспечьте ее сохранность. Наведите основную часть линзы Френеля (молочно-белого цвета) на источник света, для которого будет произведено измерение. При этом на дисплее будут отображаться данные результатов измерения освещенности интересующего источника света.

3 Измеритель освещенности автоматически выбирает нужный диапазон измерения и не требует ручного переключения. При превышении измеряемой освещенности 2000 лк для получения действительного значения следует умножить показание прибора на 10 (см. таблицу 1.2). При превышении измеряемой освещенности 20 000 лк для получения действительного значения следует умножить показание прибора на 100.

4 Если в процессе измерения необходимо зафиксировать на дисплее текущее показание результата измерения, нажмите кнопку *H*. После чего раздастся тикающий звук и на дисплее появится индикатор *H*, при этом текущее показание будет зафиксировано. Для возврата к режиму измерения нажмите еще раз кнопку *H*.

5 Если в процессе измерения необходимо зарегистрировать максимальное значение, нажмите кнопку *MAX*. После чего раздастся тикающий звук и на дисплее появится индикатор *MAX*, при этом прибор перейдет в состояние регистрации максимального измеренного значения, и оно будет отображаться на дисплее. Для возврата к обычному режиму измерения нажмите еще раз кнопку *MAX*.

6 Чтобы определить разницу освещенности двух объектов, измерьте освещенность одного объекта, затем нажмите кнопку Δ . Показание станет нулевым. Поместите измеритель над вторым объектом – и на дисплее будет отображаться значение разности освещенности этих двух объектов. При повторном нажатии на кнопку Δ раздастся тикающий звук и измеритель освещенности вернется к обычному режиму измерения.

7 После завершения измерения в первую очередь наденьте защитную крышку на фотодатчик, затем нажмите и удерживайте дольше двух секунд кнопку *POW*. После чего раздастся тикающий звук и на дисплее отобразится надпись «*OFF*».

1.6.3 Измерение мощности излучения. В лабораторной работе для измерения мощности излучения используется измерительная консоль *Thorlabs PM100D*. Совместно с консолью используется фотодиодный датчик мощности со встроенной сферой *Thorlabs S140C* – интегрированный сферический фотодиодный датчик мощности излучения. Встроенная сферическая конструкция действует как диффузор с минимальными потерями мощности.

Основные характеристики измерительного датчика:

- спектральный диапазон – 350–1100 нм;
- диапазон мощности – 1 мкВт–500 мВт;
- тип детектора – кремниевый фотодиод;
- размер диафрагмы – 5 мм.

Порядок выполнения работы

1 Изучите теоретические сведения к лабораторной работе, ознакомьтесь с конструкцией, техническими характеристиками и принципом работы аппарата БИОПТРОН *MedAll*. Ознакомьтесь с прилагаемой документацией к измерителям освещенности *Victor 1010A* и мощности излучения *Thorlabs PM100D*. Соберите экспериментальную установку согласно схеме, приведенной на рисунке 1.11.

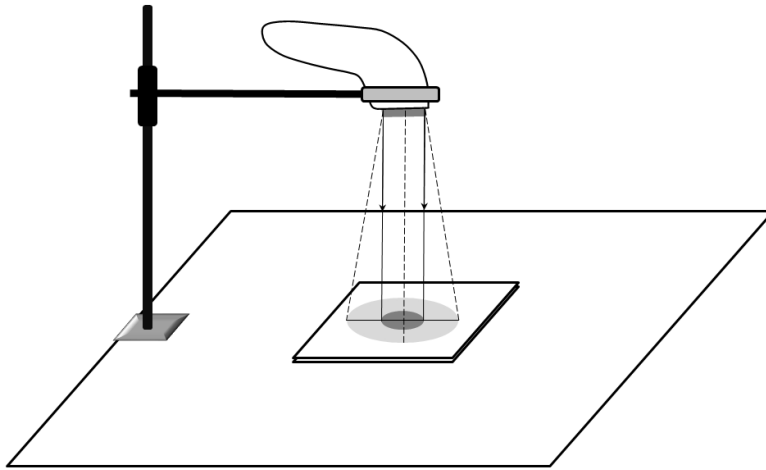


Рисунок 1.11 – Схема экспериментальной установки

2 На рабочем столе расположите калибровочный лист с начерченными кругами (значения диаметров кругов – от 5 до 15 см с шагом 1 см). Закрепите аппарат БИОПТРОН *MedAll* на штатив, включите и установите его так, чтобы световой поток был направлен на центр круга диаметром 5 см.

3 Включите измерители освещенности *Victor 1010A* и мощности излучения *Thorlabs PM100D*.

4 Измерьте расстояние h от аппарата светотерапии до калибровочного листа (не менее пяти измерений), определите соответствующий ему диаметр формируемого на листе пятна. Измерьте освещенность поверхности и мощности излучения на каждом расстоянии. Во время измерений датчики приборов необходимо размещать в центре калибровочного листа. Результаты внесите в таблицы 1.3 и 1.4. Рассчитайте площади освещенной поверхности (S_{di}) и определите телесный угол Ω по формуле (1.12).

5 Установите аппарат на некотором расстоянии. При этом будут сформированы два пятна: центральное малое пятно – с максимальной освещенностью

и большое – с меньшим значением освещенности и мощности излучения. Измерьте освещенность от края центрального пятна до края внешнего пятна. Количество и шаг измерений выбрать самостоятельно. Результаты внести в таблицу 1.5.

Таблица 1.3 – Результаты измерений согласно первой части задания

Значение	№ измерения				
	1	2	3	4	5
Расстояние h , см					
Диаметр d , см					
Площадь освещенной поверхности S_{di} , см ²					
Телесный угол Ω , ср					

Таблица 1.4 – Результаты измерений согласно второй части задания

Значение	№ измерения				
	1	2	3	4	5
Расстояние от аппарата до поверхности стола h , см					
Освещенность, лк					
Мощность излучения, мВт					

Таблица 1.5 – Результаты измерений согласно третьей части задания

Значение	№ измерения				
	1	2	3	4	5
Расстояние от края малого пятна до края большого пятна l , см					
Освещенность, лк					
Мощность излучения, мВт					

Содержание отчета

- 1 Цель работы, основные теоретические сведения.
- 2 Описание экспериментального макета.
- 3 Результаты измерений в виде таблиц и графиков, характеристика полученных результатов.
- 4 Расчеты дозировки излучения с учетом полученных экспериментальных данных.
- 5 Выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Оптические свойства биологических тканей.
- 2 Опишите, какой свет называется естественным, а какой – поляризованным. Как определяется степень поляризации света? Сформулируйте и опишите закон Брюстера.
- 3 Дайте характеристику основным энергетическим и световым величинам. Какие характеристики излучения необходимо учитывать при светотерапии?
- 4 Опишите конструкцию и принцип работы аппарата светотерапии БИОПТРОН. Опишите назначение свето- и цветофильтров.

Список использованных источников

- 1 Баранов, А. П. Медицинская и биологическая физика : учеб. пособие для студентов лечебно-профилактического факультета / А. П. Баранов, М. Ф. Клименок; Мин-во здравоохранения Респ. Беларусь, Витебск. гос. мед. ун-т. – 2-е изд. – Витебск : ВГМУ, 2010. – 390 с.
- 2 Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика : учеб. для вузов / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2003. – 560 с.
- 3 Тучин, В. В. Оптика биологических тканей: методы рассеяния света в медицинской диагностике / В. В. Тучин ; пер. с англ. В. Л. Дербова ; под ред. В. В. Тучина. – М. : Физматлит, 2013. – 818 с.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОМЕТРА *SL40-2-1024USB*

Цель работы: изучить принцип работы спектрометра, основные характеристики оптических систем спектральных приборов; изучить конструкцию и принцип работы спектрометра *SL40-2-1024USB*; изучить методику измерения спектральных характеристик с помощью спектрометра *SL40-2-1024USB*, осуществить настройку программного обеспечения и измерить спектральные характеристики излучения аппарата БИОПТРОН на различных цветофильтрах.

Теоретические сведения

2.1 Принцип работы спектрального прибора

Распределение мощности излучения на составляющие по длинам волн или частотам представляет собой спектр. Различают спектры излучения, поглощения, а также рассеяния веществ. Обычно спектр изображается графически, где по оси абсцисс откладываются длины волн или частоты, а по оси ординат – значения, пропорциональные квадрату амплитуды колебаний.

Для определения энергетических характеристик излучения используются следующие величины: поток излучения, энергия излучения, энергетическая светимость, энергетическая освещенность, энергетическая яркость, экспозиция, интенсивность.

Изучение оптических спектров и их энергетических характеристик возможно благодаря спектральным приборам. Разложение излучения сложного состава осуществляется методами селективной фильтрации и селективной модуляции.

В первом случае фильтр сканирует излучение по некоторому закону зависимости длины волны от времени. На приемник приходят выделенные компоненты излучения. Преобразованное в сигналы излучение дает функцию наблюдаемого распределения во времени, а при переходе от аргумента времени к аргументу длины волны получаем наблюдаемый спектр. Помимо сканирования спектра по одной длине волны приборы со спектрально-селективной фильтрацией могут быть многоканальными.

Во втором случае поток излучения сразу модулируется не полностью, а лишь частично: поток со спектральным интервалом в окрестностях определенной длины волны при постоянной частоте. Далее при перестройке модулятора осуществляется сканирование на различных длинах волн с той же частотой. В сигнале приемника с помощью электрического фильтра выделяется составляющая частоты и на выходе получается функция наблюдаемого распределения во времени, значения которой пропорциональны соответствующим интенсивностям в спектре.

В структуру типового спектрального прибора входят источник излучения, передающая оптическая система, диспергирующее устройство, приемная оптическая система, приемник излучения и регистрирующее устройство.

Оптическая передающая система формирует поток излучения от источника излучения и направляет его на диспергирующее устройство. В большинстве спектральных приборов для передающей оптической системы используют коллиматорные системы.

Диспергирующее устройство выполняет разложение излучения сложного состава на монохроматические составляющие.

Приемная оптическая система предназначена для формирования на приемнике потока, разложенного в спектр излучения.

Для записи спектра и приведению к наиболее удобному виду усиленного электрического сигнала приемника используют регистрирующее устройство. Кроме общих узлов спектральных приборов в их состав могут входить дополнительные элементы, такие как модуляторы, компенсаторы, программные блоки управления, сканирующие механизмы и приставки для проведения измерений.

2.2 Классификация спектральных приборов

Все спектральные приборы классифицируются по рабочей области спектра, по типу оптических систем, по назначению селективного фильтра, по способу наблюдения или регистрации спектра.

По рабочей области спектра различают приборы, предназначенные для исследований в дальней (вакуумной) ультрафиолетовой (1–185 нм), ультрафиолетовой (185–400 нм), видимой (400–760 нм), ближней инфракрасной (760–2500 нм), средней инфракрасной ($(2,5–50) \cdot 10^3$ нм) и дальней инфракрасной ($(50–1000) \cdot 10^3$ нм) областях.

По типу оптических систем различают обычные приборы с отдельно оформленными коллиматорной и камерной частями и автоколлимационные, в которых конструктивно совмещены коллиматор и камера.

Приборы с селективной оптической фильтрацией могут быть разделены по тем физическим явлениям, которые положены в основу их принципа действия: дисперсионные (призмные), дифракционные и интерференционные.

В зависимости от назначения селективного фильтра может быть выделен или узкий спектральный участок (одна спектральная линия), или достаточно протяженный участок спектра. В первом случае оптическая часть прибора называется монохроматором, во втором – полихроматором.

Приборы, в которых излучение разлагается в спектр в результате модуляции различных видов, называют селективными спектральными модуляторами. Эта группа приборов в свою очередь может быть разделена по виду селективной модуляции (частотная и амплитудная) или по типу модулятора (интерференционный, интерференционно-поляризационный и растровый).

По способу наблюдения или регистрации спектра приборы классифицируются на приборы визуальной, фотографической или фотоэлектрической регистрации. При визуальном способе приемником излучения является глаз оператора. Способ применяется при спектральных измерениях качественной оценки спектра и юстировки прибора, например в спектрокопе и стилоскопе. Фотографический способ дает возможность одновременно регистрировать большое число спектральных линий (до 5000 линий на фотопластинке длиной порядка 5 см), однако нелинейность световой характеристики ограничивает диапазон измерения световых потоков. Спектрографы относятся к приборам с фотографической регистрацией. Фотоэлектрический способ регистрации позволяет получать результаты измерений как в виде регистрограмм, так и в виде числовых отсчетов энергетической яркости или пропорциональной ей величины. К таким приборам относятся спектрометры, стилометры и квантометры.

2.3 Основные характеристики оптических систем спектральных приборов

К основным характеристикам оптических систем спектральных приборов, определяющим их свойства, возможности и диапазон работы, относятся дисперсия, аппаратная функция, предел разрешения и разрешающая способность, увеличение, относительное отверстие объектов, угловое поле оптической системы зрения, светосила и коэффициент пропускания.

2.3.1 Дисперсия. Угловая дисперсия D_β характеризует способность диспергирующего элемента отклонять излучение различных длин волн на разные углы. Величина D_β определяется соотношением

$$D_\beta = \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (2.1)$$

где $d\beta$ – угол между лучами с длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$.

Линейная дисперсия D_l является характеристикой спектрального прибора в целом. Она определяет линейное расстояние dl между изображениями спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$ в фокальной плоскости объектива, установленного после диспергирующего элемента:

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda}, \quad (2.2)$$

где dl – линейное расстояние между изображениями спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$.

На практике для характеристики спектрального прибора вместо линейной дисперсии используют обратную ей величину, которая называется обратной линейной дисперсией:

$$\frac{1}{D_l} = \frac{d\lambda}{dl}. \quad (2.3)$$

Обратная линейная дисперсия показывает, какой спектральный интервал приходится на единицу длины спектра. Измеряют обратную линейную дисперсию в миллиметрах на нанометр (мм/нм).

К спектральным приборам с селективной модуляцией понятия угловой и линейной дисперсии неприменимы, так как в этих приборах не происходит пространственного разделения лучей различных длин волн.

2.3.2 Аппаратная функция. Процесс измерения спектров возможен благодаря способности спектрального прибора выделять узкие участки спектра с конкретной шириной $\delta\lambda$ в окрестности каждой λ . Такая способность называется аппаратной функцией или функцией пропускания спектрального прибора.

Аппаратная функция (АФ) спектрального прибора характеризует наблюдаемое распределение интенсивности по спектру при освещении прибора «идеально» монохроматическим источником излучения. Аппаратная функция дает возможность количественно описать искажения волнового фронта, с одной стороны, обусловленные волновой природой света и физическими свойствами диспергирующего элемента и, с другой стороны, вносимые реальным спектральным прибором.

Рассмотрим истинное распределение интенсивности излучения исследуемого источника по спектру $f(\lambda)$. Выделим некоторую монохроматическую составляющую $f(\lambda)d\lambda$, т. е. значение функции $f(\lambda)$ в бесконечно малом интервале длин волн. Наблюдаемое распределение интенсивности в спектре для этой составляющей определяется АФ так, что в некоторой произвольной точке спектра с длиной волны λ' распределение вида $f(\lambda)d\lambda$ будет иметь вид $a(\lambda - \lambda')f(\lambda)d\lambda$, где $a(\lambda)$ – аппаратная функция спектрального прибора.

Другие монохроматические составляющие также дадут соответствующий вклад в общую интенсивность в точке λ' . Наблюдаемое с помощью спектрального прибора распределение интенсивности по спектру $F(\lambda')$ определяется формулой

$$F(\lambda) = \int a(\lambda - \lambda')f(\lambda)d\lambda. \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) называется сверткой функций $a(\lambda)$ и $f(\lambda)$.

2.3.3 Предел разрешения. Предел разрешения – это угловая или линейная величина, характеризующая расстояние между двумя монохроматическими спектральными линиями одинаковой интенсивности, которые еще наблюдаются раздельно (рисунок 2.1).

Различают теоретический предел разрешения, обусловленный только волновой природой света и физическими особенностями диспергирующего элемента, и реальный предел разрешения, обусловленный искажениями волнового фронта, проходящего через реальный прибор.

Реальный предел разрешения определяется дифракционными искажениями конечных размеров диафрагмы, абберациями оптической системы, инерционностью и шумами приемно-регистрающей системы, несовершенством изготовления и юстировки отдельных оптических и механических элементов прибора.

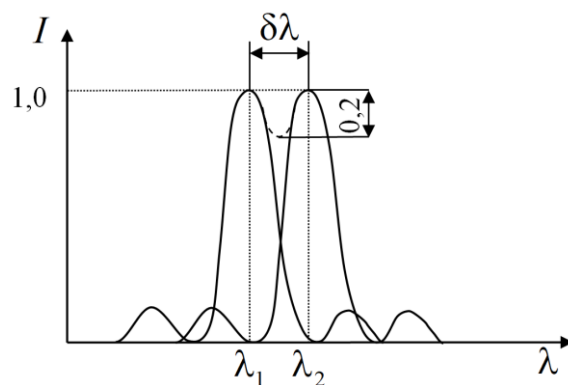


Рисунок 2.1 – Теоретический предел разрешения спектральных приборов

Для оценки теоретического предела разрешения (для «идеального прибора») используют критерий Рэля, согласно которому две спектральные линии одинаковой интенсивности находятся на пределе разрешения, если главный максимум дифракционного изображения одной из линий (рисунок 2.1) совпадает с первым минимумом в изображении другой линии. Суммарная интенсивность посередине между линиями составляет 80 % интенсивности в главных максимумах.

2.3.4 Разрешающая способность. Для количественной оценки способности прибора различать две близко расположенные спектральные линии используют понятие разрешающей способности как отношения длины волны к пределу разрешения. Теоретическая R_T и реальная R_p определяются как

$$R_T = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \text{ и } R_p = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \text{ соответственно.}$$

2.4 Спектрометр *SL40-2-1024USB*

Спектрометр серии *SL40-2* (рисунок 2.2) – это малогабаритный двухканальный анализатор спектра. *SL40-2* имеет в своем составе два смонтированных в едином корпусе спектрографа с относительным отверстием 1 : 4.9 и фокусным расстоянием 40 мм каждый. В качестве фоторегистрирующего элемента в *SL40-2* используется диодная линейка *S5463-1024Q* (*Hamamatsu*). В *SL40-2* применена оригинальная оптическая схема: световое излучение с помощью световода разделяется на два равнозначных канала и поступает на входной порт каждого из спектрографов [2].

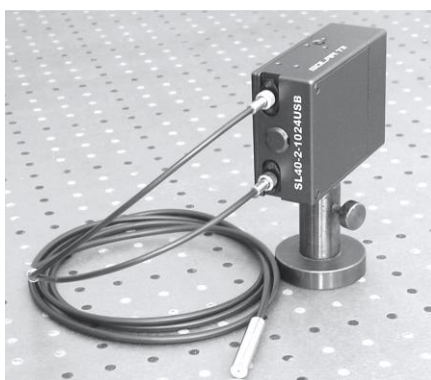


Рисунок 2.2 – Внешний вид спектрометра серии *SL40-2*

Технические характеристики спектрометра указаны в таблице 2.1.

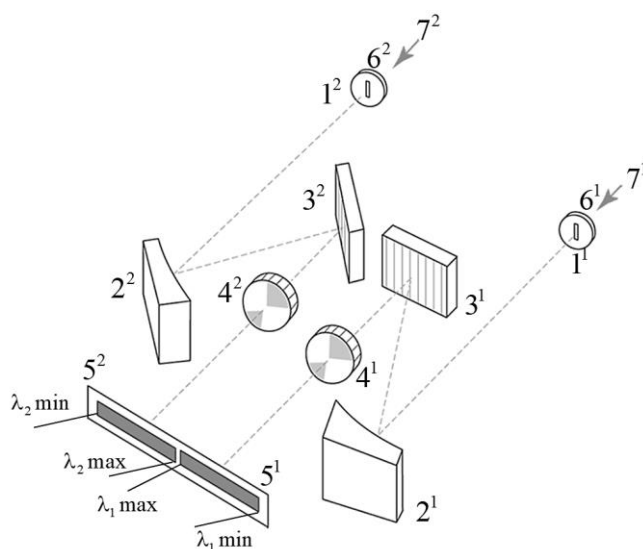
Таблица 2.1 – Технические характеристики спектрометра *SL40-2-1024USB*

Параметр	Спектрограф 1	Спектрограф 2
Спектральный диапазон, нм	198–407	407–600
Относительное отверстие	1 : 4,9	
Фокусное расстояние, мм	40	
Размер дифракционной решетки	12 × 10	
Количество штрихов на мм	1200	
Длина волны в угле блеска, нм	280	400
Средняя обратная линейная дисперсия, нм/мм	17,1	15,6
Спектральное разрешение, нм	0,7	
Размер фокальной плоскости, мм	12 × 0,2	
Максимальный размер фоточувствительной площади диодной линейки, мм	25,6 × 0,5	
Количество фоточувствительных элементов диодной линейки, (общее)	1024	
Количество активных фоточувствительных элементов диодной линейки	488	494
Размер фоточувствительного элемента (Ш × В) диодной линейки, мм	0,025 × 0,5	
Размер входной щели (Ш × В), мм	0,025 × 0,2	
Абсолютная погрешность по шкале длин волн (не более), нм	± 0,4	
Минимальное время экспозиции, мс	2	
Максимальное отношение сигнал/шум для одного кадра	1000 : 1	
Динамический диапазон	3600 : 1	
Разрядность аналого-цифрового преобразователя	14 бит, 16384 отсчета	

Фокальная плоскость каждого спектрографа, на которой формируется спектр, совпадает с плоскостью фоточувствительных элементов диодной линейки, причем длина фокальной плоскости каждого спектрографа равна половине длины линейки. Диодная линейка производит регистрацию спектров двух спектрографов одновременно, что позволяет в случае равенства параметров спектрографов получить спектральное разрешение вдвое выше, чем для аналогичных одноканальных спектрометров.

При использовании спектрографов с различными параметрами *SL40-2* может одновременно регистрировать спектры от одного и того же источника излучения с разным спектральным разрешением в каждом канале. Для введения светового излучения в *SL40-2* могут использоваться как один двухканальный световод (один вход – два выхода), так и два одноканальных.

Оптическая схема спектрометра показана на рисунке 2.3. Использование двух одноканальных световодов позволяет одновременно вводить в спектрометр и регистрировать излучение от двух различных источников.



- 1^1 и 1^2 – входные щели; 2^1 и 2^2 – коллиматорные зеркала;
 3^1 и 3^2 – дифракционные решетки; 4^1 и 4^2 – камерные объективы;
 5^1 и 5^2 – фокальные плоскости спектрографов;
 6^1 и 6^2 – держатели световодов; 7^1 и 7^2 – световоды

Рисунок 2.3 – Оптическая схема спектрометра *SL40-2*

Каждый спектрометр имеет входную щель 1 , коллиматорное зеркало 2 , дифракционную решетку 3 и камерный объектив 4 . Индексы 1 и 2 на схеме означают принадлежность элементов к первому или второму спектрографу. Свет, поступающий на входную щель 1 , отражается коллиматорным зеркалом 2 и поступает на дифракционную решетку 3 в виде параллельного пучка. Решетка 3 разлагает свет в спектр. Спектр фокусируется камерным объективом 4 в фокальную плоскость 5 . Эта плоскость совпадает с плоскостью фоточувстви-

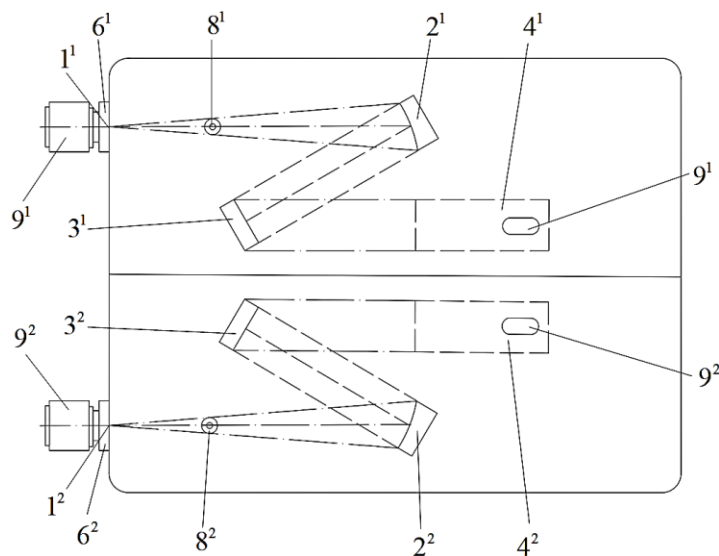
тельных элементов ПЗС – линейки, с помощью которой происходит регистрация спектров обоих каналов. Если параметры спектрографов не одинаковы, то более коротковолновый канал формируется оптическими компонентами с индексом «1».

Область применения данного прибора включает:

- измерение длины волны лазерного излучения;
- спектральный анализ различных источников излучения;
- измерение люминесцентных и романовских спектров;
- фотометрические измерения.

Спектрометр *SL40-2-1024USB* рассчитан на эксплуатацию в лабораторных помещениях без повышенной опасности поражения электрическим током.

На рисунке 2.4 представлена конструкция *SL40-2* (вид сверху со снятой крышкой).



- 1^1 и 1^2 – входные щели; 2^1 и 2^2 – коллиматорные зеркала;
 3^1 и 3^2 – дифракционные решетки; 4^1 и 4^2 – камерные объективы;
 6^1 и 6^2 – держатели световодов; 8^1 и 8^2 – пазы для настройки входных щелей;
 9^1 и 9^2 – пазы для перемещения камерных объективов

Рисунок 2.4 – Конструкция *SL40-2-1024USB*

В едином корпусе в верхнем отсеке смонтированы оптико-механические компоненты обоих спектрографов: коллиматорные зеркала 2^1 и 2^2 , дифракционные решетки 3^1 и 3^2 , камерные объективы 4^1 и 4^2 . Держатели световодов 6^1 и 6^2 находятся на передней панели корпуса. Входные щели 1^1 и 1^2 расположены коаксиально с держателями. Щели можно вращать и перемещать в пазах 8^1 и 8^2 для оптимальной фокусировки на коллиматорные зеркала 2^1 и 2^2 . Фокусировка спектра в фокальной плоскости осуществляется перемещением камерных объективов 4^1 и 4^2 в пазах 9^1 и 9^2 с последующей их фиксацией в оптимальном положении с помощью винтов. Необходимый спектральный диапазон устанавли-

вается с помощью вращения дифракционных решеток вокруг оси, проходящей через центр решетки по направлению штрихов.

Диодная линейка (закрыта крышкой *10*) расположена в фокальной плоскости спектрографов. Электронная плата расположена в нижнем отсеке прибора.

Для работы спектрометра требуется подключить его к *USB*-порту компьютера и запустить управляющую программу «*SpectraSP*». После запуска программы появится главное окно, показанное на рисунке 2.5. Основную часть экрана занимает область под спектр падающего излучения от какого-либо источника.

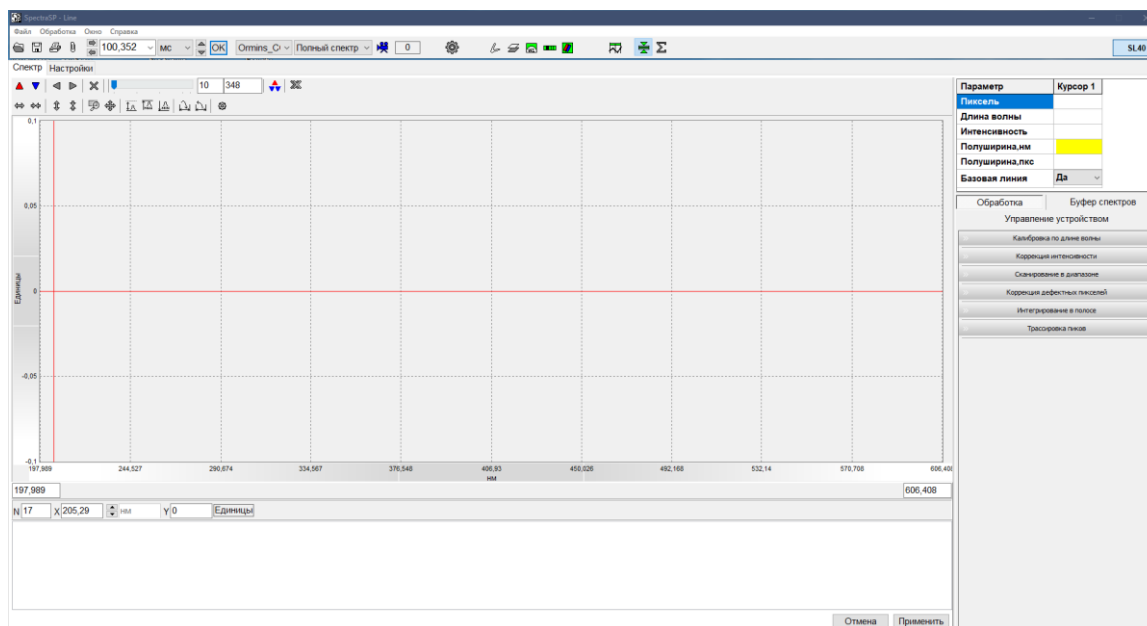
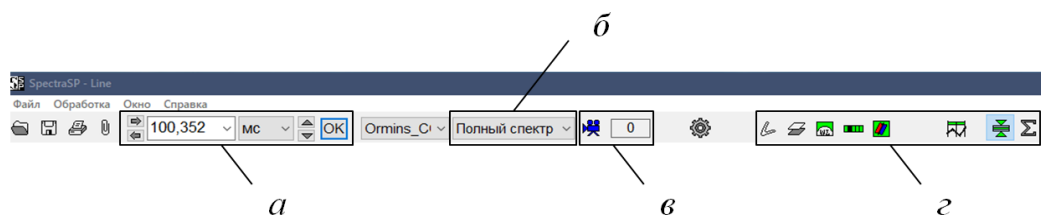


Рисунок 2.5 – Главное окно

Верхняя панель окна (рисунок 2.6, *a–г*) содержит инструменты для исследования спектра.



a – время экспозиции; *б* – тип канала; *в* – запуск/остановка сканирования;
г – инструменты и способы обработки спектра

Рисунок 2.6 – Верхняя панель

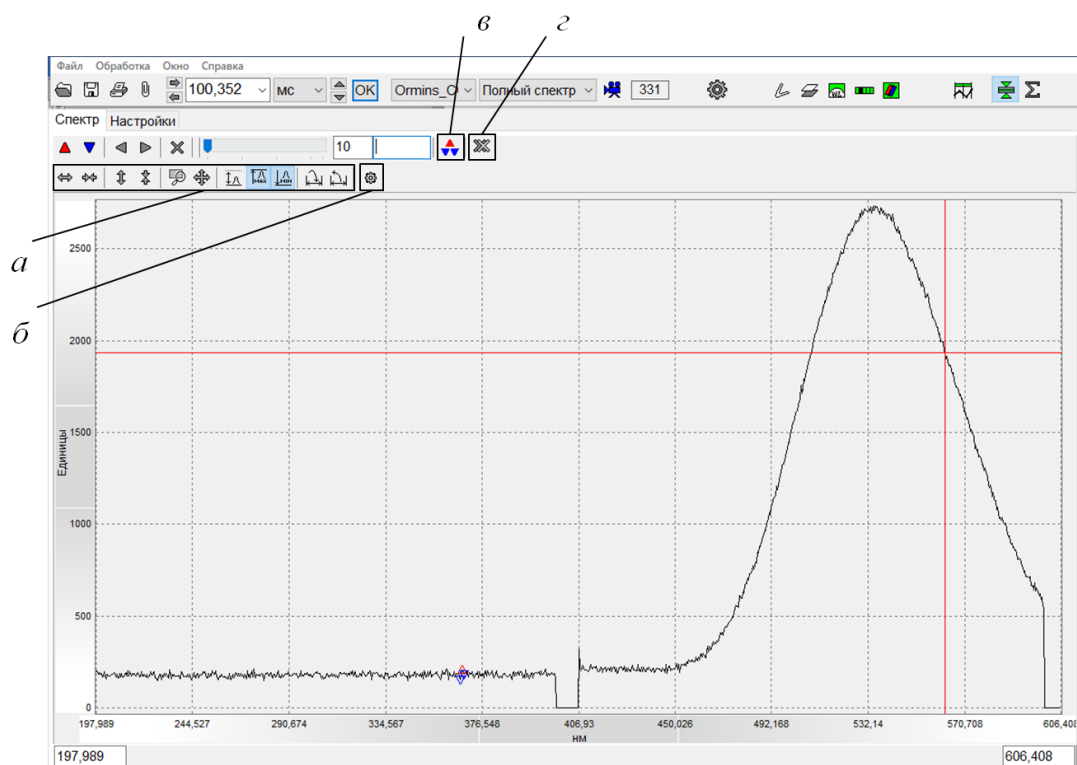
Время экспозиции позволяет настроить четкость спектра в программе. Минимальное время экспозиции 7 мс. Справа во вкладке настраивается размерность времени (с, мс, мкс).

Выбор типа канала определяет рассматриваемый диапазон длин волн. Всего представлено три настройки: полный спектр (длины волн от 200 до 600 нм), канал 1 (от 200 до 400 нм), канал 2 (от 400 до 600 нм).

Для запуска или остановки процесса сканирования используется иконка камеры. Синий цвет иконки означает завершение процесса, красный – процесс запуска. Справа от иконки камеры цифрами указан номер цикла измерения. По умолчанию данный процесс бесконечен, его можно остановить вручную, нажав на иконку камеры.

Для обработки спектра используются инструменты, изображенные на рисунке 2.7, *а–г*. Включенные иконки имеют зеленый цвет. Обработка спектра позволяет автоматически измерять фон перед сканированием, вычитать фон, корректировать интенсивность по длинам волн, корректировать пиксели, автоматически вычислять параметры пиков, выполнять интегрирование в полосе и суммировать при сканировании.

В программе есть две вкладки: «Спектр» и «Настройки» (рисунок 2.7). Во вкладке «Спектр» отображается график спектра, где по горизонтали откладываются длины волн в нанометрах (нм), а по вертикали – интенсивность падающего излучения в единицах. Диапазон длин волн соответствует диапазону двух спектрографов (см. таблицу 2.1).



а – инструменты работы с графиком; *б* – свойства графика;
в – найти все пики; *г* – удалить все маркеры

Рисунок 2.7 – Вкладка «Спектр» в главном окне

График спектра можно приближать вручную, задав область приближения, и перемещать (рисунок 2.7, а). Кроме того, в программе есть инструменты автоматических настроек графика: приближение к максимальным и минимальным значениям интенсивности, удаление частей спектра.

Рядом с инструментами настроек графика находится иконка свойств графика, позволяющая настроить отображаемые данные, их цвет и стиль (рисунок 2.8).

Во вкладке «Настройки» (рисунок 2.9) задаются тип сенсора, имя, размер, разрядность, возможность переворота, параметры канала, параметры сканирования, параметры экспозиции. Многие параметры во вкладке «Настройки» отображаются на главном экране в верхнем меню.

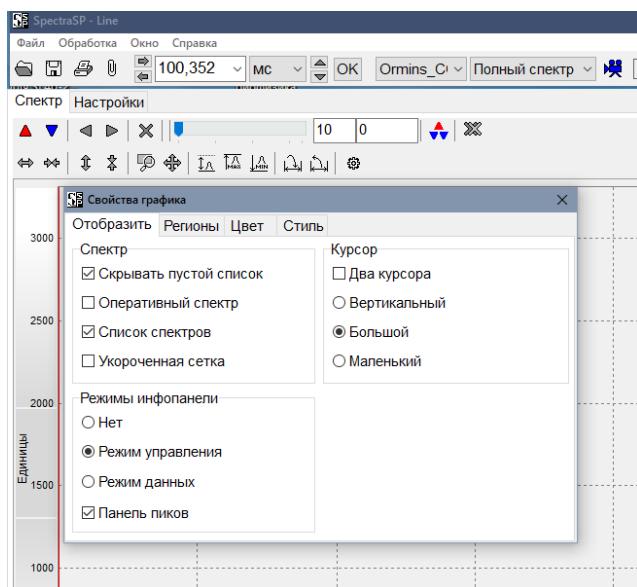


Рисунок 2.8 – Свойства графика

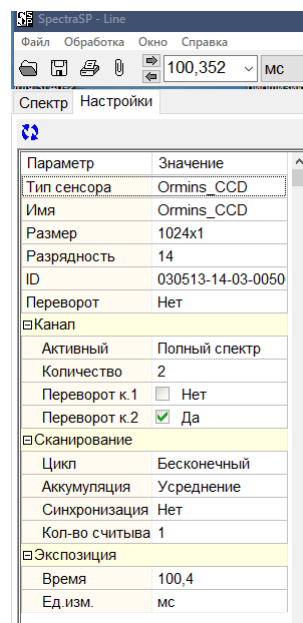


Рисунок 2.9 – Вкладка «Настройки»

Для нахождения максимальных показателей интенсивности излучения в спектре (пики на графике) можно воспользоваться автоматическим вычислением либо поиском вручную.

Для ручного поиска необходимо выделить и приблизить предполагаемую область максимального излучения. Далее нажать на точку графика с максимальным значением и внизу графика отобразятся точные показатели длины волны и интенсивности для данной точки спектра.

Автоматическое вычисление максимальной интенсивности позволяет находить несколько точек на графике с максимальным значением при разных длинах волн. Для вычисления пиков рядом с иконкой «Найти все пики» вводят значение интенсивности, выше которого находятся точки графика с максимальными значениями. Далее нажимают «Найти все пики» – и на графике появляются красные и синие треугольники (рисунок 2.10). Красными треугольниками показывают пики, а их основания – синими (данные параметры можно изменить в настройках).

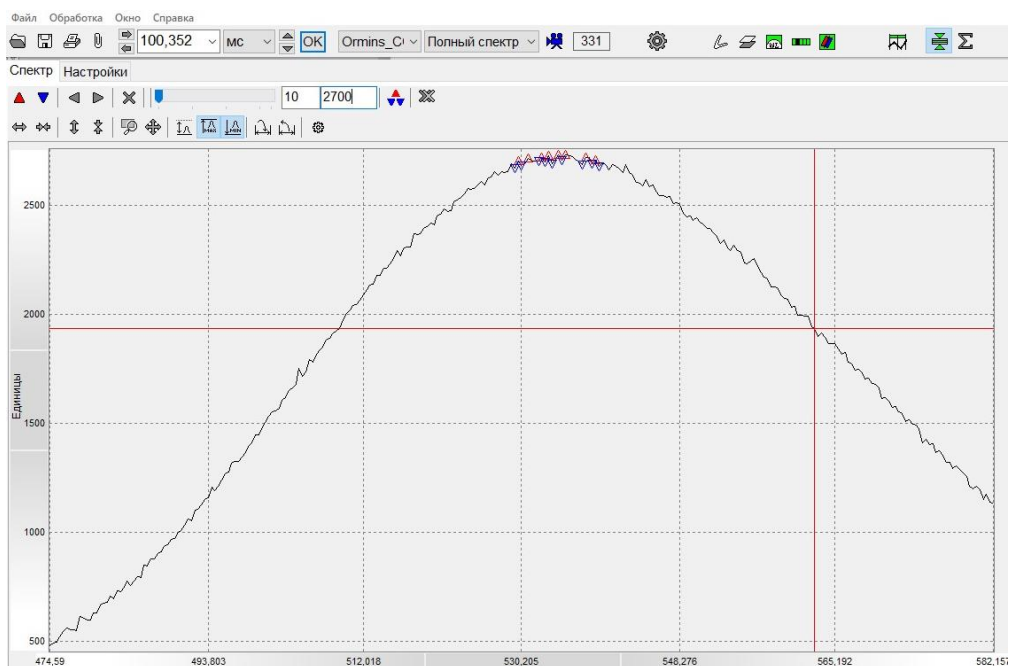


Рисунок 2.10 – Нахождение пиков

Вывод списка пиков происходит по нажатию на кнопку «Обработка» в верхней части программы. Появится таблица «Список пиков» (рисунок 2.11), в которой необходимо нажать на кнопку «Вычислить».

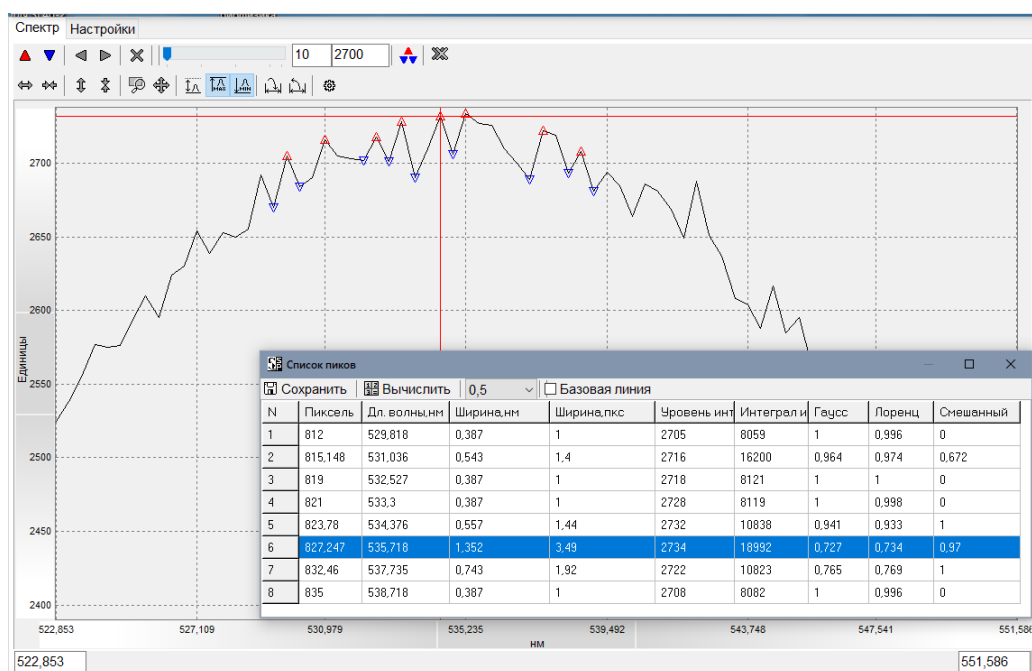


Рисунок 2.11 – Расчет пиков

Будут рассчитаны параметры для всех выделенных пиков, среди которых нужно найти максимальное значение интенсивности и на какой длине волны этот уровень находится.

Порядок выполнения работы

1 Изучите теоретические сведения. Получите у преподавателя инструкцию по эксплуатации спектрометра *SL40-2-1024USB* и ознакомьтесь с ней.

2 Ознакомьтесь с аппаратом БИОПТРОН *MedAll* (см. подраздел 1.6), изучите прилагаемую к аппарату инструкцию по эксплуатации. В комплекте к аппарату имеются семь цветофильтров: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Цветные фильтры пропускают только нужную часть светового спектра, отражая оставшийся свет как монохроматический (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Характеристики цветофильтров

Цветофильтр	Интервал длин волн, нм	Действие на организм
Красный	625–740	Болеутоляющее, противовоспалительное, омолаживающее, регенерирующее
Оранжевый	590–635	Улучшает концентрацию внимания, регулирует гормональные дисфункции, снимает мышечные спазмы, стимулирует лактацию
Желтый	560–590	Стимулирует пищеварение, активизирует лимфатическую систему, действует как детоксикатор
Зеленый	520–560	Лечит стресс, усиливает иммунную систему, стимулирует регенеративные и репаративные процессы в тканях, проводит профилактику либо послеоперационное лечение глаукомы, оказывает антистрессовое действие
Голубой	405–510	Оказывает антисептическое, антибактериальное, ранозаживляющее и противовоспалительное действие (кожные воспаления и высыпания), лечит желтуху
Синий		
Фиолетовый	450–490	Лечит хронический и острый синусит (высушивает выделения из носа и освобождает пазухи), подавляет температуру, снижает аппетит, лечит хронические и острые заболевания уха, оказывает успокаивающее воздействие

3 Подключите спектрометр к *USB*-порту компьютера и вставьте диск с программным обеспечением. На рабочем столе либо в меню «Пуск» найдите программу «*SpectraSP*» и запустите двойным щелчком левой кнопки мыши.

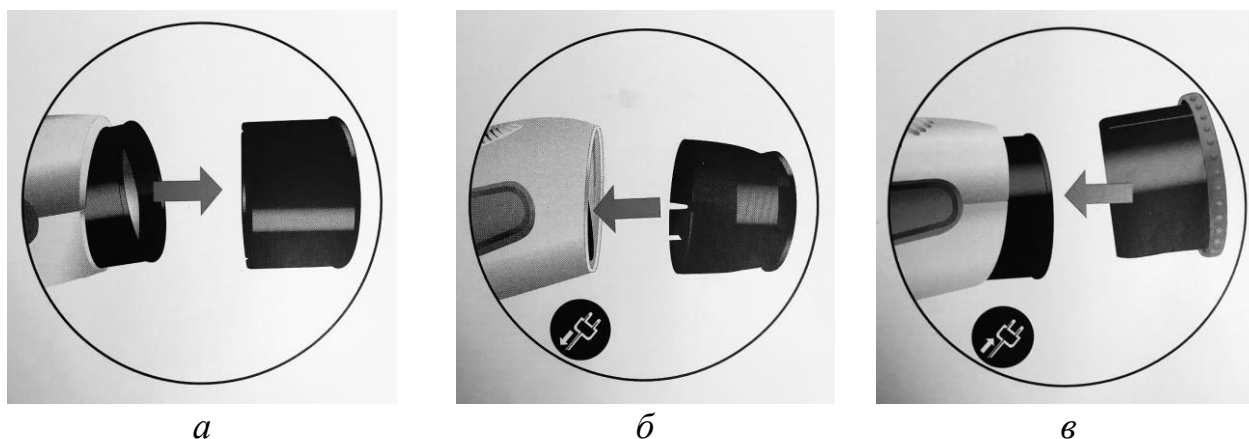
4 Убедитесь, что во вкладке «Настройки» установлены параметры, показанные на рисунке 2.9. Обратитесь к преподавателю, если настройки отличаются от исходных.

5 Установите фиолетовый цветофильтр в аппарат БИОПТРОН:

– осторожно извлеките оригинальный светофильтр (рисунок 2.12, а).
Держите фильтр за ободок, не касаясь стекла;

– вставьте переходник в прибор, как показано на рисунке 2.12, б. Переходник позволяет применять стеклянный цветофильтр диаметром 4 см для прибора с выходным диаметром 5 см;

– аккуратно вставьте цветофильтр. После использования его необходимо осторожно извлечь и положить в коробку для хранения.



а – извлечение оригинального светофильтра; б – вставка переходника;
в – вставка цветофильтра

Рисунок 2.12 – Порядок замены свето- и цветофильтров

Для очистки фильтра необходимо извлечь фильтр из прибора, при этом держать его за ободок, не касаясь стекла. Используйте мягкую влажную ткань без ворса и средство для очистки стекол с мягким действием. Нанесите немного чистящего средства на ткань, а не на само стекло. Вытрите фильтр насухо другой тканью без ворса.

Меры предосторожности: оберегать цветофильтры от пыли и механических повреждений, не использовать химикаты и изопропиловый спирт для очистки внутренней и внешней сторон стекол, хранить фильтры в оригинальном футляре.

6 Подключите аппарат БИОПТРОН *MedAll* к питанию сети 230 В. Укажите время воздействия (например, 5 мин) и включите аппарат.

7 Проведите процесс сканирования интенсивности спектра излучения. Для этого необходимо зафиксировать датчик спектрометра на минимальном расстоянии от БИОПТРОН *MedAll*, не касаясь самого цветофильтра. В программе установите время экспозиции 100 мс. Нажмите на иконку камеры для запуска процесса сканирования. После дождитесь отображения максимальной интенсивности для данного цветофильтра и прекратите процесс сканирования.

8 Определите максимальную интенсивность I_{\max} и длину волны $\lambda(I_{\max})$ падающего излучения, вычислите нижнюю и верхнюю границы пропускания цветофильтра, соответствующие снижению максимальной интенсивности в два раза. Запишите полученные значения в таблицу 2.3.

9 Измерьте интенсивность излучения на различных расстояниях от излучателя аппарата. Шаг и количество измерений выбрать самостоятельно.

10 Повторите действия из пунктов 7–9 для всех цветофильтров.

11 Постройте для каждого цветофильтра графики зависимости интенсивности излучения от расстояния до излучателя.

Таблица 2.3 – Значение интенсивности нижней и верхней границ пропускания цветофильтра

Цветофильтр	I_{\max} , единицы	$\lambda(I_{\max})$, нм	I_n , единицы	$\lambda(I_n)$, нм	I_g , единицы	$\lambda(I_g)$, нм
Красный						
Оранжевый						
Желтый						
Зеленый						
Голубой						
Синий						
Фиолетовый						

12 Проведите измерение максимальной интенсивности излучения при различном времени экспозиции. Для этого необходимо зафиксировать излучатель на расстоянии 10 см от спектрометра. Цветофильтр выберите самостоятельно. Время экспозиции установите согласно таблице 2.4. Заполните таблицу 2.4 и постройте график зависимости интенсивности излучения от времени экспозиции.

Таблица 2.4 – Интенсивность падающего излучения от времени экспозиции

Время экспозиции, мс	100	250	500	1000	2000
I_{\max} , единицы					

Содержание отчета

- 1 Цель работы, основные теоретические сведения.
- 2 Описание конструкции и принципа работы спектрометра *SL40-2-1024USB*.
- 3 Результаты измерений в виде таблиц и графиков, характеристика полученных результатов.
- 4 Выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое цветотерапия?
- 2 В каком волновом диапазоне БИОПТРОН *MedAll* позволяет проводить физиотерапевтические процедуры?
- 3 Для чего предназначен спектрометр?
- 4 Опишите конструкцию и принцип работы спектрометра.
- 5 С чем могут быть связаны помехи на данных, полученных от спектрометра?

Список использованных источников

- 1 Готовский, Ю. В. Цветовая светотерапия / Ю. В. Готовский, Л. Б. Косарева, Ю. Ф. Перов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ИМЕДИС, 2009. – 464 с.
- 2 Скоков, И. В. Оптические спектральные приборы / И. В. Скоков. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.
- 3 Спектрометр с компенсацией астигматизма, модели *SL40-2-1024USB* и *SL40-2-3648USB* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solar-tii.fis.ru/product/10019749-spektrometr-s-kompensaciej-astigmatizma-modeli-sl40-2-1024usb-i-sl40-2-364> – Дата доступа: 22.05.2023.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА ЭКОФИЗИКА-D

Цель работы: изучить влияние электромагнитных излучений на организм человека, диэлектрические и магнитные свойства биотканей, методику и принцип измерения электромагнитных полей с помощью индикаторного блока ЭКОФИЗИКА-D и преобразователя ПЗ-80-ЕН500.

Теоретические сведения

3.1 Виды электромагнитных излучений

Электромагнитные излучения (ЭМИ) – процесс испускания электромагнитных волн, а также само переменное электромагнитное поле.

Электромагнитное поле (ЭМП) – особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами. Возмущение электромагнитного поля, распространяющееся в пространстве, называется электромагнитной волной (электромагнитными волнами).

К ЭМИ относятся:

- индуцированное излучение – излучение электромагнитных (ЭМ) волн частицами вещества (атомами, молекулами и др.) под действием внешнего (вынуждающего) ЭМИ. На явлении индуцированного излучения основана работа квантовых эталонов частоты, квантовых усилителей, лазеров, мазеров и т. п.;

- спонтанное излучение – самопроизвольное излучение ЭМ-волн атомами, молекулами и другими квантовыми системами, находящимися в возбужденном состоянии;

- тормозное излучение – электромагнитное излучение, испускаемое заряженной частицей при ее рассеянии (торможении) в электрическом поле. К тормозному излучению относят излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с очень большими (релятивистскими) скоростями в магнитном поле, так называемое синхротронное, или магнитотормозное излучение. Тормозное излучение используют для получения в медицине и промышленности рентгеновских и гамма-лучей;

- тепловое излучение – ЭМИ вещества, возникающее за счет его внутренней энергии и определяемое термодинамической температурой и оптическими свойствами;

- люминесценция – неравновесное излучение света телами, избыточное над их тепловым излучением. Объясняется испусканием света атомами (молекулами, ионами) при их переходах из состояния повышенной энергии (возбужденного состояния) в состояние с меньшей энергией.

Электромагнитное поле есть совокупность переменного электрического и неразрывно с ним связанного магнитного поля. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (В/м), а напряженность магнитного поля – в амперах на метр (А/м). Напряженность является силовой характеристикой поля.

Энергетической характеристикой ЭМП является поверхностная плотность потока энергии излучения (ППЭ), измеряемая в ватах на квадратный метр (Вт/м²).

Основными параметрами распространения электромагнитного поля являются длина волны, частота колебаний и скорость распространения.

3.2 Влияние ЭМИ на организм человека

Биологический эффект воздействия ЭМИ зависит от физических параметров:

- длины волны и частоты колебаний;
- интенсивности и режима излучения (непрерывный, прерывистый, импульсно-модулированный);
- продолжительности и характера облучения организма (постоянное, прерывистое);
- площади облучаемой поверхности;
- анатомического строения органа и значимости для жизнедеятельности.

Различают следующие виды воздействия электромагнитного излучения на человека:

- изолированное – от одного источника электромагнитного излучения;
- смешанное – от двух и более источников;
- комбинированное – одновременное воздействие электромагнитного излучения и других физических, химических и биологических факторов;
- постоянное – в течение 8 ч рабочего дня в производственных условиях или в течение 24 ч – в бытовых;
- непостоянное – в течение определенного промежутка времени (менее 8 ч в производственных условиях и менее 24 ч – в бытовых);
- локальное (местное) – воздействие на какую-либо часть тела человека;
- общее – воздействие на все тело человека.

При взаимодействии электромагнитных излучений с биологическими объектами лишь часть энергии поглощается. В этом случае используют следующий принцип: только та часть энергии излучения может вызвать изменения в веществе, которая поглощается этим веществом; отраженная или проходящая энергия не оказывает никакого действия (принцип Гроттгосуса).

Это взаимодействие носит биофизический характер, т. е. происходит процесс поглощения и непосредственного распределения поглощенной энергии на уровне биотканей целого организма. При этом тканевые системы называются биомикросистемами, а отдельные части тела (голова, туловище и т. д.) – биомакросистемами.

В отличие от ионизирующего излучения, которое непосредственно создает электрические заряды, электромагнитные излучения не обладают ионизирующей способностью и воздействуют только на уже имеющиеся свободные заряды и диполи. Диэлектрические свойства биотканей сильно зависят от их химического состава, частоты колебаний, происходящих внутри биологического объекта. Электромагнитные свойства определяют процессы прохождения энергии через слои вещества, отражения на границах их раздела и поглощения внутри тканей.

3.2.1 Влияние излучений радиочастот. Среди всего спектра наибольшей биологической значимостью и выраженностью симптоматики выделяются ЭМИ РЧ и СВЧ. В зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия изменения под действием ЭМИ РЧ и СВЧ в организме подразделяют на изменения острого (термогенного) и хронического (атермального) воздействия. Острое воздействие обусловлено термическим воздействием ЭМИ и возникает, как правило, при нарушении техники безопасности. Термогенное воздействие обычно носит локальный характер, а возникающая симптоматика определяется топографией облучаемой области. При облучении пострадавшие ощущают тепло в месте воздействия, схожее с действием солнечных лучей. Иногда отмечают общее недомогание, головную боль, головокружение, тошноту, рвоту, чувство страха, жажду, легкую слабость, боли в конечностях, повышенную потливость. У пострадавших наблюдаются повышение температуры тела, приступы тахикардии, нарушение сердечной деятельности, артериальная гипертензия. Субъективная и объективная симптоматика у пострадавших через несколько дней исчезает, все клинические показатели приходят к доклиническому уровню, полностью восстанавливается работоспособность.

Хронические воздействия ЭМИ РЧ и СВЧ при интенсивности менее 10 Вт/м^2 могут вызывать в системе крови различные неустойчивые изменения: лейкоцитоз, увеличение количества лимфоцитов, иногда отмечают моноцитоз, патологическую зернистость нейтрофилов, ретикулоцитоз и тромбоцитопению.

Особое место при изучении влияния ЭМИ РЧ и СВЧ на организм человека занимает исследование катарактогенеза – помутнения хрусталика с потерей зрительной функции. Среди факторов риска, способствующих возникновению катаракты, по данным ВОЗ электромагнитным излучениям РЧ и СВЧ отводят пятое место после диабета, ультрафиолетового облучения, метаболических нарушений и ионизирующей радиации.

Исследования, проведенные с участием людей, выявили слуховые эффекты, возникающие при воздействии импульсных ЭМИ. Так, при облучении головы прямоугольными импульсами с пиковой плотностью потока энергии около 30 Вт/м^2 и средней $1\text{--}4 \text{ Вт/м}^2$ у человека возникают слуховые ощущения. В зависимости от длительности и частоты следования импульсов ЭМИ они воспринимаются как щелчки, жужжание или чирикание. У человека могут возникать реакции, подобные тем, которые бывают при акустическом шуме.

3.2.2 Влияние излучений сверхчастотного диапазона. Электромагнитное поле сверхчастотного диапазона (микроволны) по принятой классификации

относится к той части спектра электромагнитных колебаний, где длина волны колеблется от 1 мм до 1 м, а частота колебаний, соответственно, от 300 000 до 300 МГц.

При частоте колебаний ниже 300 МГц в качестве характеристики ЭМ-поля принимается силовая характеристика – напряженность электрического поля (В/м) или напряженность магнитного поля (А/м). При частоте колебаний выше 300 МГц поле оценивается энергетической характеристикой – плотность потока энергии (ППЭ), Вт/м² (или ее производными мВт/см², мкВт/см²). Для количественной оценки поглощенной энергии введено понятие удельной поглощенной мощности УПМ (*SAR specific absorption rate* – у американских авторов). Под УПМ понимается количество поглощаемой мощности, приходящейся на единицу массы тела, т. е. это усредненная величина, характеризующая скорость поступления энергии СВЧ-поля в поглощающее тело и представляемая как мощность, отнесенная к объему – Вт/м³(мВт/см³) – или массе – Вт/кг (мВт/г). Установлено, что предельной для терморегуляции человека является мощность 4 Вт/кг, а ПДУ – 0,4 Вт/кг.

Эффект воздействия СВЧ ЭМ-поля на биологические объекты в известной степени определяется количеством проникающей в них и поглощаемой ими электромагнитной энергии. Значительная часть энергии микроволн поглощается тканями организма и превращается в тепло, что объясняют возникновением колебания ионов и дипольных молекул воды, содержащихся в тканях. Наиболее эффективное поглощение микроволн отмечается в тканях с большим содержанием воды: кровь, тканевая жидкость, слизистая желудка, хрусталик глаза и др.

Нагрев тканей в СВЧ-поле является наиболее простым и очевидным эффектом действия микроволн на организм человека. Положение максимума температуры, его удаление от поверхности тела зависят от проводимости среды, а следовательно, и от частоты радиоволны, действующей на ткань: с увеличением частоты (укорочением волны) максимум температуры приближается к поверхности.

Принято различать тепловое действие микроволн ППЭ, превышающей 10 мВт/см², и нетепловое – при ППЭ ниже 10 мВт/см². Такое деление условно, т. к. в действительности имеет место и то, и другое действие.

Механизм теплового действия заключается в следующем: температурное распределение, которое устанавливается в живом организме под действием микроволн, зависит не только от длины волны, интенсивности излучаемой энергии (ППЭ) и продолжительности воздействия, но и от ряда других факторов. Главными из этих факторов являются теплообмен на поверхности нагреваемого объекта (естественное или принудительное охлаждение), тканевая структура объекта (однородность или слоистое строение), интенсивность кровоснабжения в нагреваемой области и др.

Нетепловые резонансные эффекты миллиметровых волн связывают с синхронизацией существующих в норме несфазированных колебаний множества осцилляторов живой клетки (колебания белковых молекул в мембране).

Нетермические эффекты объясняются теорией Фрелиха, согласно которой при воздействии ЭМ-энергии может произойти полярная перестройка биомолекул, способная дать на резонансной частоте колебания большой амплитуды за счет перекачки энергии (по аналогии с химическими лазерами). При этом происходят динамические нарушения системы регуляции.

Выделяют легкую, среднюю и тяжелую степени СВЧ-поражения.

К легким поражениям (острым и хроническим) относят преходящие функциональные изменения в организме, не требующие длительного лечения и существенно не снижающие трудоспособности пострадавших.

Поражения средней тяжести характеризуются стойкими функциональными нарушениями, требующими длительного и часто повторного лечения и снижающими трудоспособность пострадавших в последующем.

При тяжелой степени поражения наблюдаются органические повреждения и выраженные дистрофические изменения тех или иных систем, тяжелые функциональные расстройства (диэнцефальные кризы, симптомы коронарной недостаточности и т. д.). Возможны рецидивы СВЧ-поражений при интеркуррентных заболеваниях.

3.3 Диэлектрические и магнитные свойства биотканей

При взаимодействии электромагнитного излучения с биовеществом возникают два типа эффекта, определяющих диэлектрические свойства тканей. Колебания свободных зарядов (ионов) приводят к увеличению токов проводимости и к потерей энергии, связанной с электрическим сопротивлением среды. Вращение дипольных молекул с частотой приложения электромагнитного излучения влияет на токи смещения и диэлектрические потери, обусловленные вязкостью среды.

Диэлектрические свойства биотканей описываются диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Магнитные свойства биотканей описываются магнитной проницаемостью. Хотя все биоткани являются слабыми диа- и парамагнетиками, близкими по свойствам к вакуумной среде, рассеяние магнитной энергии в биообъекте может быть значительным в зависимости от размеров и электрических свойств этих объектов.

Диэлектрические свойства биотканей существенно зависят от частоты электромагнитных колебаний. При частоте, меньшей чем 10 кГц, период электромагнитных колебаний достаточно большой, для того чтобы клеточные мембраны успели перезарядиться за счет ионов вне и внутри клетки. Это объясняет наличие низкой удельной ионной проводимости даже для тканей с высоким содержанием воды. При этом полный заряд и диэлектрическая проницаемость ткани за период колебаний велики. Последующий рост удельной проводимости происходит вследствие уменьшения емкостного сопротивления мембран с увеличением частоты. Неполная перезарядка изолированных мембран вовлекает внутриклеточную жидкость в процесс образования ионных токов, проводимость ткани плавно увеличивается, а ее диэлектрическая проницаемость падает.

Лавинное вовлечение внутриклеточной среды в процесс образования ионных токов на частотах 10–100 кГц вызывает резкое возрастание удельной проводимости. Кроме того, поляризация молекул тканей (в основном молекул воды) приводит к возникновению токов смещения, увеличивающих токи в тканях при тех же амплитудах напряженности электрического поля, т. е. уменьшает их удельное сопротивление.

При частотах от 100 кГц до 10 МГц мембраны все меньше и меньше перезаряжаются и емкостное сопротивление биоткани падает. Содержимое клеток все активнее включается в процесс образования ионных токов, т. е. проводимость ткани продолжает возрастать, а ее диэлектрическая проницаемость уменьшается. При этом значительно возрастают поляризация молекул и обусловленные ею токи смещения, что приводит к увеличению суммарных токов в биотканях.

При частотах больше 10 МГц емкостное сопротивление мембран клеток становится таким малым, что клетку считают короткозамкнутой. Поляризация молекул и токи смещения становятся доминирующими. Возбужденные молекулы приходят в колебательное движение, сталкиваются с псевдовозбужденными и передают им свою энергию, расходуемую на тепло и химические преобразования. Поэтому проводимость резко возрастает, а диэлектрическая проницаемость меняется незначительно.

3.4 Электромагнитное поле промышленной частоты 50 Гц

Основными источниками ЭМП промышленной частоты (50 Гц) является следующее оборудование или технологические процессы (операции):

- электроустановки переменного тока (линии электропередачи, распределительные устройства и другое оборудование);
- электросварочное оборудование;
- высоковольтное электрооборудование промышленного, научного, медицинского и другого назначения.

Оценка и нормирование электрических полей (ЭП) частотой 50 Гц осуществляется по напряженности электрического поля (E) в кВ/м в зависимости от времени его воздействия на работающего за смену.

Предельно допустимый уровень напряженности ЭП частотой 50 Гц на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

При напряженностях в интервале от 5 до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания в электрическом поле T (ч) рассчитывается по формуле

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (3.1)$$

где E – напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м;

T – допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч.

При напряженности от 20 до 25 кВ/м допустимое время пребывания в ЭП составляет 10 мин.

При напряженности ЭП, превышающей ПДУ, требуется применение средств защиты; при напряженности ЭП, превышающей 25 кВ/м, работа без средств индивидуальной защиты (СИЗ) запрещается.

Допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано одновременно или распределено в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭП или применять средства защиты.

Время пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП вычисляют по формуле

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{E_i}}{T_{E_i}} \leq 1, \quad (3.2)$$

где $T_{\text{пр}}$ – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности;

$t_{E_1}, t_{E_2}, \dots, t_{E_n}$ – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью E_1, E_2, \dots, E_n ;

$T_{E_1}, T_{E_2}, \dots, T_{E_n}$ – допустимое время пребывания для контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

Таблица 3.1 – Допустимое время пребывания работников в электрическом поле 50 Гц без применения индивидуальных средств защиты

Допустимое время пребывания в течение суток, мин	Напряженность электрического поля на рабочем месте, кВ/м
480	До 5 включительно
380	6
308	7
255	8
213	9
180	10
153	11
130	12
110	13
94	14
80	15
68	16
56	17
47	18
38	19
30	20
10	Свыше 20 до 25 включительно
Не допускается	Свыше 25

Оценка и нормирование синусоидального (периодического) магнитного поля (МП) частотой 50 Гц осуществляется по напряженности H в А/м для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) воздействия в зависимости от времени пребывания работающего в переменном магнитном поле за смену. ПДУ воздействия магнитного поля частотой 50 Гц приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – ПДУ синусоидального магнитного поля частотой 50 Гц

ПДУ магнитного поля, H (А/м) при воздействии		Время пребывания, ч
локальном	общем	
6400	1600	1 и менее
3200	800	2
1600	400	4
800	80	8

Для импульсных магнитных полей ПДУ амплитудных значений напряженности магнитного поля устанавливаются в зависимости от общей продолжительности воздействия за рабочую смену и характеристики импульсных режимов генерации, где $t_{и}$ – длительность импульса; $t_{п}$ – длительность паузы между импульсами:

- режим I – импульсное время $t_{и}$ от 0,02 с и более, $t_{п} = 2$ с или менее;
- режим II – импульсное время $t_{и}$ от 1 до 60 с включительно, $t_{п}$ более 2 с;
- режим III – импульсное время $t_{и}$ от 0,02 до 1 с включительно, $t_{п}$ более 2 с.

3.5 Электромагнитное поле диапазона частот 10–30 кГц

Основными источниками электромагнитного поля диапазона частот 10–30 кГц является оборудование или технологические процессы (операции), в которых используются электроустановки и другое оборудование, работающее в диапазоне частот 10–30 кГц.

Принципы гигиенической оценки электромагнитного поля диапазона частот 10–30 кГц (верхний предел диапазона не включается):

1 Гигиеническим нормативом нормируемых параметров электромагнитного излучения с диапазоном частот 10–30 кГц является ПДУ.

2 Нормируемыми показателями электромагнитного излучения с диапазоном частот 10–30 кГц являются величины напряженности электрического (В/м) и магнитного (А/м) полей.

3 ПДУ нормируемых параметров электромагнитного излучения с диапазоном частот 10–30 кГц устанавливаются с учетом времени воздействия:

– ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при воздействии в течение всей смены составляют 500 В/м и 50 А/м соответственно;

– ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при продолжительности воздействия до 2 ч за смену составляют 1000 В/м и 100 А/м соответственно.

4 Оценка превышения гигиенических нормативов проводится по абсолютной разности превышения ПДУ фактическими значениями нормируемых параметров (напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля).

3.6 Электромагнитные поля РЧ-диапазона частот от 30 кГц до 300 ГГц

Оценка и нормирование электромагнитного излучения радиочастотного (РЧ) диапазона от 30 кГц до 300 ГГц осуществляется по величине энергетической экспозиции (ЭЭ), которая определяется интенсивностью ЭМИ РЧ и временем его воздействия на человека.

Энергетическая экспозиция, создаваемая электрическим полем, выражается в $(\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}$ и рассчитывается по формуле

$$\text{ЭЭ}_E = E^2 \cdot T, \quad (3.3)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

T – время воздействия, ч.

Энергетическая экспозиция, создаваемая магнитным полем, выражается в $(\text{А/м})^2 \cdot \text{ч}$ и рассчитывается по формуле

$$\text{ЭЭ}_H = H^2 \cdot T, \quad (3.4)$$

где H – напряженность магнитного поля, А/м.

Энергетическая экспозиция в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц является математической функцией ППЭ ЭМИ радиочастот и времени его воздействия на человека (T), выражается в $(\text{мкВт/см}^2) \cdot \text{ч}$ и рассчитывается по формуле

$$\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}} = \text{ППЭ} \cdot T, \quad (3.5)$$

где ППЭ – плотность потока энергии, мкВт/см^2 .

ПДУ энергетических экспозиций (ЭЭ_{ПДУ}) в производственных условиях представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Предельно допустимые значения энергетических экспозиций в производственных условиях

Предельно допустимая ЭЭ			Диапазоны частот
По ППЭ, (мкВт/см^2)·ч	По магнитному полю, (А/м) ² ·ч	По электрическому полю, (В/м) ² ·ч	
–	200	20 000	От 30 кГц до 3 МГц
–	–	7 000	3–30 МГц
–	0,72	800	30–50 МГц
–	–	800	50–300 МГц
200	–	–	От 300 МГц до 300 ГГц

Значения уровней напряженности электрического поля и магнитного поля в зависимости от продолжительности воздействия ЭМИ радиочастот не должны превышать ПДУ, установленные гигиеническим нормативом (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – ПДУ напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитного излучения в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия, ч	ЕПДУ, В/м			МПДУ, А/м	
	0,03–3 МГц	3–30 МГц	30–300 МГц	0,03–3 МГц	30–50 МГц
8 и более	50	30	10	5	0,3
7,5	52	31	10	5	0,31
7	53	32	11	5,3	0,32
6,5	55	33	11	5,5	0,33
6	58	34	12	5,8	0,34
5,5	60	36	12	6	0,36
5	63	37	13	6,3	0,38
4,5	67	39	13	6,7	0,4
4	71	42	14	7,1	0,42
3,5	76	45	15	7,6	0,45
3	82	48	16	8,2	0,49
2,5	89	52	18	8,9	0,54
2	100	59	20	10	0,6
1,5	115	68	23	11,5	0,69
1	141	84	28	14,2	0,85
0,5	200	118	40	20	1,2
0,25	283	168	57	28,3	1,7
0,125	400	236	80	40	2,4
0,08 и менее	500	296	80	50	3

При продолжительности воздействия менее 0,08 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

Значения уровней ППЭ в зависимости от продолжительности воздействия ЭМИ радиочастот не должны превышать ПДУ, установленные гигиеническим нормативом (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – ПДУ плотности потока энергии в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

ПДУ ППЭ, мкВт/см ²	Продолжительность воздействия, ч
25	8 и более
27	7,5
29	7
31	6,5
33	6
36	5,5
40	5
44	4,5
50	4
57	3,5
67	3
80	2,5
100	2
133	1,5
200	1
400	0,5
800	0,25
1000	0,2 и менее
5000	0,2 и менее (для случаев локального облучения кистей рук при работе с микрополосковыми СВЧ-устройствами)

При продолжительности воздействия менее 0,2 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

3.7 Методика и принцип измерения электромагнитных полей с помощью прибора ЭКОФИЗИКА-D

3.7.1 Портативный индикаторный блок ЭКОФИЗИКА-D. Портативный индикаторный блок ЭКОФИЗИКА-D осуществляет управление и питание измерительных модулей, индикацию результатов измерений и их запись в собственной энергонезависимой памяти, передачу результатов измерений на внешние устройства (рисунок 3.1). Описание назначений кнопок приведено в таблице 3.6.

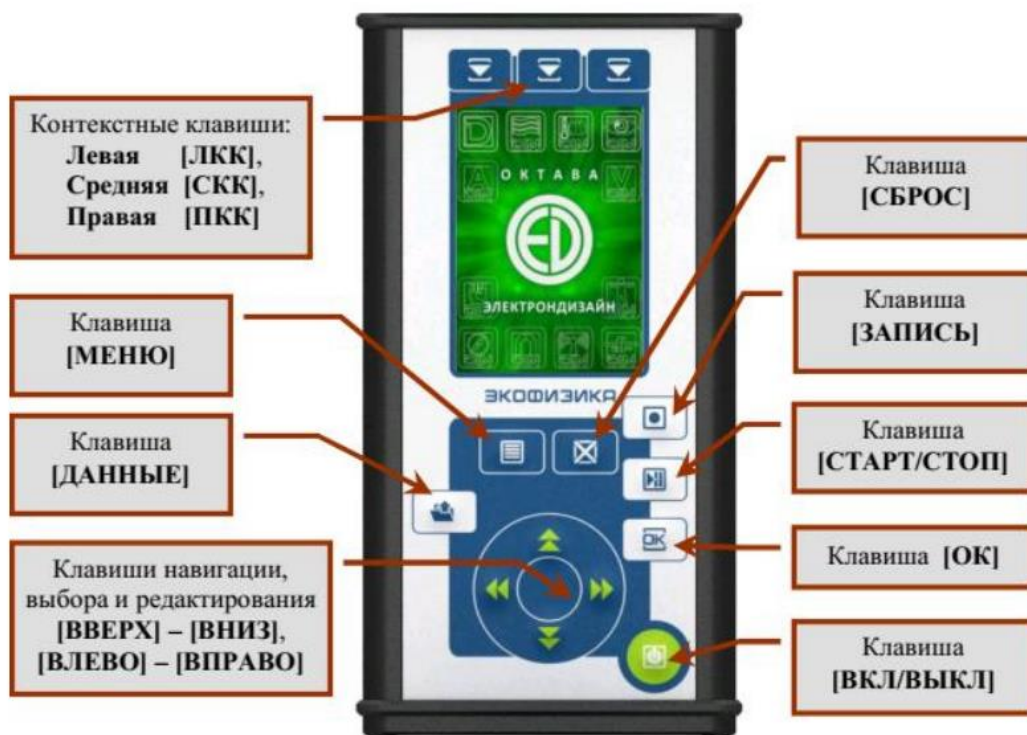











Рисунок 3.1 – Индикаторный блок ЭКОФИЗИКА-D и описание его клавиш

Таблица 3.6 – Описание клавиатуры индикаторного блока

Клавиша	Название	Описание
	ВКЛ/ВЫКЛ	Включение/выключение прибора; переход в измерительное окно. Для выполнения нужного действия удерживайте данную клавишу в нажатом состоянии 1–2 с
	ОК	Подтверждение действия
	СТАРТ/СТОП	Запуск измерений / пауза
	ЗАПИСЬ	Начало записи в память; расстановка маркеров в записи; подтверждение калибровки; сохранение примечания
	СБРОС	Обнуление результата измерения, прерывание записи в память
	ДАННЫЕ	Переход к работе с файлами данных; просмотр информации о приборе; переключение экранных клавиатур
	МЕНЮ	Открыть/закрыть меню режима измерения

Продолжение таблицы 3.6

Клавиша	Действие	Описание
	Контекстные клавиши: Левая, Средняя, Правая	Текущая функция контекстной клавиши обозначается на индикаторе под клавишей
	Клавиши со стрелками: ВВЕРХ – ВНИЗ, ВЛЕВО	Навигация по меню; выбор значений текущего поля из списка, редактирование значений текущего поля; выбор параметров

3.7.2 Измеритель ПЗ-80. Измеритель ПЗ-80 предназначен для измерения среднеквадратичных значений (СКЗ) напряженности переменных электрических (НЭП) и магнитных (НМП) полей промышленных источников в диапазоне частот 5–500 000 Гц, а также для измерения напряженности электростатических полей (НЭСП).

Основная область применения – контроль электромагнитной обстановки, измерение промышленных радиопомех, измерение биологически опасных уровней электромагнитных полей, а также научные исследования.

Комбинированный антенный цифровой преобразователь ПЗ-80-ЕН500 выдает цифровые значения напряженности электрического и магнитного поля для промышленной частоты (50 Гц), ее гармоник и субгармоник, в полосах 5–2000 Гц, 2–400 кГц, 10–30 кГц, а также 5–2000 Гц с режекцией полосы 45–55 Гц. В таблицах 3.7–3.8 приведены характеристики измеряемых параметров, диапазонов, пределов допускаемых погрешностей измерений и уровней собственных шумов преобразователя ПЗ-80-ЕН500.

Таблица 3.7 – Измеряемые параметры преобразователя ПЗ-80-ЕН500

Измеряемые параметры		
Обозначение полосы частот	Значение НМП	Значение НЭП
Диапазоны измерения НМП и НЭП		
25, 50, ..., 675 Гц	От 5 мА/м до 9 кА/м	От 420 мВ/м до 100 кВ/м
5–2000 Гц	От 60 мА/м до 300 А/м	От 4,8 В/м до 3 кВ/м
10–30 кГц	От 1,71 мА/м до 200 А/м	От 100 мВ/м до 2,5 кВ/м
2–400 кГц	От 5 мА/м до 20 А/м	От 500 мВ/м до 125 В/м
Пределы допускаемой погрешности измерения НЭП и НМП		
25, 50, 75, ..., 675 Гц	± 15 %	
10–30 кГц, 5–2000 Гц, 2–400 кГц	± 20 %	

Таблица 3.8 – Уровень собственных шумов измерителя с преобразователем ПЗ-80-ЕН500

Обозначение полосы частот	Магнитное поле, мА/м		Электрическое поле, мВ/м	
	Д1	Д2	Д1	Д2
25, 50, ..., 675 Гц	30	2	300	100
5–2000 Гц	100	20	1500	500
5–2000 (Режекция 50 Гц)	100	20	1500	500
5–2000 (Режекция 50 Гц)	5	0,5	50	20
2–400 кГц	15	2	200	100

3.7.3 Сборка и включение прибора

1 Подключите штекер кабеля цифрового преобразователя ПЗ-80-ЕН500 к разъему DIN на нижнем торце индикаторного блока ЭКОФИЗИКА-D.

2 Включите прибор клавишей ВКЛ/ВЫКЛ.

3 На экране появится меню различных режимов индикатора ЭКОФИЗИКА-D. Выберите набор программных модулей *DIN* при помощи левой контекстной клавиши.

4 Используя клавиши со стрелками вверх/вниз, выберите из списка нужный преобразователь (ПЗ-80-ЕН500), а затем, нажав ОК, выберите режимы: E400 для измерения электрического поля, H400 – для магнитного поля (рисунок 3.2).

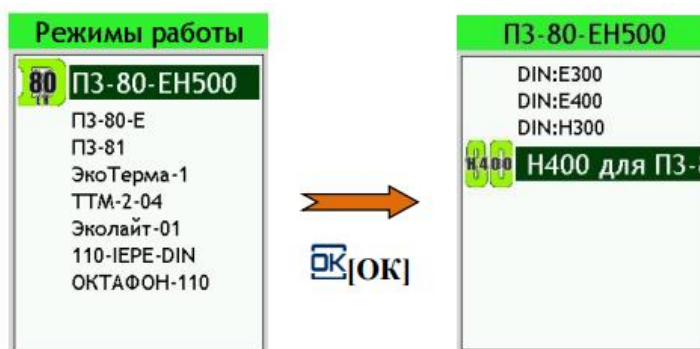


Рисунок 3.2 – Выбор преобразователя и режима работы

Прибор перейдет в выбранный режим измерения – и на экране появится одно из окон результатов.

Окно позволяет в графическом виде увидеть уровни напряженности электрического или магнитного поля. Клавиши влево/вправо перемещают частотный курсор по графику. Среднеквадратичный уровень напряженности поля выводится в табличке под графиком. Правая контекстная клавиша переключает абсолютный и логарифмический масштабы (т. е. между В/м и дБ – для электрического поля, между А/м, мкТл (нТл) и дБ – для магнитного поля).

Для перехода в окно «Все источники» необходимо, находясь в графическом окне, прожать клавишу «ОК» до тех пор, пока не появится окно результатов в виде таблицы, схожей с рисунком 3.4.

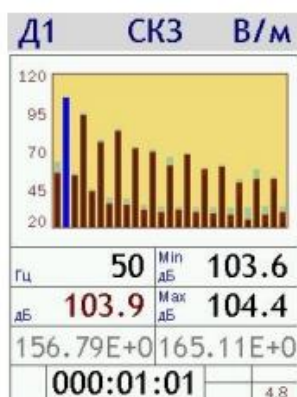


Рисунок 3.3 – Окно представления результатов

0.3-3 кГц		нТл	
Max			4.97E+0
СКЗ			4.84E+0
Min			4.69E+0
Leq			4.62E+0
ПикТ			24.69E+0
Пик			29.43E+0
		000:00:08	4.8

Рисунок 3.4 – Окно результатов «Все источники»

В окне показаны измеряемые значения напряженности поля одновременно для всех полос: среднеквадратичное за все время измерения (*Leq*), текущее СКЗ, максимальная и минимальная величины текущего СКЗ (*Max* и *Min*) за время измерения. Левая и средняя контекстные клавиши переключают *Leq/СКЗ* (при этом индикация величин *Max* и *Min* сменяется на индикацию ПикТ и Пик). Правая контекстная клавиша переключает абсолютный и логарифмический масштабы (т. е. между В/м и дБ – для электрического поля, между А/м, мкТл (нТл) и дБ – для магнитного поля).

3.7.4 Управление прибором. Запуск и остановка измерений осуществляются клавишей СТАРТ/СТОП. Клавиша ЗАПИСЬ позволяет записать результат в память. После запуска (СТАРТ) длительность измерений отсчитывается от последнего нажатия клавиши СБРОС за вычетом того времени, когда прибор находился в состоянии СТОП.

В случае возникновения сообщений «*Over*» или «*Under*» нажмите клавишу СБРОС. Если индикация перегрузки «*Over*» не исчезает, это означает, что уровень измеряемого сигнала превышает верхний предел установленного в данный момент диапазона измерений. В этом случае нужно перейти в более грубый диапазон измерения прибора (с диапазона Д2 перейти на диапазон Д1).

Если измеряемый сигнал слаб, появится сообщение «*Under*». Это значит, что измеряемые значения находятся вблизи нижней границы диапазона измерений, нужно перейти в более чувствительный диапазон измерений (с диапазона Д1 переключиться на диапазон Д2). Переключение индикации диапазона (Д1 или Д2) производится при помощи левой контекстной клавиши.

3.7.5 Методика выполнения измерений модуля напряженности переменных электрических и магнитных полей

1 Включить индикаторный блок. После сборки и включения измерителя войти в режим измерений и подождать не менее 60 с, прежде чем начинать измерения.

2 Напряженность МП и ЭП должна измеряться при обеспечении отсутствия искажения полей находящимися вблизи обследуемой точки железосодержащими предметами.

3 Расположить антенну в выбранной точке измерений так, чтобы рукоятка антенны находилась в горизонтальной плоскости. Нажать кнопку СБРОС. Допускается сначала нажать кнопку СБРОС, затем плавно переместить антенну в точку измерений. При этом индикаторный блок можно положить, например, на стол.

4 Медленно повернуть рамку антенны вокруг оси штанги на 180°.

5 Удерживая центр рамки в контрольной точке, повернуть штангу антенны в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси на 45°, и повторить пункт 5.

6 Повторить движение, описанное в пункте 6, еще два раза (рисунок 3.5).

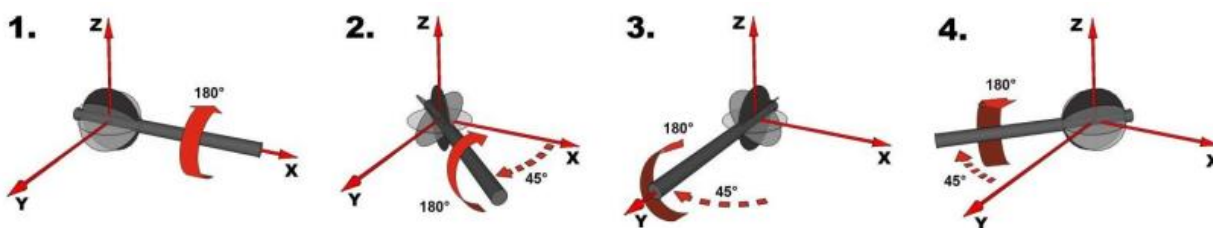


Рисунок 3.5 – Направления движения антенны

7 После завершения вращений по пунктам 5–7 остановить измерение клавишей СТОП индикаторного блока. Записать значение максимальной напряженности МП или ЭП в выбранной полосе частот.

8 Повторить пункты 4–7 в каждой контрольной точке не менее четырех раз.

9 Средние значения напряженности МП и ЭП в точке рассчитываются по формулам:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (3.6)$$

где E – среднее значение НЭП в контрольной точке;

E_i – полученные при отдельных измерениях значения;

N – число измерений;

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i, \quad (3.7)$$

где H – среднее значение НМП в контрольной точке;

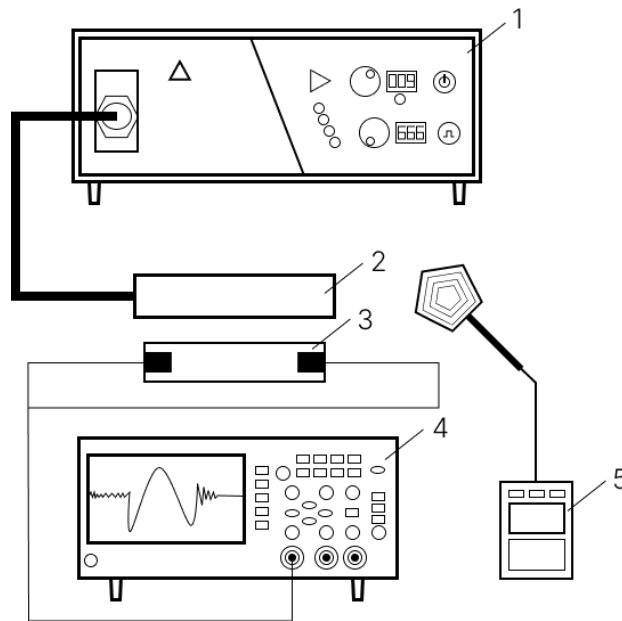
H_i – полученные при отдельных измерениях значения;

N – число измерений.

Порядок выполнения работы

1 Изучите теоретические сведения. Ознакомьтесь с инструкцией по эксплуатации индикаторного блока и преобразователя ПЗ-80-ЕН500.

2 Соберите экспериментальный макет согласно рисунку 3.6. Расположите имитатор биоткани («мышца» либо «жир») на ровной плоскости и подключите к щупам осциллографа. Индуктор закрепите над имитатором биоткани на минимальном расстоянии. Выше расположите антенну преобразователя ПЗ-80-ЕН500.



1 – магнитостимулятор; 2 – индуктор; 3 – имитатор биоткани;
4 – осциллограф; 5 – устройство ЭКОФИЗИКА-D

Рисунок 3.6 – Схема экспериментальной установки

3 Включите индикаторный блок ЭКОФИЗИКА-D, магнитостимулятор Нейро-МС/Д и осциллограф.

4 Настройте магнитостимулятор на генерацию одиночного импульса, интенсивность импульса задайте равной 15 %, частоты посылок – согласно таблице 3.9. Измерьте и запишите величины напряженности электрического поля E (В/м) и напряженности магнитного поля H (А/м) на разных диапазонах частот.

Таблица 3.9 – Данные напряженностей электрического и магнитного полей от частоты посылки магнитостимулятора

Частота посылки, Гц	Амплитудный отклик в биоткани, мВ	Диапазон частот, кГц							
		0,05		0,005–2		10–30		2–400	
		<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>
5									
10									
15									
20									
25									

5 Задайте частоту посылки равной 15 Гц, интенсивность импульса – согласно таблице 3.10. Измерьте и запишите величины напряженности электрического поля E (В/м) и напряженности магнитного поля H (А/м) на разных значениях интенсивности.

Таблица 3.10 – Напряженности электрического и магнитного полей на различных значениях интенсивностей пучков магнитостимулятора

Интенсивность пучков I , %	Амплитудный отклик в биоткани, мВ	Диапазон частот, кГц							
		0,05		0,005–2		10–30		2–400	
		<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>
5									
10									
15									
20									
25									

6 Проведите измерения напряженности электрического и магнитного полей в зонах, формирующихся вокруг точечного источника электромагнитного излучения. Предлагаемые зоны: ПК, магнитостимулятор Нейро-МС и осциллограф.

7 Рассчитайте допустимое время пребывания в зонах, формирующихся вокруг точечного источника электромагнитного излучения (см. формулу (3.2)).

8 Оформите отчет.

Содержание отчета

- 1 Цель работы, основные теоритические сведения.
- 2 Описание экспериментального макета.
- 3 Результаты измерений в виде таблиц и графиков, характеристика полученных результатов.
- 4 Выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризовать влияние электромагнитных полей на человека.
- 2 Объяснить принцип работы устройства ПЗ-80 и ЭКОФИЗИКА-D.
- 3 Описать методику выполнения измерений модуля напряженности переменных электрических и магнитных полей.

Список использованных источников

1 Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к электромагнитным излучениям радиочастотного диапазона при их воздействии на человека», Гигиенического норматива «Предельно допустимые уровни электромагнитных излучений радиочастотного диапазона при их воздействии на человека», внесении изменений в некоторые постановления Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь, постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 25 сентября 2008 г. № 150 и признании утратившим силу постановления Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 31 декабря 2002 г. № 162 [Электронный ресурс]: постановление Мин-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 5 марта 2015 г., № 23 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text_tnpa/post_2015_23_1428958800.pdf

2 Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиенические требования к электромагнитным полям в производственных условиях» и признании утратившими силу Санитарных правил и норм № 11-16-94 «Санитарно-гигиенические нормы допустимой напряженности электростатического поля на рабочих местах», утвержденных Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь 27 января 1994 г., некоторых постановлений и отдельного структурного элемента постановления Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Мин-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 21 марта 2010 г., № 69 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/0001z27_253922_N69_2010.pdf

3 Скоробогатая, И. В. Гигиеническая оценка электромагнитных излучений : учеб.-метод. пособие / И. В. Скоробогатая, Э. И. Леонович. – Минск : БГМУ, 2018. – 39 с.

4 Яковлева, И. В. Безопасность медицинской техники : учеб. пособие / И. В. Яковлева. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 220 с.

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ФИКСИРОВАННЫХ ДЛИНАХ ВОЛН

Цель работы: изучить особенности распространения светового потока на границе раздела сред, конструкцию и принцип работы спектрофотометра «СОЛАР» РВ 2201, методику измерения оптических характеристик с помощью специализированного программного обеспечения, а также провести измерения коэффициента отражения на фиксированных длинах волн в различных образцах.

Теоретические сведения

4.1 Электромагнитный спектр и его свойства

Спектр – это распределение по энергиям квантов электромагнитного излучения, поглощенного, выделившегося или рассеянного при переходах электронов, атомов или молекул из одних энергетических состояний в другие. Любая электромагнитная волна характеризуется длиной, частотой и скоростью распространения. Количество колебаний электрона за секунду определяет число волн, образующихся за секунду, что называется частотой волны. Расстояние между ближайшими максимумами волн является ее длиной. Частота и длина волны связаны таким образом, что высокочастотные волны имеют короткую длину волны.

Электромагнитные волны классифицируются на радиоволны, инфракрасное излучение (ИК), ультрафиолетовое излучение (УФ), видимое излучение, рентгеновское излучение, гамма-излучение. Совокупность всех электромагнитных волн составляет электромагнитный спектр. Причем точных границ между полосами спектра нет, и излучение каждой частоты и длины волны присвоено двум ограничивающим областям спектра. Для изучения спектров, испускаемых различными источниками, применяют приборы, называемые спектрометрами.

Свет, падающий на границу раздела двух сред с разными показателями преломления, частично поглощается средой и частично возвращается обратно.

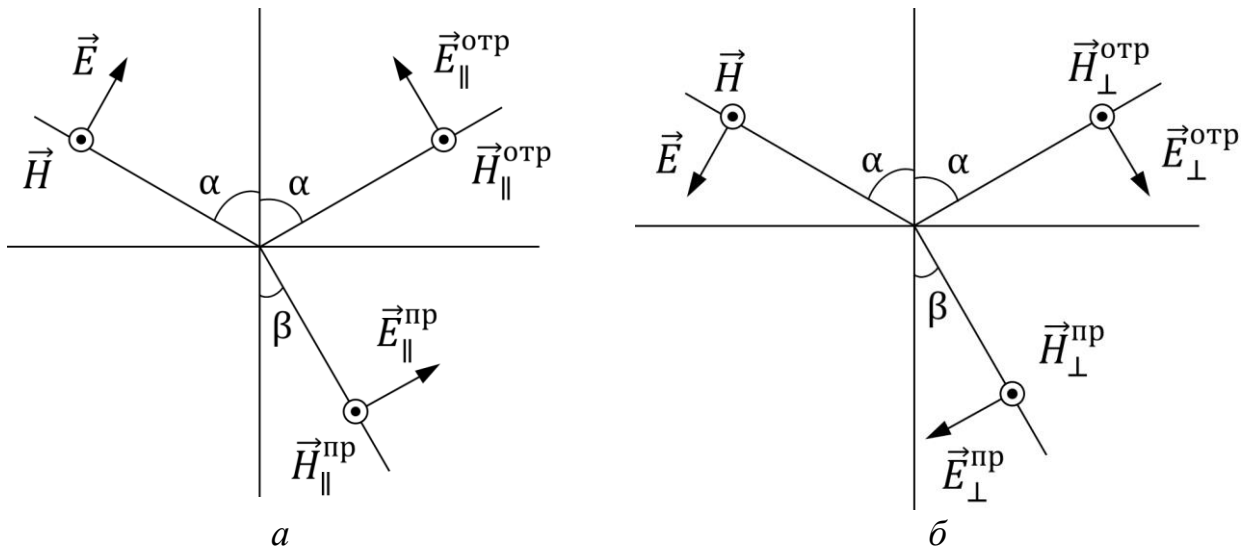
Под поглощенным светом понимается совокупность длин волн, поглощаемых данным веществом, тем самым уменьшая энергию световой волны. Энергия световой волны не полностью поглощается, а частично возвращается обратно за счет отражения от вещества. Источниками появления отраженной волны и преломленной являются заряженные частицы вещества, возникшие при взаимодействии падающей волны и вещества.

Падающая волна является источником света. Источник не всегда содержит только одну длину волны. Например, свет от лампочки накаливания содержит спектр белого и желтого цвета, а свет от современных телевизоров содержит спектры всех цветов.

Спектры представляют в виде графиков, в которых по оси абсцисс отложена либо длина волны λ в нм (мкм), либо частота ν в с^{-1} , либо волновое число в см^{-1} (в ИК и иногда в спектроскопии УФ и на видимой области), а по оси ординат – или оптическая плотность D , или коэффициент молярной экстинкции ϵ , или поглощение $\frac{I_0}{I}$ в % (отн. ед.), или пропускание $\frac{I'}{I_0}$ в % (отн. ед.), где I – доля излучения, удержанного веществом, а I' – доля излучения, прошедшего через образец.

4.2 Отражение, поглощение и пропускание светового потока

В зависимости от угла падения электрического поля волны возможно два случая взаимодействия волны и вещества в разных средах: электрическое поле волны параллельно плоскости падения (рисунок 4, а), электрическое поле волны перпендикулярно плоскости падения (рисунок 4, б).



а – электрическое поле волны параллельно плоскости падения;
б – электрическое поле волны перпендикулярно плоскости падения

Рисунок 4.1 – Отражение и преломление электромагнитной волны

При падении электромагнитной волны в среде 1 с показателем преломления n_1 на границу вещества 2 с показателем преломления n_2 вектор напряженности электрического поля равен \vec{E} и вектор напряженности магнитного поля равен \vec{H} . Волна отражается под углом α и частично преломляется. Вектор напряженности электрического поля при отражении равен $\vec{E}_{\parallel}^{\text{отр}}$ или $\vec{E}_{\perp}^{\text{отр}}$, а вектор напряженности магнитного поля – $\vec{H}_{\parallel}^{\text{отр}}$ или $\vec{H}_{\perp}^{\text{отр}}$. Преломленная волна рас-

пространяется в веществе 2 под углом β и векторами напряженности электрического поля $\vec{E}_{\parallel}^{\text{np}}$ или $\vec{E}_{\perp}^{\text{np}}$ и магнитного поля $\vec{H}_{\parallel}^{\text{np}}$ или $\vec{H}_{\perp}^{\text{np}}$.

По закону отражения света угол падения равен углу отражения, а угол падения и угол преломления связаны соотношением

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (4.1)$$

Коэффициент отражения равен отношению светового потока, отраженного телом, к световому потоку, падающего на него. По формуле Френеля коэффициент отражения волны, поляризованной в плоскости падения, выраженный через углы падения и преломления, равен

$$p_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}. \quad (4.2)$$

Для волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения, формула коэффициента отражения волны имеет вид

$$p_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}. \quad (4.3)$$

При нормальном падении света на вещество угол падения равен 0° и коэффициент отражения волны, поляризованной в плоскости падения и перпендикулярной плоскости падения, равны. Формула коэффициента отражения в таком случае имеет вид

$$p_{\parallel} = p_{\perp} = p = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}. \quad (4.4)$$

При падении света под углом 90° коэффициент отражения равен 1.

Коэффициент отражения в зависимости от угла падения имеет разные значения для границы раздела сред. Рассмотрим случай падения света на границу раздела воздух – стекло. График зависимости коэффициентов отражения от угла падения представлен на рисунке 4.2.

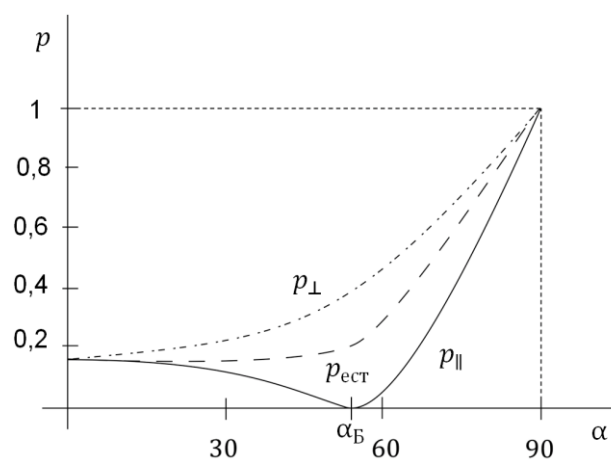


Рисунок 4.2 – График зависимости коэффициентов отражения от угла падения

Средняя кривая соответствует зависимости коэффициента отражения естественного света $p_{\text{ест}}$ от угла падения α . При некотором угле α_B коэффициент p_{\parallel} равен 0. Данное условие выполняется при угле падения α_B :

$$\alpha_B = \arctg \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.5)$$

Обращение в ноль коэффициента P_{\parallel} называется законом Брюстера, а угол α_B – углом Брюстера.

Поглощение и пропускание светового потока телом оцениваются количественно соответствующими коэффициентами. Коэффициент поглощения равен отношению светового потока, поглощенного телом, к световому потоку, падающему на него. Коэффициент пропускания равен отношению светового потока, прошедшего сквозь тело, к световому потоку, падающему на него. В сумме коэффициенты отражения и пропускания равны единице.

4.3 Устройство и принцип работы спектрофотометра

В отличие от спектрометра спектрофотометр предназначен не для измерения потока излучения, а для измерения разности или отношения потоков, прошедших через измерительный канал или канал сравнения.

Спектрофотометры применяются с целью:

- определения концентрации веществ;
- измерения коэффициентов отражения и пропускания;
- измерения в растворах оптической плотности и скорости ее изменения;
- определения наличия примесей;
- изучения химического строения и состава веществ.

Спектрофотометр состоит из источника света, фотоприемника, монохроматора, кюветы с исследуемым образцом, детектора, регистратора.

Монохроматор позволяет выделять пучок потока электромагнитного излучения с узким интервалом длин волн. Схема монохроматора включает дифракционную решетку или призму, выделяющую излучение с определенной длиной волны.

В качестве диспергирующего элемента в спектральных приборах используют отражательные решетки различных типов: плоские, вогнутые, с различной формой и профилем штриха. При падении пучка на решетку происходит два явления: дифракция на каждом зеркальном штрихе и интерференция лучей, отраженных от различных штрихов.

В призме могут быть выделены два сечения: меридиональное (главное) и сагиттальное (перпендикулярное главному). В меридиональном сечении призма разлагает свет в спектр и одновременно вносит в пучок угловое увеличение. В плоскости сагиттального сечения призма действует как плоскопараллельная пластинка, поэтому угловое увеличение отсутствует.

Наиболее распространены трехгранные призмы с преломляющим углом, равным 60° . Призмы с большим преломляющим углом не применяются по причине увеличения потерь на отражение и с уменьшением сечения пучка. Кроме обычных трехгранных призм в монохроматорах применяются призма постоянного отклонения и призма Фери. Призма постоянного отклонения состоит из двух 30° -х призм, приклеенных к катетным граням прямоугольной призмы. Призма Фери представляет собою сочетание вогнутого зеркала с призмой, у которой обе рабочие грани искривлены.

Фотоприемники запечатлевают уровень светового излучения, который проходит через материал. Некоторые приборы оборудованы фотодиодной матрицей, внутри которой есть встроенный датчик. Он трансформирует световой сигнал в электрический, что отражается на экране оборудования.

Погрешность спектрофотометра незначительна и зависит от длины волны. В среднем она составляет $0,1$ нм и не превышает $0,5$ нм.

Конструктивно спектрофотометр может быть выполнен по двум схемам. При первой на пробу попадает монохроматический световой луч с определенной длиной волны спектрофотометра, который при прохождении сквозь материал направляется в фотоприемник. Там измеряется разница между потоками. При второй световой поток попадает на реагент непосредственно от лампы, после чего монохроматор выделяет небольшой пучок на фотоприемник.

Различают однолучевые и двухлучевые схемы спектрофотометров.

В однолучевых схемах имеется единственный источник света (рисунок 4.3).

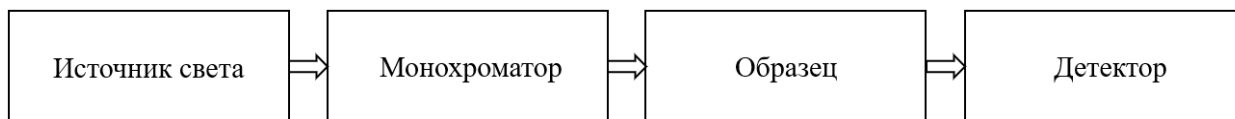


Рисунок 4.3 – Однолучевая схема

В двухлучевом спектрофотометре (рисунок 4.4) один луч падает на исследуемый образец, а второй – на эталон. Двухлучевые спектрофотометры более точные, позволяют добиться высокой степени повторяемости результатов, менее чувствительны к изменению параметров окружающей среды.

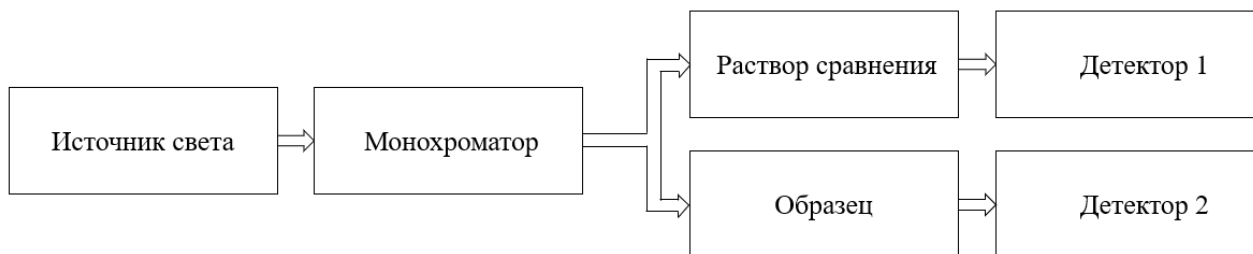


Рисунок 4.4 – Двухлучевая схема

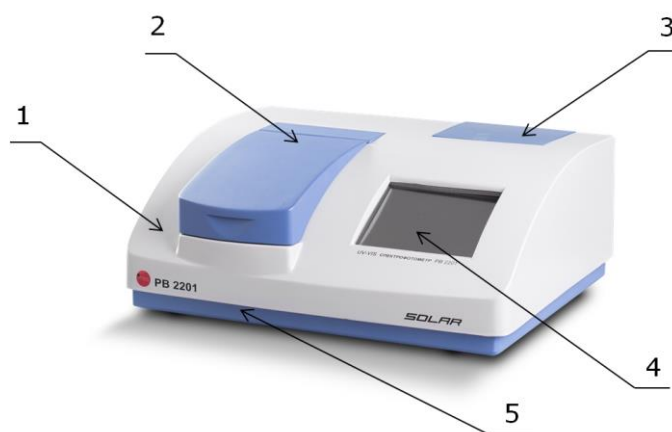
Спектрофотометры могут различаться по следующим характеристикам:

- по числу монохроматоров – с одним или двумя;
- по типу источника света и рабочему диапазону – видимый, ультрафиолетовый, инфракрасный;
- по количеству приемников вторичного излучения – одному или нескольким;
- по разновидности конструкции – стационарные или мобильные.

Использование спектрофотометра для измерения отраженного спектрального потока от твердых поверхностей может гарантировать высокую точность показателей. При исследовании внешние условия не влияют на результат анализа. Анализ данных от прибора происходит в режиме реального времени.

4.4 Спектрофотометр «СОЛАР» РВ 2201

Спектрофотометр «СОЛАР» РВ 2201 предназначен для измерения коэффициентов пропускания, оптической плотности в прозрачных жидких растворах и твердых образцах и определения концентрации в области спектра 190–1100 нм с выводом результатов измерения на встроенный дисплей с сенсорной панелью управления или на компьютер. Внешний вид спектрофотометра приведен на рисунке 4.5.



- 1 – кожух; 2 – крышка кюветного отделения; 3 – термопринтер;
4 – ЖК-индикатор с сенсорной панелью управления; 5 – поддон

Рисунок 4.5 – Спектрофотометр «СОЛАР» РВ 2201

Области применения спектрофотометра – лаборатории экологического контроля, ветеринария, учреждения фармацевтики, здравоохранения, науки, лаборатории контроля качества продукции и сырья.

В основу работы спектрофотометра положен принцип измерения на определенной длине волны отношения светового потока I , прошедшего через исследуемый образец, к световому потоку I_0 в отсутствие образца.

Измерительные функции прибора:

- измерение спектров поглощения, пропускания, отражения;
- измерение оптической плотности, коэффициента пропускания и коэффициента отражения на фиксированных длинах волн;
- определение концентрации на одной, двух, трех длинах волн по фактору, стандарту, графику;
- многоволновые кинетические измерения;
- определение концентрации по запрограммированным методикам;
- расчет координат цвета и цветности.

С основными техническими характеристиками прибора можно ознакомиться в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики спектрофотометра «СОЛАР» РВ 2201

Технические характеристики	Значение
Оптическая схема	Двухлучевая
Монохроматор	Двойной со сложением дисперсии, относительное отверстие 1 : 4, с дифракционными решетками 1200 штр/мм
Спектральный диапазон	От 190 до 1100 нм
Выделяемый спектральный интервал	2 нм
Шаг спектрального сканирования	0,2; 0,5; 1; 2; 5 нм
Скорость сканирования	От 50 до 5000 нм/мин
Точность фотометрирования	Менее 1 %
Фотометрический диапазон	От –0,3 до 3 Б; от 0,1 до 200 % Т
Уровень мешающего излучения	Менее 0,03 % Т на длине волны 220 и 340 нм
Длина оптического пути	До 100 мм
Интерфейс	RS 232, USB

Источником излучения в спектрофотометре «СОЛАР» РВ 2201 является импульсная ксеноновая лампа, приемником излучения – кремниевый фотодиод.

Срок службы ксеноновой лампы практически не ограничен, в отличие от галогеновой и дейтериевой ламп. Помимо удобства в эксплуатации, это существенно снижает расходы на обслуживание прибора. Кроме этого, при использовании посторонний свет не влияет на точность измерений. Работа с исследуемыми образцами может проводиться с открытым кюветным отделением.

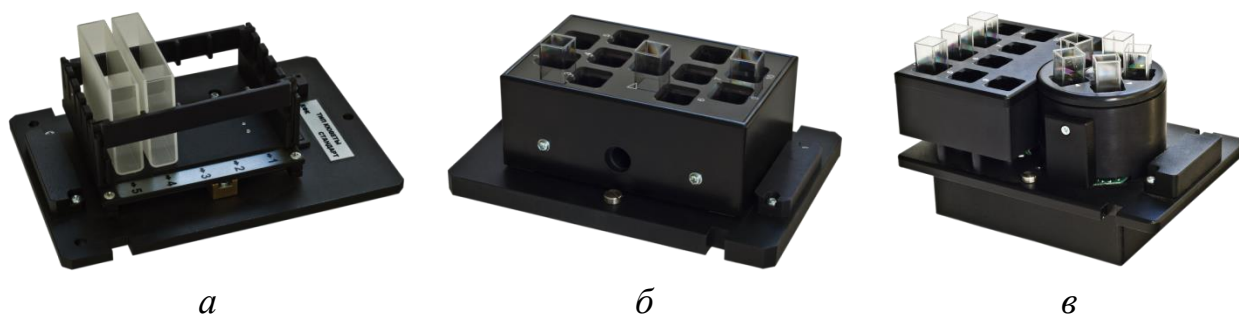
Кремниевый фотодиод обладает высокой чувствительностью, малым временем отклика и низкими шумами и подходит для измерений в широком диапазоне длин волн.

Высокая точность измерений спектрофотометра обусловлена наличием двойного монохроматора, что обеспечивает минимальный уровень мешающего излучения.

Наличие сенсорной панели управления позволяет работать на спектрофотометре в автономном режиме (без подключения к компьютеру).

Распечатка результатов измерения происходит без подключения спектрофотометра к компьютеру благодаря встроенному термопринтеру.

В состав спектрофотометра входят различные типы кюветных держателей (рисунок 4.6, *а–в*). Кюветный держатель *A* (рисунок 4.6, *а*) рассчитан на 3–5 кювет. Стандартные прямоугольные кюветы с длиной оптического пути 5–100 мм (5 кювет), кюветы «КФК» с длиной оптического пути до 50 мм (3 кюветы).



а — кюветный держатель *A*; *б* — кюветный держатель *B*;
в — кюветный держатель *C*

Рисунок 4.6 – Разновидности кюветных держателей

Термостатируемый кюветный держатель *B* для 11 стандартных прямоугольных кювет с длиной оптического пути 10 мм представлен на рисунке 4.6, *б*. Измерительная ячейка на одну кювету оборудована электронной магнитной мешалкой.

Автоматизированный пятипозиционный термостатируемый кюветный держатель *C* со встроенным термостатом на 10 кювет и температурой термостатирования 37 °С представлен на рисунке 4.6, *в*.

На рисунке 4.7 показаны дополнительные измерительные приставки.

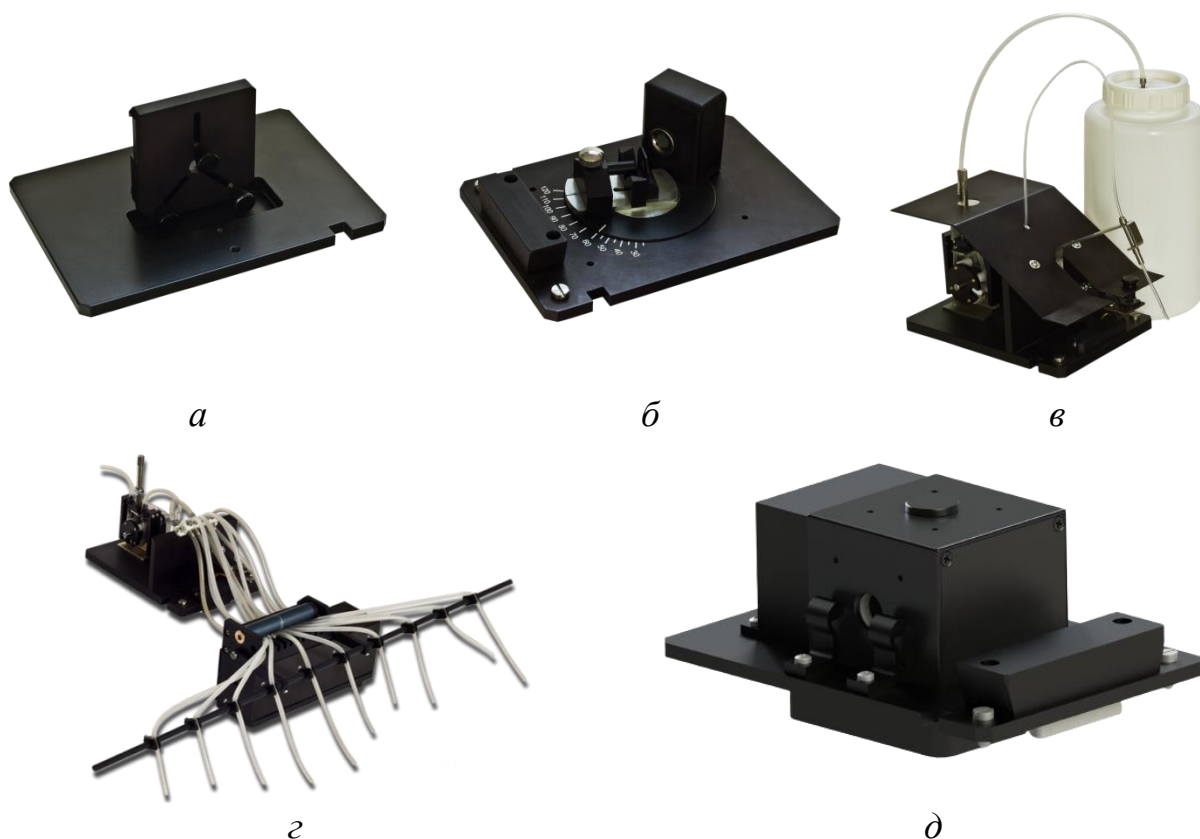
В держателе твердых образцов (рисунок 4.7, *а*) диаметр устанавливаемого образца – от 8 до 50 мм. Толщина образца – до 8 мм.

Приставка для измерения коэффициента отражения (рисунок 4.7, *б*) позволяет измерять абсолютные и относительные значения коэффициента отражения, максимальный размер образцов – 50×50×10 мм.

Насос перистальтический с проточной кюветой (рисунок 4.7, *в*) повышает производительность при большом объеме исследований, он необходим при работе с агрессивными жидкостями. Его производительность 12 мл/мин.

Автоматизированное десятипозиционное распределительное устройство (рисунок 4.7, *г*) подключается к насосу перистальтическому и ускоряет процесс проведения большого количества рутинных измерений.

Интегрирующая сфера используется для изучения неоднородных образцов (рисунок 4.7, *д*).



a – держатель твердых образцов; *б* – приставка для измерения коэффициента отражения; *в* – насос перистальтический с проточной кюветой; *г* – распределительное устройство; *д* – интегрирующая сфера

Рисунок 4.7 – Приставки спектрофотометра РВ 2201

При работе со спектрофотометром замену приставки производить при выключенном приборе!

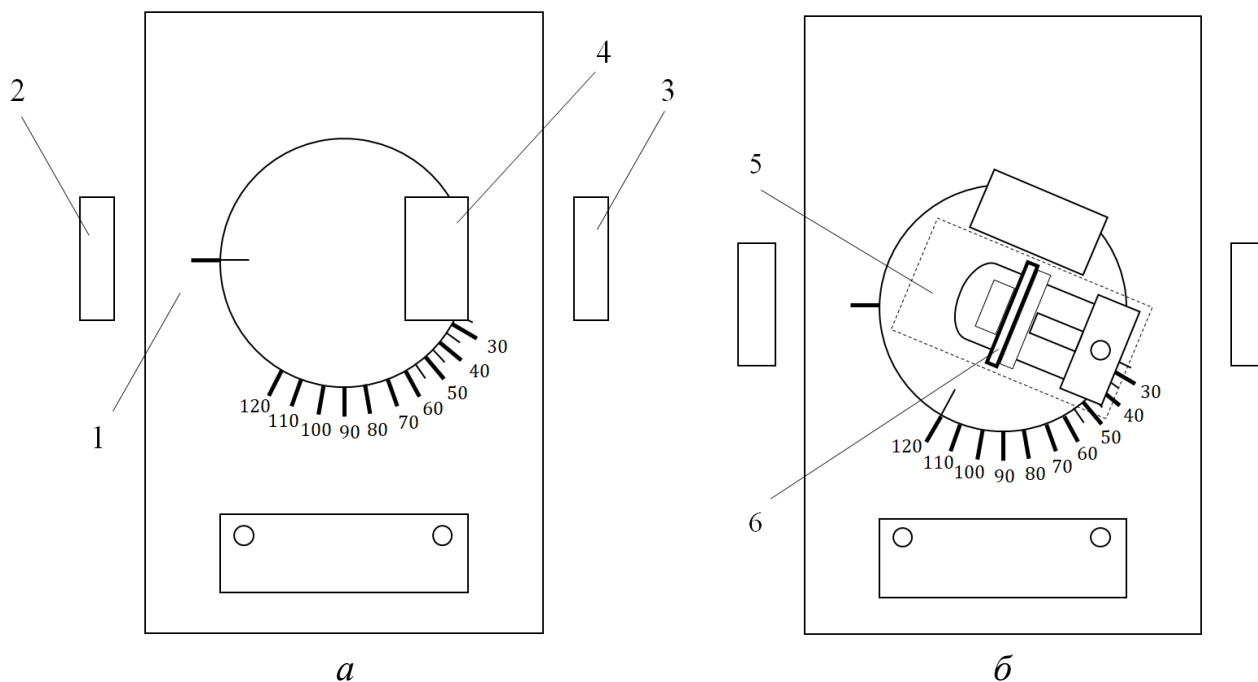
Порядок выполнения работы

- 1 Изучите теоретические сведения.
- 2 Получите исследуемые образцы у преподавателя.
- 3 Установите приставку для измерения коэффициента отражения (рисунок 4.7, б) в кюветное отделение прибора.
- 4 Включите спектрофотометр РВ 2201 и запустите программное обеспечение «УФ Спектрофотометр РВ 2201» с рабочего стола персонального компьютера либо найдите его через путь: C:\Program Files\SOLAR\PB2201. Двойным нажатием левой кнопки мыши запустите программу, выбрав файл «PB2201.exe». Если при запуске программы появилось сообщение «Устройство не обнаружено», проверьте подключение *USB*-кабеля к компьютеру и нажмите кнопку «Повторить».

5 Проведите измерение коэффициента отражения в нуле (рисунок 4.8, *а*). Для этого необходимо на приставке для измерения коэффициента отражения установить фотодетектор (4) напротив источника света (2), как показано на рисунке 4.8, *а*, после закрыть крышку. В главном окне программы выберите закладку «Фотометрия». В появившемся окне выберите режим измерений «Пропускание», затем несколько раз нажав кнопку «Добавить», введите длины волн, согласно таблице 4.2. Произведите нулевое измерение, нажав кнопку «Нуль».

Примечание – В программе для измерения коэффициента отражения используется функционал измерения коэффициента пропускания.

6 Проведите измерение коэффициента отражения исследуемого образца (рисунок 4.8, *б*). Систему с фотодетектором (4) установите на угол 120° , как показано на рисунке 4.8, *б*. Поместите исследуемый образец (6) в съемный держатель (5), закрутите крепежный винт и выставьте полученную систему с держателем на угол 25° . В закладке «Фотометрия» нажмите кнопку «Старт». Запишите результаты в таблицу 4.2 и повторите измерения коэффициента отражения при различных величинах угла.



а – в режиме измерения «Нуля» (1 – приставка для измерения коэффициента отражения; 2 – источник света; 3 – приемник; 4 – фотодетектор);

б – в режиме измерения коэффициента отражения (5 – съемный держатель; 6 – образец)

Рисунок 4.8 – Схема установки приставки

7 Выполните измерения для всех образцов согласно пунктам 5–6, проанализируйте полученные результаты и постройте графики установленных зависимостей.

Таблица 4.2 – Значение коэффициента отражения R для заданных длин волн

Длина волны, нм	Значение коэффициента отражения R , %								
	Угол съемного держателя с образцом								
	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°
190									
220									
325									
340									
405									
520									
570									
620									
670									
700									

Содержание отчета

- 1 Краткие теоретические сведения.
- 2 Схема измерения коэффициента отражения.
- 3 Таблицы с экспериментальными данными для исследуемых образцов.
- 4 Описание полученных результатов в виде графиков и их характеристика.
- 5 Выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите процесс образования электромагнитных волн. Из каких волн состоит электромагнитный спектр?
- 2 Что показывает коэффициент отражения и коэффициент пропускания?
- 3 Из каких конструктивных элементов состоит спектрофотометр? Для чего и в каких областях применяется прибор? Опишите его характеристики.
- 4 Назовите оптические схемы спектрофотометра и опишите их преимущества.
- 5 Какие существуют разновидности фотоприемников?

Список использованных источников

- 1 Лебедева, В. В. Экспериментальная оптика / В. В. Лебедева. – 4-е изд. – М. : Физ. фак. МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005. – 282 с.
- 2 Родионов, С. А. Основы оптики. Конспект лекций / С. А. Родионов. – СПб. : СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 167 с.
- 3 Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 752 с.
- 4 Спектрофотометр UV-VIS РВ 2201 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solar.by/>. – Дата доступа: 06.05.2023.
- 5 Федорова, О. А. Методы оптической спектроскопии / О. А. Федорова, И. И. Кулакова – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2015. – 117 с.
- 6 Физические основы распространения оптических волн в волоконных световодах: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://swsu.ru/sveden/files/MU_Kvantovaya_i_opticheskaya_elektronika_LRNo_1\(1\).pdf](https://swsu.ru/sveden/files/MU_Kvantovaya_i_opticheskaya_elektronika_LRNo_1(1).pdf) – Дата доступа: 20.09.2024.

Учебное издание

Дик Сергей Константинович
Бондарик Василий Михайлович
Мешкова Карина Евгеньевна и др.

**КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ
И СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *А. Ю. Шурко*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Г. Бабичева*

Подписано в печать 16.10.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 4,3. Тираж 30 экз. Заказ 46.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск