

Я.В. Павлова, С.И. Сакович

Ослабление низкоинтенсивного лазерного излучения венозной кровью и эритроцитной массой человека

В настоящее время низкоинтенсивное лазерное излучение широко применяется в медицинской практике. Однако до сих пор нет четкого представления о механизмах лечебного воздействия на биообъекты, а также нет методик выбора параметров лазерного излучения при конкретном заболевании. Для выбора параметров необходимо знать, как объект поглощает, рассеивает, ослабляет лазерное излучение. Зная величину ослабления, можно определить глубину проникновения лазерного излучения.

В данной статье приведены результаты измерений коэффициента ослабления излучения гелий-неонового и полупроводникового лазеров при прохождении через кровь человека.

Объектами для исследования служили венозная кровь и эритроцитная масса практически здоровых людей, т.е. лиц, не имеющих заболевания крови или других заболеваний, влияющих на изменение состава, формы или других свойств эритроцитов. При этом средний состав гемоглобина в крови находился в пределах 130–135 г/л, а количество эритроцитов $3,5\text{--}4,5 \cdot 10^{12}$ /л. Образцы крови забирались из кубитальной вены в области локтевого сгиба в стандартных условиях после 10–12-часового голодания, утром. Чтобы кровь сохраняла свои свойства после забора, в нее добавляли на 10 мл 0,1 мл гепарина. Гепарин существенно не увеличивает объем крови, т.е. не разводит ее, а, с другой стороны, гепарин в указанной дозе существенно не влияет на структурно-функциональное состояние форменных элементов крови. Количество эритроцитов в образце подсчитывалось с помощью камеры Горяева.

По внешнему виду эритроцитная масса отличается от венозной крови лишь меньшим объемом плазмы над слоем осевших клеток и представляет собой концентрат эритроцитов с гематокритным числом 65–80% [1]. По своему составу, физиологическим и лечебным свойствам эритроцитная масса равноценна эритроцитам консервированной крови.

Поскольку концентрация эритроцитов в крови значительно превышает концентрацию лейкоцитов и тромбоцитов, то в дальнейшем будем рассматривать кровь как плазму с взвешенными в ней красными кровяными тельцами – эритроцитами, которые равномерно распределены

в слое крови и хаотически ориентированы по отношению друг к другу. Выбор крови в качестве объекта исследования обусловлен тем, что кровь является составляющей компонентой практически любой биологической ткани. Стабильность состава объектов исследований с точки зрения их оптических свойств подтвердили путем проведения экспериментов в различные временные промежутки, предварительно размещивая суспензию до однородного состояния при оседании эритроцитов. Выбор исследуемых длин волн обусловлен их широким использованием в медицинской практике. Учитывая тот факт, что ослабление есть результат рассеяния и поглощения, необходимо определить величину вкладов каждого из этих процессов. Основными центрами рассеяния и поглощения в крови являются эритроциты, так как их число велико по сравнению с количеством других форменных элементов. Поэтому прежде всего представлял интерес эксперимент по определению зависимости коэффициента ослабления от количества эритроцитов.

Действительная часть относительного показателя преломления эритроцитов $n_{\text{отн}} = 1,037 \div 1,055$, мнимая $\chi = 10^{-5} \div 10^{-4}$, наиболее вероятный параметр дифракции $\rho_0 = 2\pi n/\lambda = 24 \div 36$, где n – показатель преломления среды, в которой находятся частицы; r – радиус частицы; λ – длина волны. Указанные оптические параметры эритроцитов приведены для длины волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм [2].

Эксперимент проводился с двумя различными объектами для изучения данной зависимости в широкой области плотности упаковки. Первый эксперимент проводили с венозной кровью, второй – с эритроцитной массой. Проведение экспериментов с указанными выше объектами позволяет получить зависимость коэффициента ослабления при изменении количества эритроцитов в пределах $0,19 \cdot 10^5 \div 12,9 \cdot 10^6$ мкл⁻¹.

Для теоретического расчёта коэффициента ослабления одиночного эритроцита была использована программа К. Борена и Д. Хафмана, написанная на языке программирования «FORTRAN» [3]. В программу вносили различные значения радиусов эритроцитов, наряду с размером учитывались распределение эритроцитов по размерам, значение относительного показателя пре-

ломления эритроцитов, длина волны лазерного излучения. Результаты, вычисленные с помощью программы, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значение фактора эффективности ослабления для одиночного эритроцита при некоторых значениях их диаметра

Диаметр эритроцита D , мкм	5	6	7	8	9
Содержание, %	0,5	4	39	54	2,5
Фактор эффективности ослабления	1,44	1,91	2,35	2,73	3,02

Средний диаметр эритроцита составляет 7,2 мкм, при этом значение фактора эффективности ослабления равно 2,43.

Для того, чтобы перейти к коэффициенту ослабления системой частиц радиуса r , необходимо воспользоваться выражением, вытекающим из закона Бугера для дисперсных сред [4]:

$$\alpha = \int_0^{\infty} N\pi r^2 f(r)Kdr, \quad (1)$$

где K – фактор эффективности ослабления; N – концентрация; $f(r)$ – функция распределения частиц по размерам. В выражении (1) распределение частиц по размерам есть величина, норми-

рованная на единицу, т.е. $\int_0^{\infty} f(r)dr = 1$. В предполо-

жении, что все эритроциты имеют одинаковый радиус, получаем, что коэффициент ослабления можно вычислить с помощью выражения

$$\alpha = N\pi r^2 K. \quad (2)$$

Эксперименты по определению коэффициента ослабления проводились на разработанных установках с гелий-неоновым и полупроводниковым лазерами. Схемы установок приведены на рисунках 1, 2.

В первую очередь определили линейность установок, используя нейтральные светофильтры с известными коэффициентами пропускания. Если на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) подавать световой поток, то при увели-

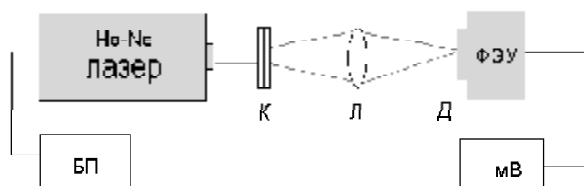


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с гелий-неоновым лазером для определения коэффициента ослабления

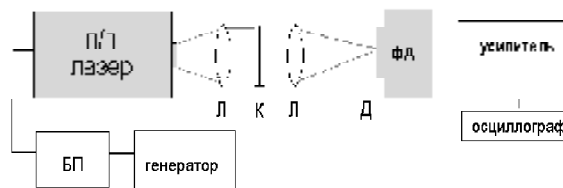


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с полупроводниковым лазером для определения коэффициента ослабления

чении интенсивности будут прямо пропорционально увеличиваться электрические сигналы. Этот режим работы называется линейным, он был реализован в наших экспериментах.

После этого определяли коэффициент ослабления лазерного излучения при прохождении через кровь. Для этого измеряли напряжения, снимаемые ФЭУ, которые пропорциональны падающему и прошедшему через вещество потокам $U_0 \sim \Phi_0$, $U_d \sim \Phi(d, \lambda)$.

Измерение коэффициентов ослабления производили следующим образом. На выходе гелий-неоновый лазер (рис. 1) ($\lambda = 0,63$ мкм) дает почти параллельный пучок, который, падая на кювету с кровью K , рассеивается. После этого излучение собирается линзой L (фокусное расстояние $f = 0,1$ м) и фокусируется на фотоэлектронный умножитель ФЭУ (ФЭУ-68). При этом излучение, рассеянное под углом более 1° , отсекается с помощью диафрагмы D . Показания снимаются с милливольтметра мВ (Щ-1516).

Импульсное излучение полупроводникового лазера ($\lambda = 0,89$ мкм), проходя через кювету и систему из двух линз (фокусное расстояние $f = 0,05$ м), фокусируется на фотодиод ФД (ФД-24), перед которым расположена диафрагма, ограничивающая прием рассеянного излучения под углом более $3,8^\circ$. Для расчета коэффициента ослабления использовали формулу Бугера с учетом коэффициента пропускания кварцевой кюветы с прозрачными окнами, в которую помещалась кровь. На рисунках 1, 2 БП – блоки питания лазеров.

Результаты, полученные в ходе экспериментов по определению коэффициентов ослабления для разных проб не разведенной венозной крови и эритроцитной массы при толщине слоя $d = 1,08$ мм и длинах волн излучения $\lambda = 0,63$ и $\lambda = 0,89$ мкм, приведены в таблице 2.

Таблица 2
Коэффициент ослабления, mm^{-1}

	$\lambda = 0,63$ мкм	$\lambda = 0,89$ мкм
Венозная кровь	8,74–8,97	7,92–8,15
Эритроцитная масса	11,24–11,32	8,41–8,94

Зависимость коэффициента ослабления от параметров крови

	Коэффициент ослабления α , мм ⁻¹ (эксперимент)	Коэффициент ослабления α , мм ⁻¹ (теория)	Число эритроцитов N , 10 ⁵ 1/мкл	Степень разведения крови x
Эритроцитная масса	29,34	98,13	129,00	цельная
	17,91	59,86	78,70	1/1,5
	13,99	46,76	61,50	1/2
	10,93	36,58	48,10	1/3
	8,99	28,52	37,50	1/4
Венозная кровь	8,99	28,15	37,00	цельная
	8,94	15,21	20,00	1/2
	8,39	9,51	12,50	1/3
	7,71	6,67	6,50	1/6
	6,45	5,64	1,50	1/25

Нами также были проведены эксперименты по измерению коэффициента ослабления при изменении количества эритроцитов. В таблице 3 приведено сравнение экспериментальных и теоретических значений коэффициентов ослабления для всех образцов крови. Результаты получены для длины волны $\lambda = 0,632$ мкм и толщины кюветы $d = 1,08$ мм. Расчеты выполнялись по формуле (2) при $d = 7,2$ мкм, $K = 2,43$.

Зависимость коэффициента ослабления от концентрации эритроцитов в микролитре крови приведена на рисунке 3.

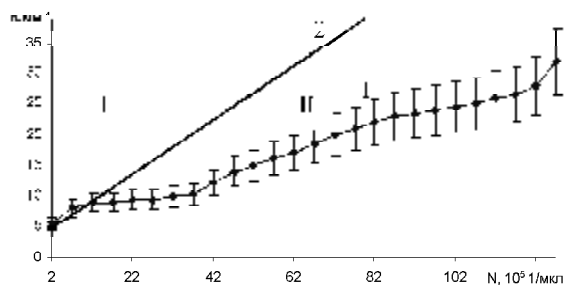


Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая зависимость коэффициента ослабления от концентрации частиц в микролитре крови при $d = 1,08$ мм: I – венозная кровь, II – эритроцитная масса

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента ослабления от количества эритроцитов для двух длин волн для венозной крови. Число эритроцитов изменяли посредством разбавления крови её плазмой. Подсчет эритроцитов проводили с использованием сетки Горяева.

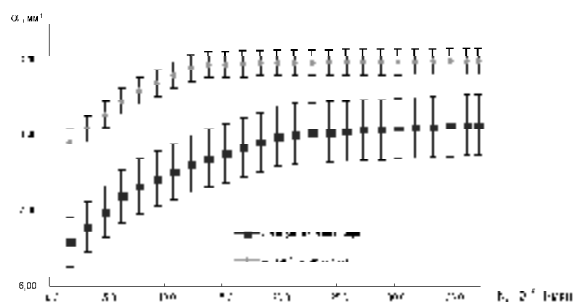


Рис. 4. Графики зависимости коэффициентов ослабления от концентрации эритроцитов в одном микролитре крови

Количество эритроцитов в венозной крови варьировало в интервале от $N = 3,7 \cdot 10^5$ до $N = 1,5 \cdot 10^6$ в одном микролитре крови, при этом коэффициент ослабления изменялся от 8,97 до 7,91 мм⁻¹ для гелий-неонового лазера и от 8,15 до 6,58 мм⁻¹ для полупроводникового лазера. Можно предположить, что при изменении концентрации эритроцитов в 25 раз лечебное воздействие на кровь человека остается неизменным, так как коэффициент ослабления лазерного излучения увеличивается в 1,1 раза, а далее для концентрации N от $1,25 \cdot 10^6$ до $3,7 \cdot 10^6$ 1/мкл остается практически неизменным.

Также проведены эксперименты по изучению зависимости коэффициента ослабления эритроцитной массы от толщины слоя. Для этого были изготовлены кюветы с толщиной от 65 до 1000 мкм. Эксперименты проводились для цельной и разбавленной эритроцитной массы с двумя ти-

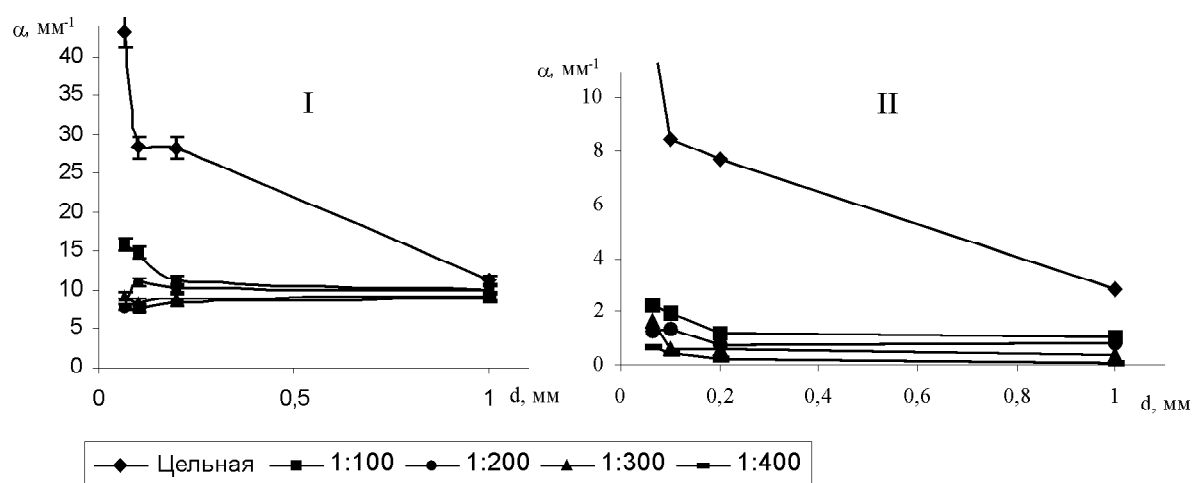


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления лазерного излучения I) $\lambda = 0,63$ мкм, II) $\lambda = 0,89$ мкм от толщины слоя эритроцитной массы при различных степенях разведения

пами лазеров. По полученным данным можно построить зависимости коэффициента ослабления от толщины слоя для различных концентраций. Полученные зависимости представлены на рисунке 5.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что с увеличением толщины дисперсного слоя уменьшается коэффициент ослабления. Это обусловлено, на наш взгляд, тем, что при больших геометрических толщах возрастает роль многократного рассеяния, когда значительная часть рассеянного света попадает в приемник. Также видно, что теоретическая зависимость расходится с экспериментальной. Это говорит о том, что в системе частиц с данной плотностью упаковки эффектами многократного рассеяния пренебрегать нельзя. Коэффициент ослабления для эритроцитной массы может быть рассчитан

только с использованием уравнения переноса излучения.

Кроме того, обнаружено, что излучение полупроводникового лазера ослабляется меньше, чем излучение гелий-неонового. Это свидетельствует о том, что излучение с $\lambda = 0,89$ мкм проникает на большую глубину в кровь человека.

В результате расчета погрешностей для экспериментов с гелий-неоновым и полупроводниковым лазерами по определению коэффициента ослабления лазерного излучения при прохождении через слой крови толщиной $d = 1,08$ мм были получены следующие оценки: относительная погрешность для эксперимента с гелий-неоновым лазером составляет 3%, с полупроводниковым – 7%.

Авторы благодарят профессора В.И. Букатого за помощь в работе.

Литература

1. Катаев М.И. Применение методов и средств лазерной техники в биологии и медицине. – Киев, 1980.
2. Аграненко Н.В. Справочник по переливанию крови и кровезаменителей / под ред. О.К. Гаврилова. – М., 1982.
3. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафман. – М., 1987.
4. Кабанов М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 3 : Атмосферный аэрозоль / М.В. Кабанов, М.В. Панченко. – Томск, 1984.