

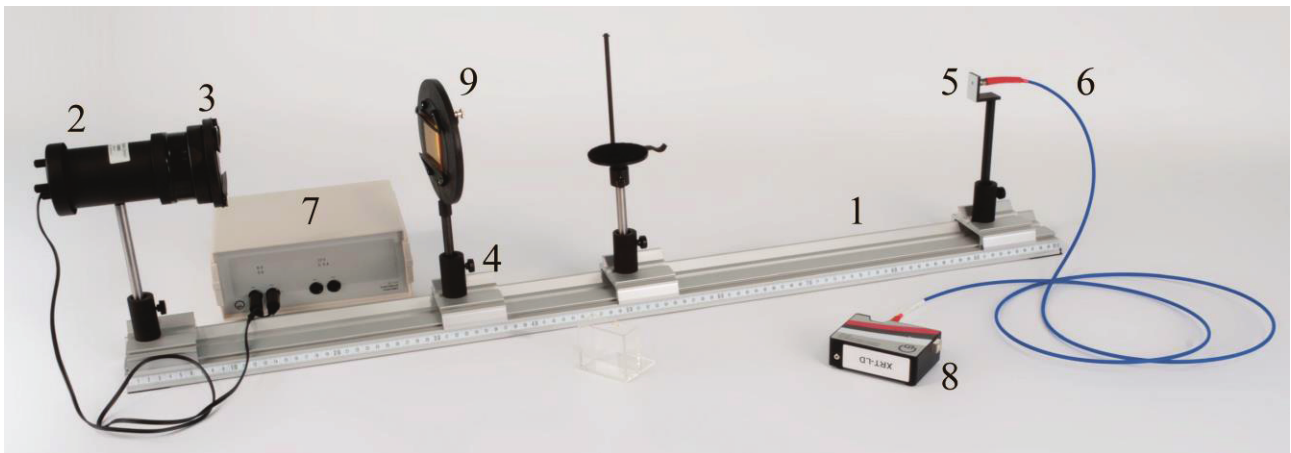
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №39

### ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ВЕЩЕСТВОМ. ЗАКОН БУГЕРА–ЛАМБЕРТА–БЕРА

*Поляков Даниил, 19.Б23-фз*

**Цель работы:** измерить спектр пропускания светофильтров и спектр их совместного пропускания, рассчитать спектр совместного пропускания светофильтров и сравнить с экспериментальным; измерить спектры поглощения растворов с известной концентрацией зелёнки и раствора с неизвестной концентрацией, определить концентрацию неизвестного раствора.

#### Оборудование



- Оптическая скамья (1);
- Лампа (2) с асферическим конденсором (3);
- Держатель светофильтра (9);
- Оптоволоконный световод (6);
- Источник питания (7);
- USB–спектрометр;
- Набор светофильтров;
- Набор кювет с водой и растворами;
- Диафрагма.

## Расчётные формулы

- Спектр пропускания вещества:

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_{\text{ref}}(\lambda)}$$

$I(\lambda)$  — спектр выходящего света;  
 $I_{\text{ref}}(\lambda)$  — опорный спектр.

- Спектр совместного пропускания светофильтров:

$$T(\lambda) = T_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda)$$

$T_1(\lambda), T_2(\lambda)$  — спектры пропускания фильтров по отдельности.

- Спектр поглощения вещества:

$$E(\lambda) = \log_{10} \frac{I_{\text{ref}}(\lambda)}{I(\lambda)}$$

$I(\lambda)$  — спектр выходящего света;  
 $I_{\text{ref}}(\lambda)$  — опорный спектр.

- Концентрация поглощающего вещества:

$$C = \alpha(\lambda) \cdot E(\lambda)$$

$\alpha(\lambda)$  — коэффициент пропорциональности вещества, зависящий от длины волны;  
 $E(\lambda)$  — оптическая плотность вещества, зависящая от длины волны.

- Концентрация неизвестного раствора по градуировочным прямым:

$$C_i = \alpha(\lambda_i) \cdot E(\lambda_i)$$
$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}$$

$\alpha(\lambda_i)$  — коэффициент наклона прямой, зависящий от длины волны;  
 $E(\lambda_i)$  — оптическая плотность вещества, зависящая от длины волны.

- Среднеквадратичное отклонение значения концентрации неизвестного раствора:

$$\Delta_{\bar{C}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{(n-1)n}}$$

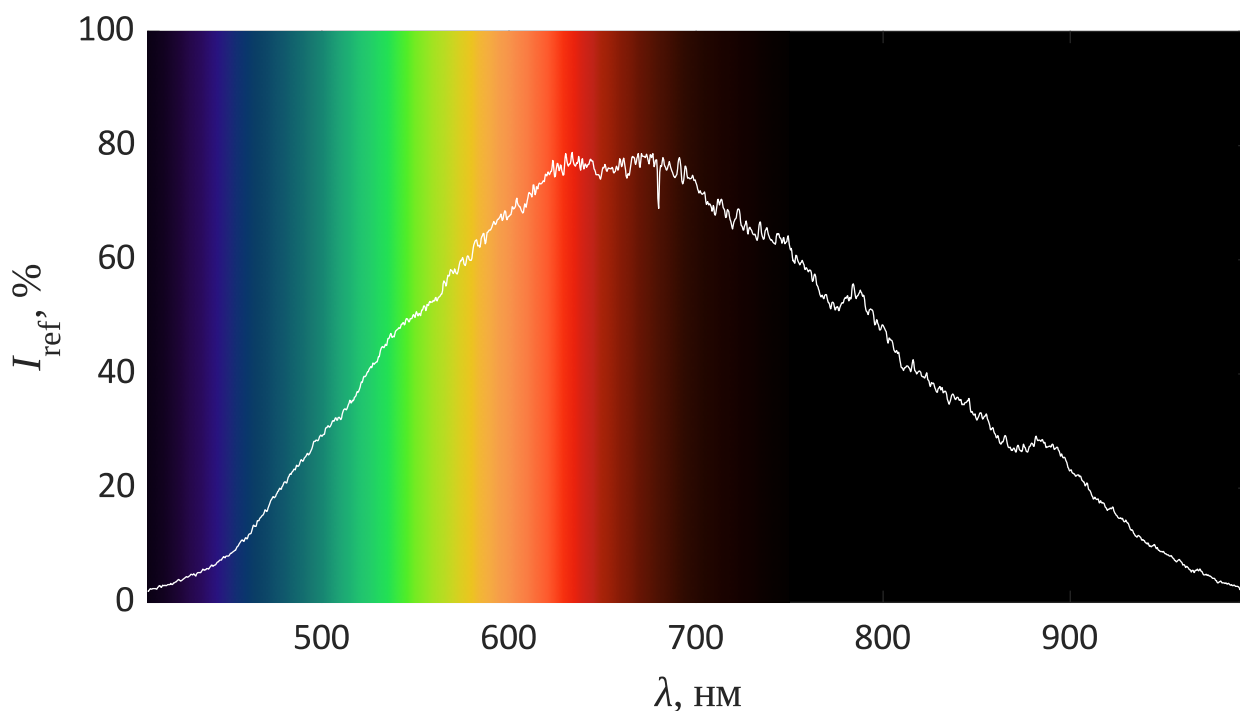
## Порядок измерений

1. Запустим ПО SpectraLab. При выключенной лампе и комнатном свете зафиксируем спектр фонового шума  $I_0(\lambda)$ , который будет вычитаться из каждого измерения спектра. Включим лампу, подождём несколько секунд, пока интенсивность лампы не установится.
2. Зафиксируем спектр света лампы  $I_{\text{ref}}(\lambda)$  как опорный. Установим красный фильтр в держатель на пути между лампой и приёмником. Зафиксируем спектр выходящего света  $I(\lambda)$ , спектр пропускания  $T(\lambda)$  и спектр поглощения  $E(\lambda)$ . Повторим измерения для жёлтого, зелёного и бирюзового фильтров. Перед установкой каждого нового фильтра будем фиксировать опорный спектр  $I_{\text{ref}}(\lambda)$ .
3. Выполним аналогичные измерения для пар фильтров «красный+жёлтый» и «зелёный+бирюзовый».
4. Установим диафрагму в держатель. Установим кювету с водой на пути между лампой и приёмником. Зафиксируем спектр проходящего света  $I_{\text{ref}}(\lambda)$  как опорный. Вместо кюветы с водой установим кювету с известным раствором. Зафиксируем спектр выходящего света  $I(\lambda)$ , спектр пропускания  $T(\lambda)$  и спектр поглощения  $E(\lambda)$ . Повторим измерения для двух остальных известных и одного неизвестного раствора.

## Результаты

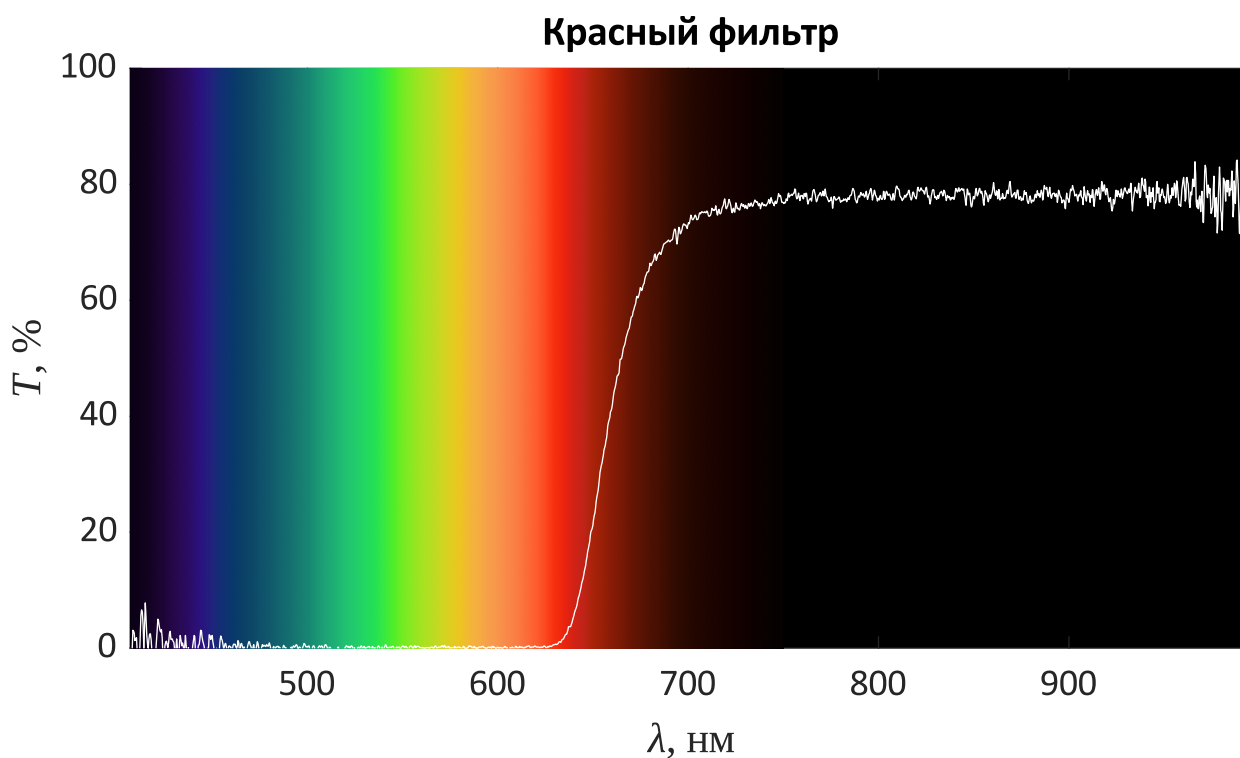
Примечание: построение графиков и аппроксимация зависимостей выполнены с помощью ПО MATLAB. Погрешности коэффициентов аппроксимации рассчитаны с доверительной вероятностью  $P = 95\%$ .

## 1. Прохождение света через светофильтры



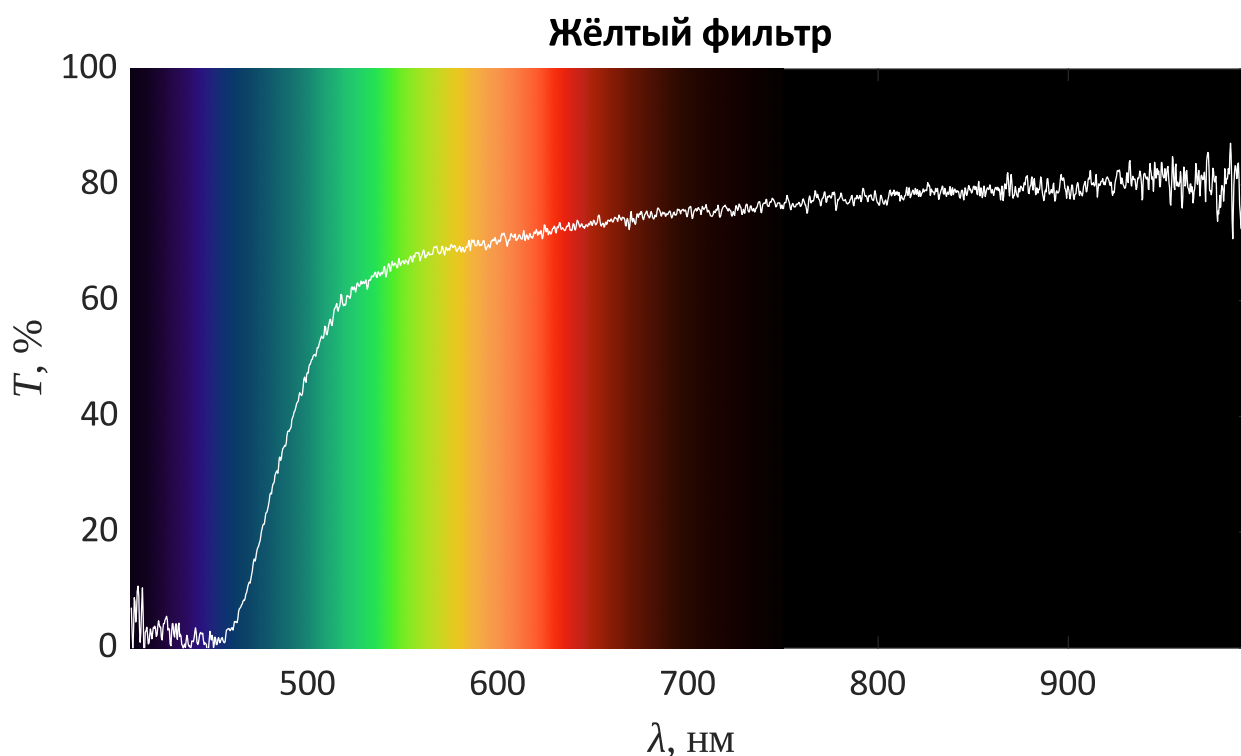
**График 1.** Спектр света, излучаемого лампой (опорный спектр)

Данный спектр был измерен перед установкой красного фильтра.



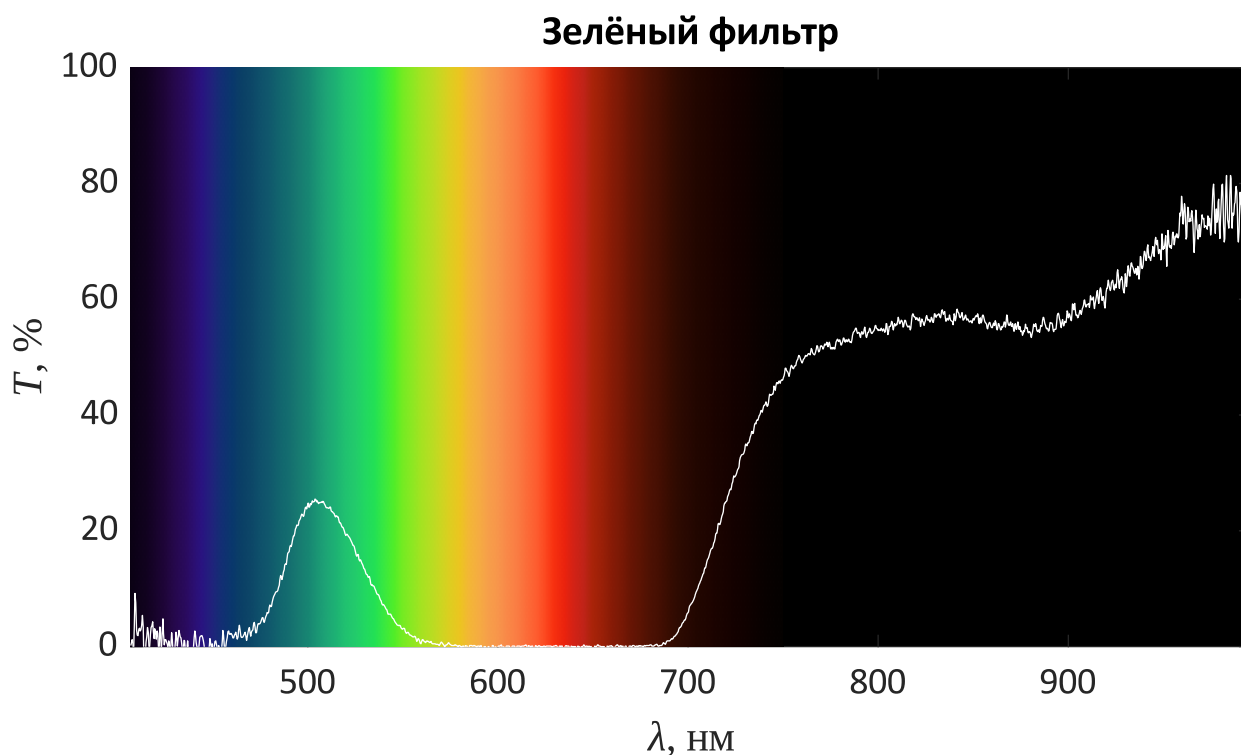
**График 2.** Спектр пропускания красного фильтра

Наблюдаем, что фильтр пропускает свет с длиной волны более 650 нм (красное и инфракрасное излучение). Средний коэффициент пропускания света в диапазоне от 700 нм до 1000 нм составляет 77.8%.



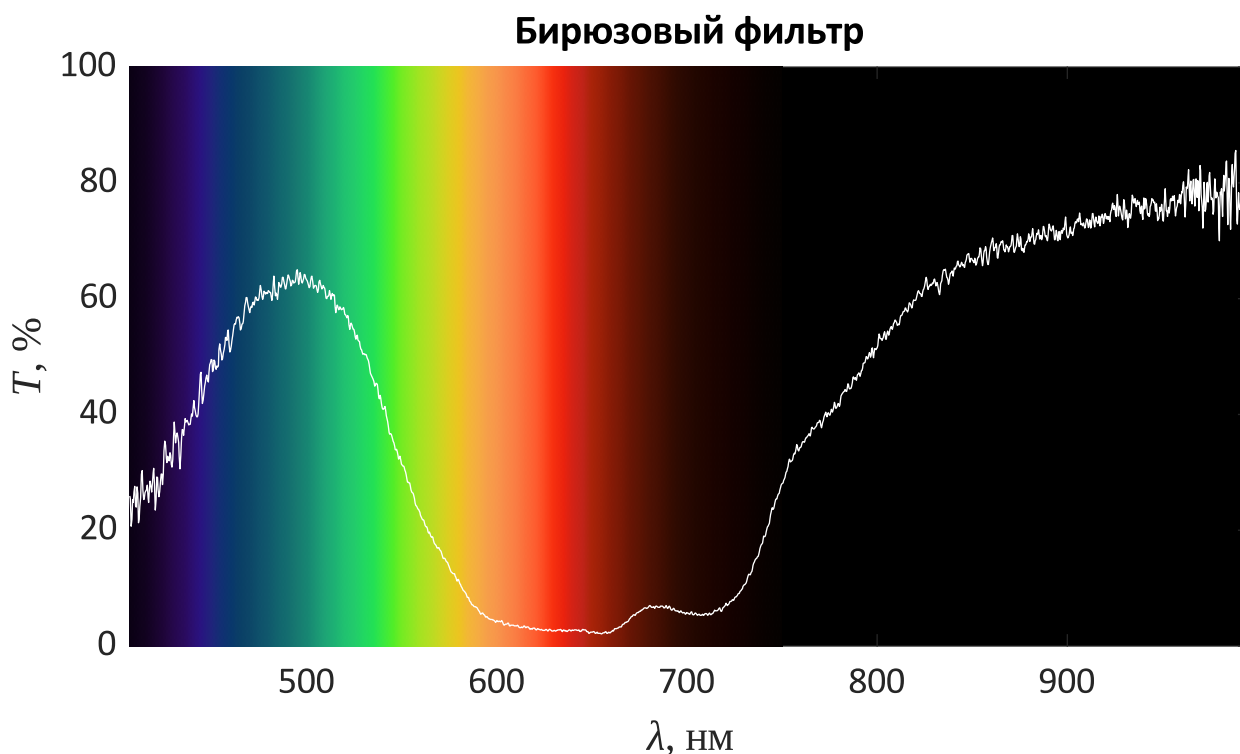
**График 3.** *Спектр пропускания жёлтого фильтра*

Фильтр пропускает свет с длиной волны более 500 нм. Средний коэффициент пропускания света в диапазоне от 550 нм до 1000 нм составляет 76.6%.



**График 4.** *Спектр пропускания зелёного фильтра*

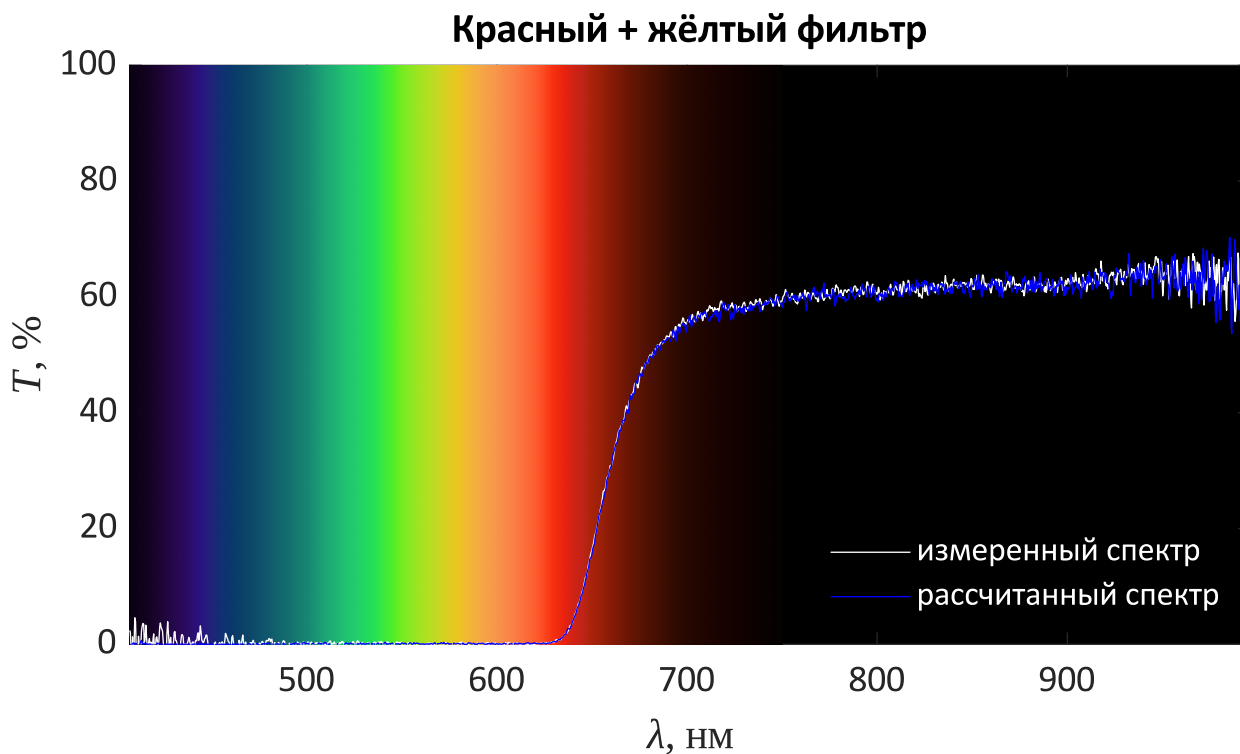
Фильтр слабо пропускает зелёный свет и относительно хорошо пропускает инфракрасное излучение.



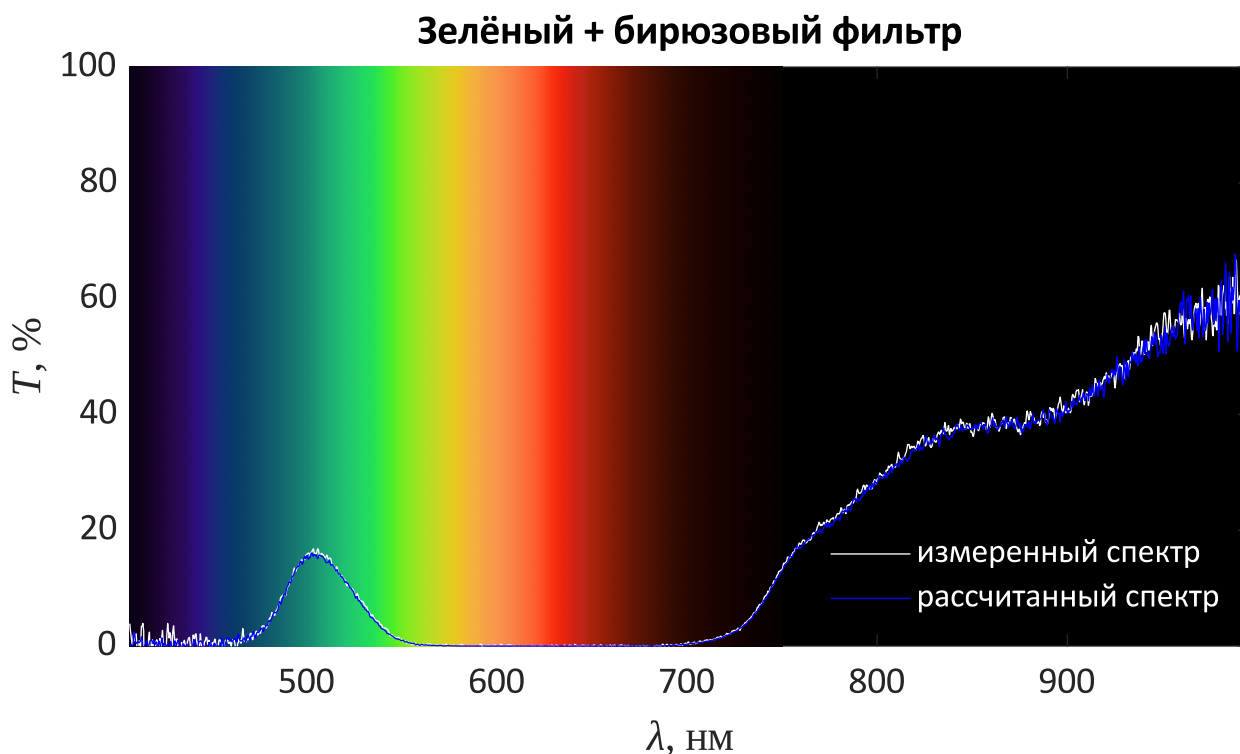
**График 5.** Спектр пропускания бирюзового фильтра

Фильтр пропускает синий, зелёный свет и инфракрасное излучение.

Далее представлены экспериментальные и расчётные спектры совместного пропускания фильтров.



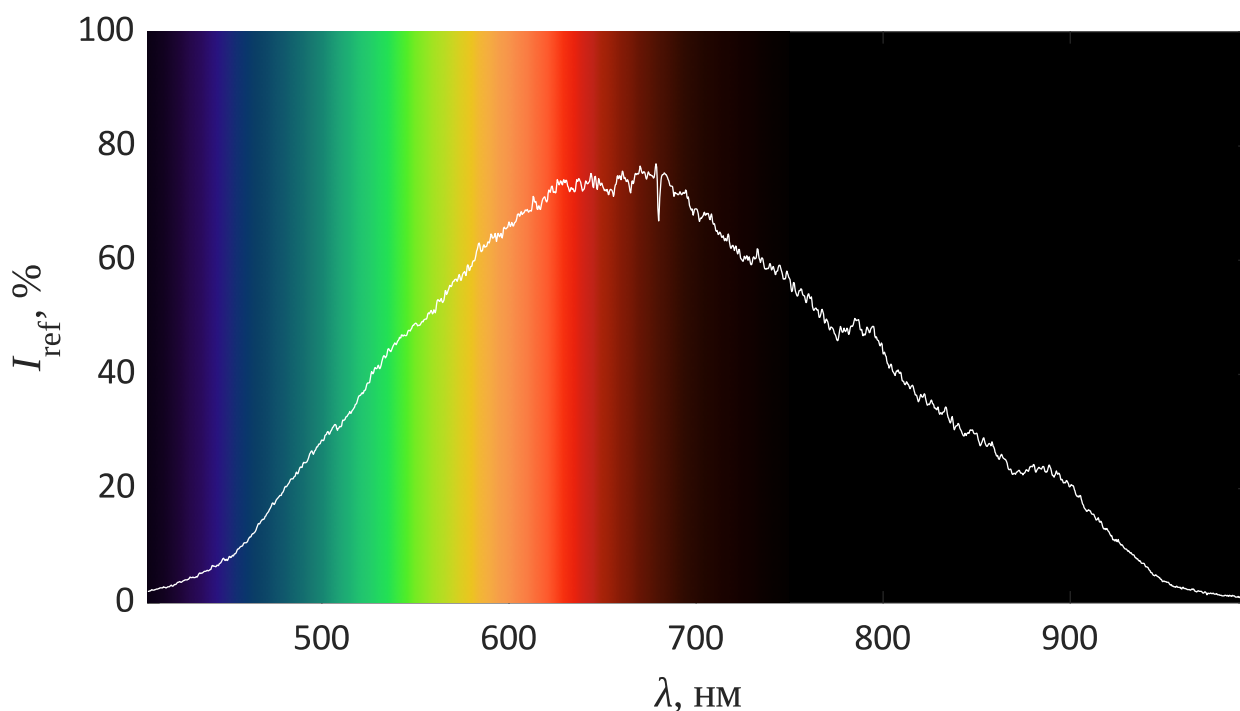
**График 6.** Измеренный и рассчитанный спектры совместного пропускания красного и жёлтого фильтров



**График 7.** Измеренный и рассчитанный спектры совместного пропускания зелёного и бирюзового фильтров

Для обеих пар фильтров рассчитанный спектр хорошо совпал с измеренным в пределах дорожки шумов. Это говорит о том, что, в пределах точности измерений, для рассмотренных оптических систем не обнаружено отклонений от линейности.

## 2. Прохождение света через растворы



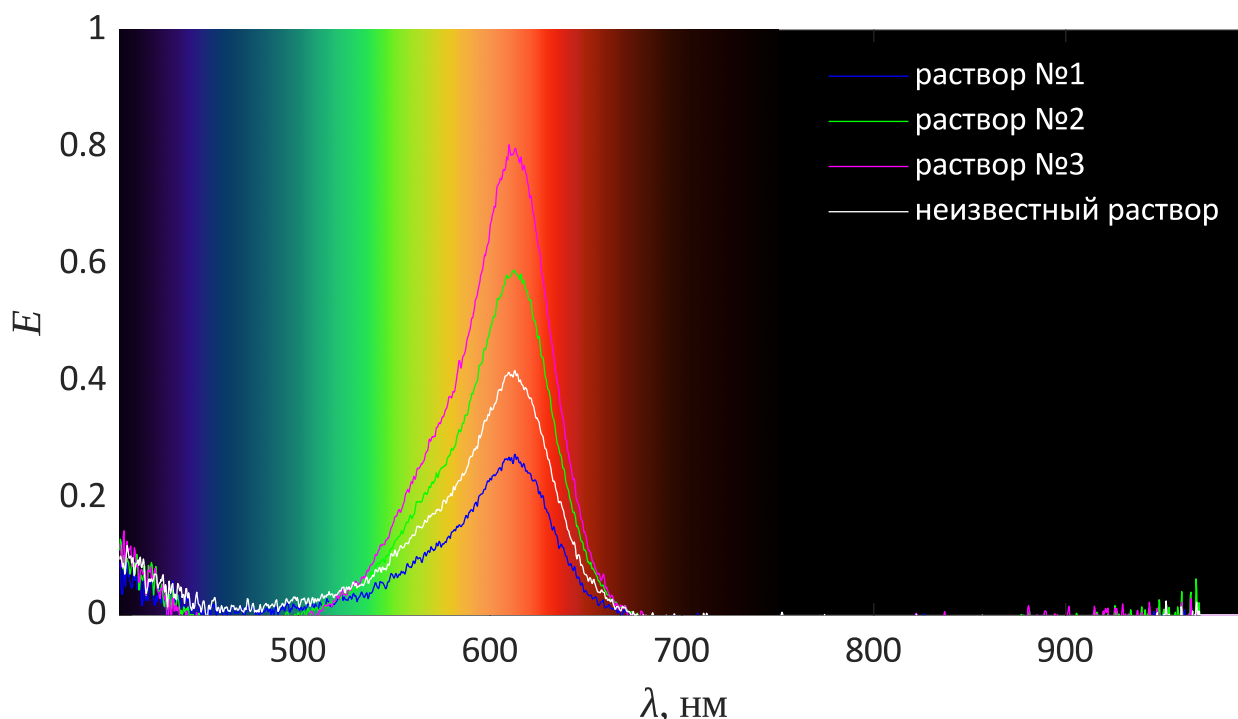
**График 8.** Спектр света, выходящего из воды (опорный спектр)

Полученный спектр по виду совпадает со спектром исходного света лампы (см. **График 1**) и имеет немного уменьшенную интенсивность при всех длинах волн.

Далее измерим спектры поглощения растворов.

**Таблица. Концентрация зелёнки в растворах**

№1	№2	№3
$(1.00 \pm 0.04) \cdot 10^{-2} \%$	$(2.00 \pm 0.07) \cdot 10^{-2} \%$	$(3.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \%$



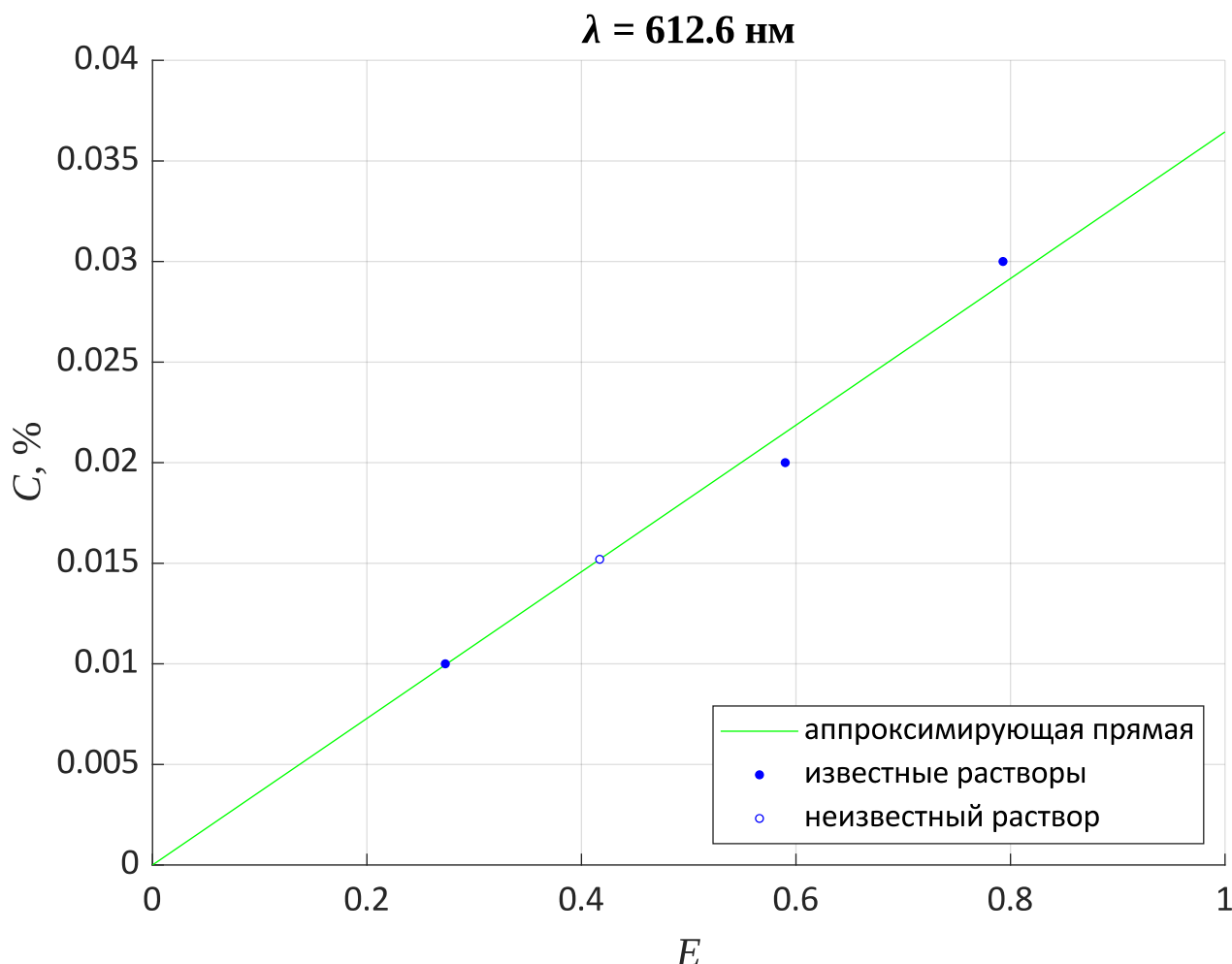
**График 9. Спектры поглощения растворов**

Исследованные растворы в основном поглощают свет с диапазоне 550–650 нм (оранжевый цвет) с различной интенсивностью. Можно наблюдать рост интенсивности поглощения с увеличением концентрации растворов.

Теперь выберем диапазон длин волн, который будем использовать для вычисления спектра коэффициента пропорциональности  $\alpha(\lambda)$  для данного вещества. Наибольшая точность оптической плотности  $E$  достигается при значениях около 0.434. Поэтому выберем диапазон тех длин волн, при которых измеренная оптическая плотность  $E$  раствора №3 больше 0.2:  $\lambda = [594; 627.5]$  нм. В данном диапазоне имеется 97 экспериментальных точек для каждого раствора. Далее для каждой длины волны проведём линейную аппроксимацию измеренной зависимости  $C(E)$ . По каждой полученной градуировочной кривой найдём концентрацию  $C$ , соответствующую оптической плотности неизвестного раствора  $E$  при соответствующей длине волны  $\lambda$ . Окончательную концентрацию  $C$  неизвестного раствора определим усреднением полученных значений.



Изобразим одну из полученных градуировочных прямых. Выберем длину волны, примерно соответствующую максимуму поглощения растворов.

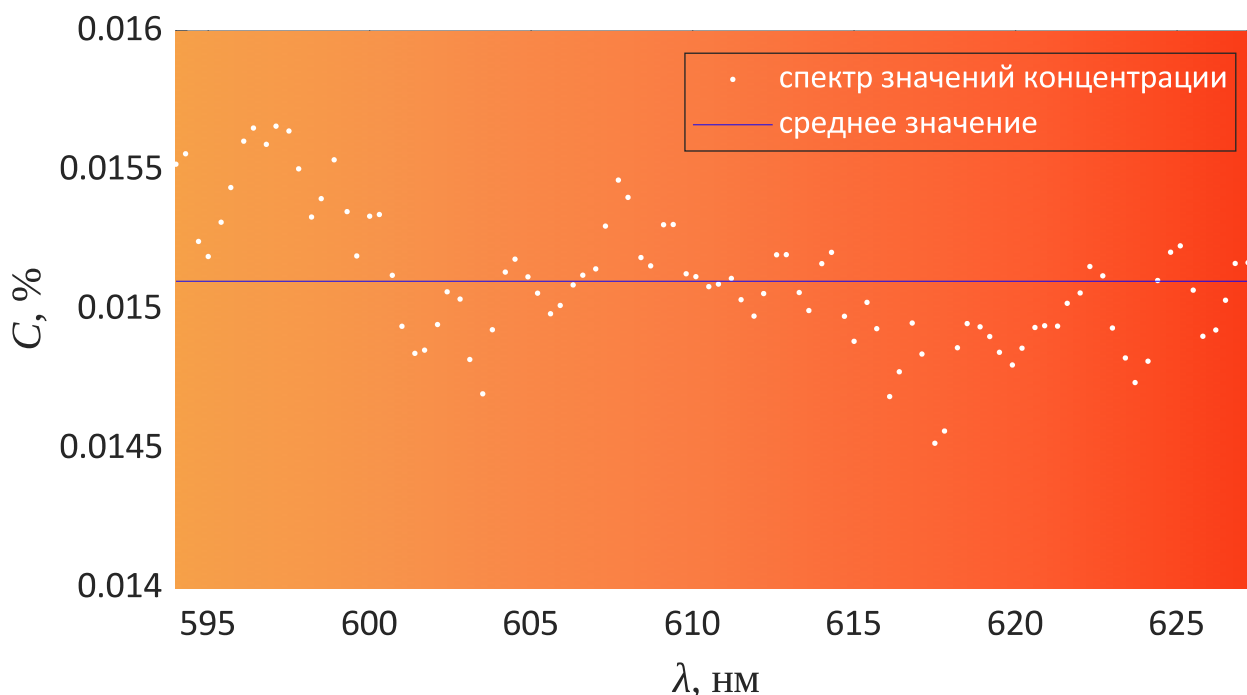


**График 10.**

*Градуировочная прямая раствора зелёнки при длине волны 612.6 нм*

Экспериментальные точки известных растворов приемлемо аппроксимируются прямой. Отклонения точек от прямой линии скорее всего связаны с неточными значениями концентрации растворов и наличием посторонних примесей.

Изобразим спектр значений концентрации неизвестного раствора, полученных таким способом в выбранном диапазоне длин волн. В идеале он должен представлять собой горизонтальную прямую.



**График 11.**

*Концентрация неизвестного раствора, рассчитанная для разных длин волн*

Полученные значения концентраций лежат примерно на одной прямой, с отклонениями случайного характера. Относительные отклонения от среднего значения не превышают 3.6%.

Окончательное значение концентрации:

$$C = (1.510 \pm 0.002) \cdot 10^{-2} \%$$

Здесь в качестве погрешности указано среднеквадратичное отклонение.

Оценим влияние погрешностей концентраций известных растворов на окончательное значение концентрации неизвестного раствора. Проведём ещё три расчёта концентрации  $C_j$  неизвестного раствора, но в каждом из расчётов увеличим концентрацию одного из известных растворов на величину её погрешности (см. **Таблица**), а концентрации остальных двух растворов оставим неизменными. После чего рассчитаем конечную погрешность, обусловленную погрешностями концентраций:

$$\Delta_C = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (C_j - C)^2} = 0.036 \cdot 10^{-2} \%$$

Таким образом, вклад погрешности концентраций известных растворов в конечную погрешность значительно превосходит вклад случайных флуктуаций. Тогда следует подкорректировать окончательное значение концентрации неизвестного раствора и его погрешность:

$$C = (1.51 \pm 0.04) \cdot 10^{-2} \%$$

## Выводы

В работе детально наблюдалось явление поглощения света веществом. Интенсивность выходящего из вещества света зависит от его длины волны и удобно представляется в виде спектра пропускания. Имеет место суперпозиция поглощающих веществ: полный спектр пропускания можно получить перемножением спектров пропускания веществ по отдельности. Для растворов наблюдалась прямая зависимость оптической плотности (экстинкции) от концентрации поглощающего вещества. Получено значение концентрации неизвестного раствора:

$$C = (1.51 \pm 0.04) \cdot 10^{-2} \%$$