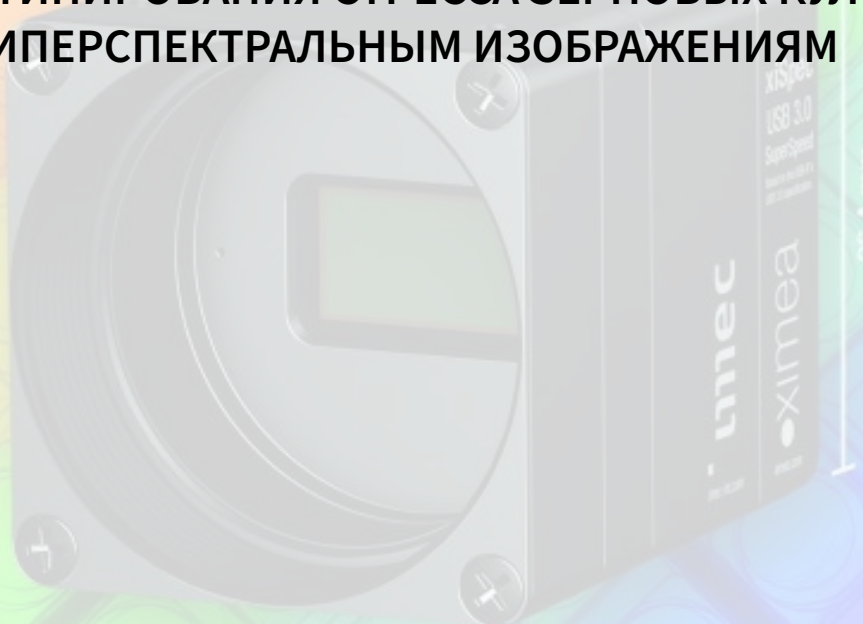


# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФЕНОТИПИРОВАНИЯ СТРЕССА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

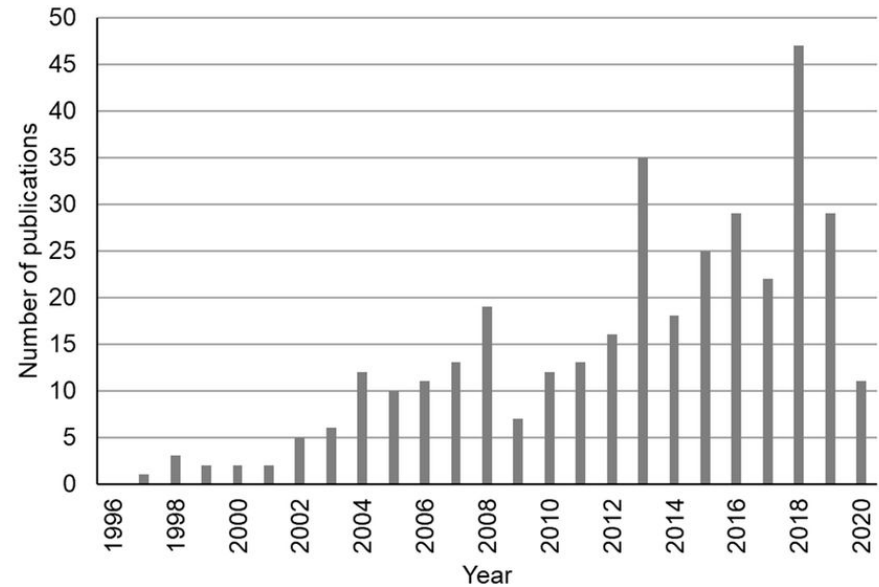


Максимов Л.В.\* , Гурова Т.А.\*\* , Елкин О.В.\*\*

\* Институт автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск), Россия

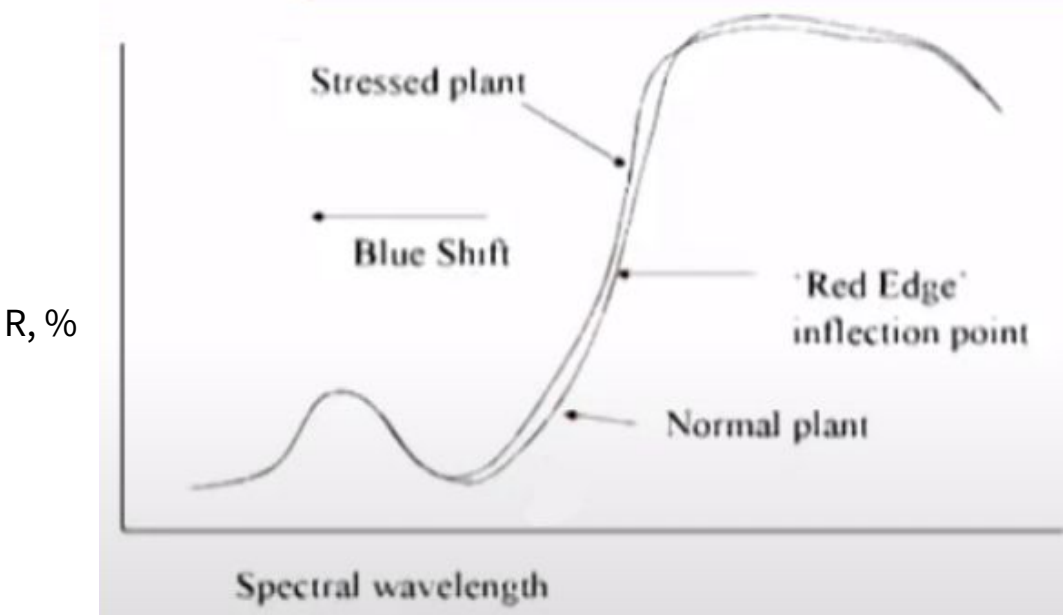
\*\* СибФТИ СФНЦА РАН (Новосибирск), Россия

# Актуальность

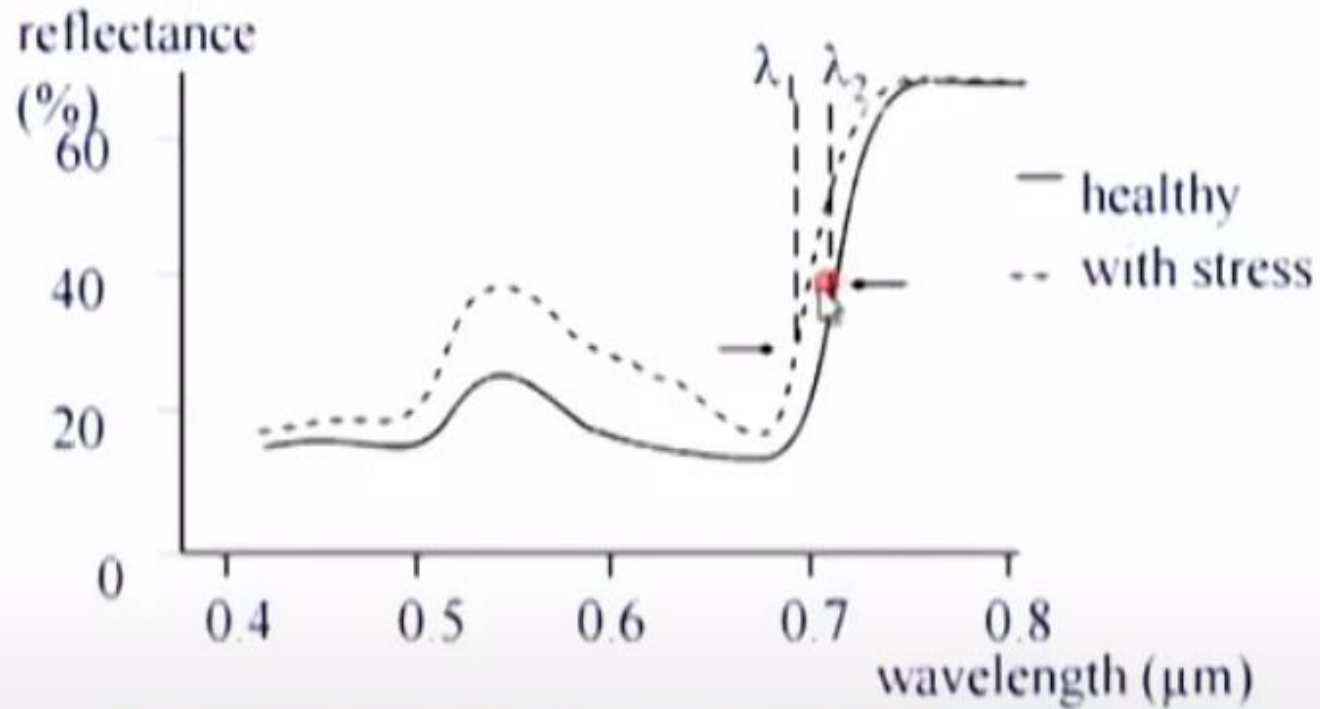


Кол-во статей, использующих гиперспектральные данные в сельском хозяйстве [1]

# Определение стресса растений по спектру отражения



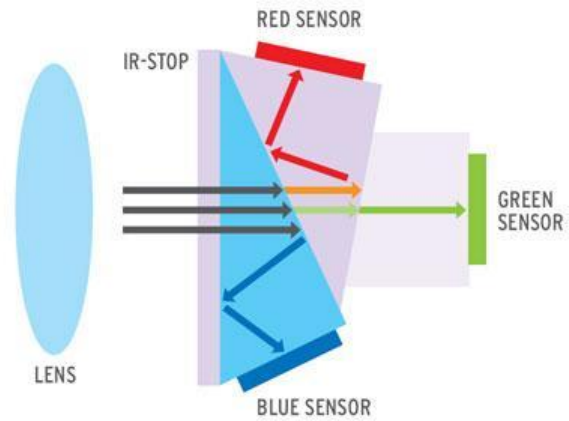
## Определение стресса растений по спектру отражения



$$REP = 700 + 40 \left( \frac{\{(R_{0.70} + R_{0.780})/2 - R_{0.700}\}}{R_{0.740} - R_{0.700}} \right)$$

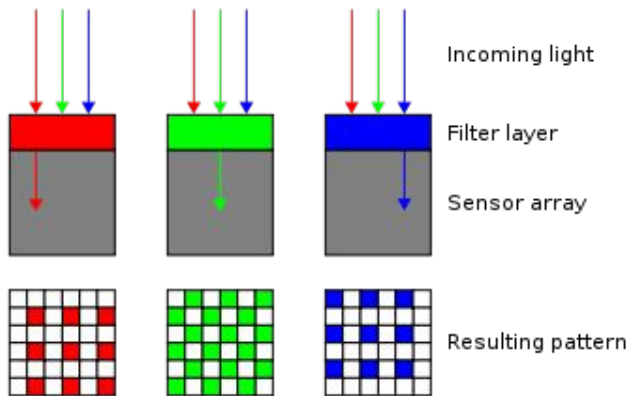
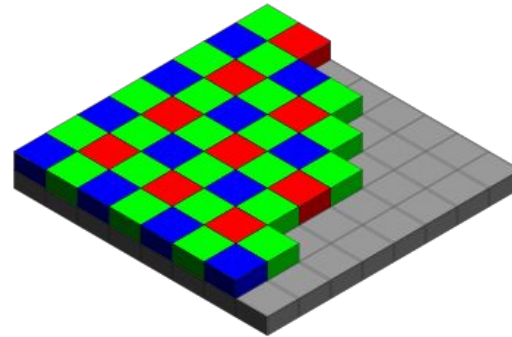
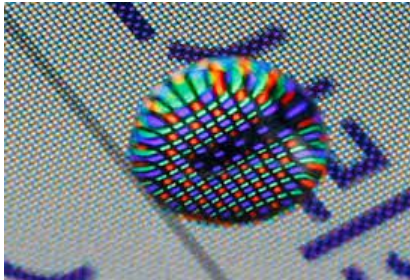
# Разновидности фотоматриц видимого спектра:

## 3-CCD матрица



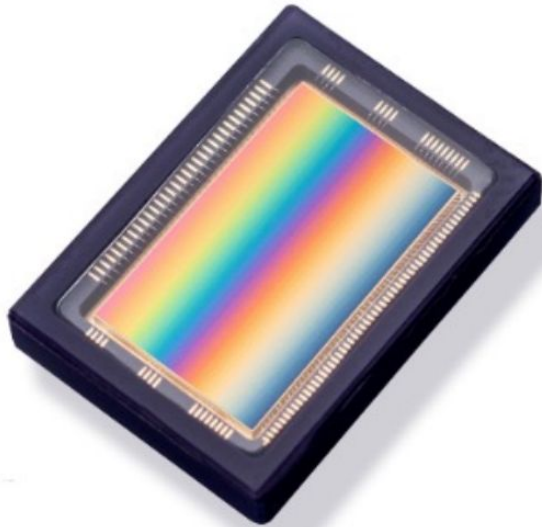
# Разновидности фотоматриц видимого спектра:

## RGBG матрица



## Разновидности гиперспектральных матриц ИМЕС

Line scan/Wedge (клиновидная)



- + высокое спектральное разрешение
- требуется сканирование

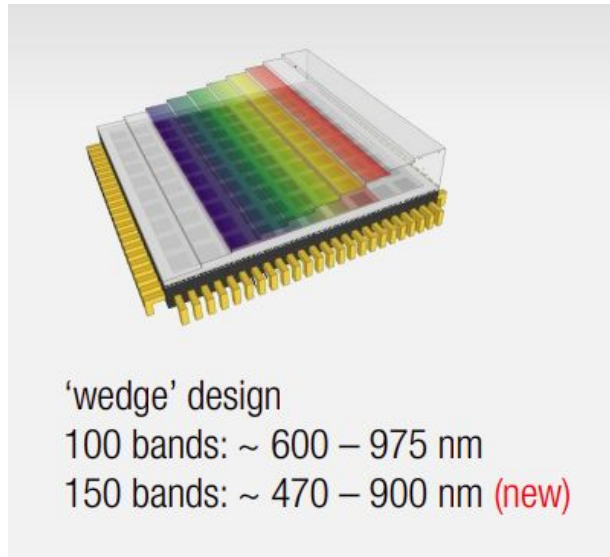
Snapshot Mosaic (мозаичная)



- + весь гиперкуб за один снимок
- низкое спектральное разрешение
- требуется интерполяция (демозаика)

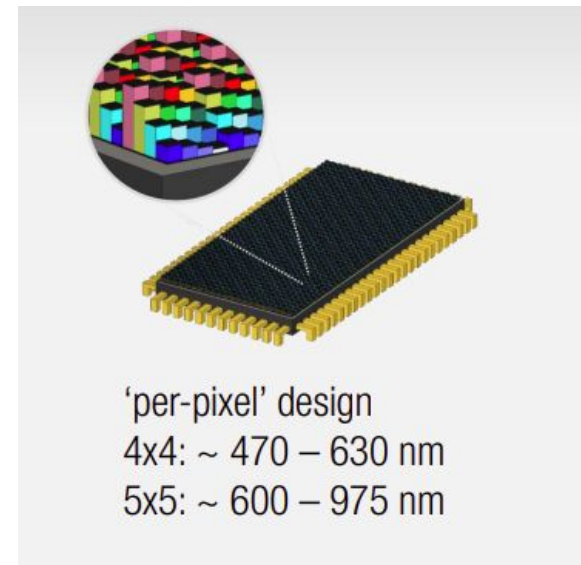
## Разновидности гиперспектральных матриц ИМЕС

### Line scan/Wedge (клиновидная)



- + высокое спектральное разрешение
- требуется сканирование

### Snapshot Mosaic (мозаичная)

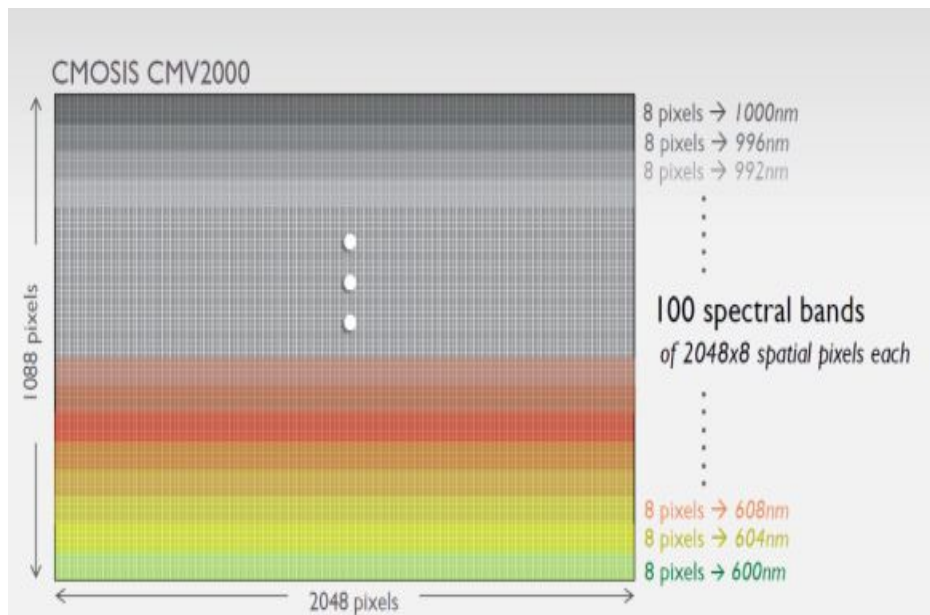


- + весь гиперкуб за один снимок
- низкое спектральное разрешение
- требуется интерполяция (демозаика)



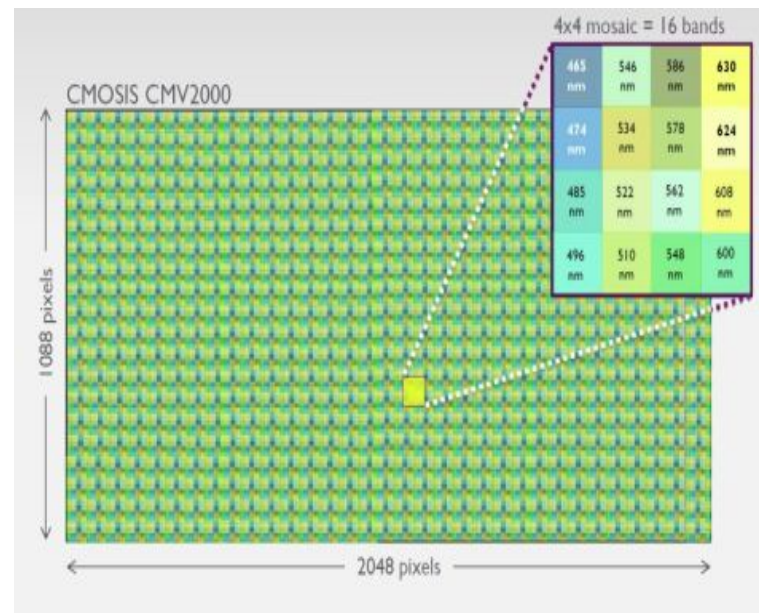
# Разновидности гиперспектральных матриц ИМЕС

## Line scan/Wedge (клиновидная)



- + высокое спектральное разрешение
- требуется сканирование

## Snapshot Mosaic (мозаичная)



- + весь гиперкуб за один снимок
- низкое спектральное разрешение
- требуется интерполяция (демозаика)

# Характеристики камеры Photonfocus



Модель	MV1-D2048x1088-HS05-96-G2
Серия	photonSPECTRAL
Сенсор	CMV2K-LS150-VNIR
Разрешение, Мп	2.2
Разрешение, пикселей	2048 x 1088
Размеры пикселя, мкм	5.5 x 5.5
Оптический формат	2/3"
Диагональ, мм	12.76
Кадровая частота, Гц	42
Макс. кадровая частота, ROI	42
АЦП, бит	8 / 10
Интерфейс камеры	GigE
Тип крепления объектива	C-Mount / CS-Mount
Спектральная чувствительность	VIS (0.4 – 0.75 мкм)
Глубина потенциальной ямы, e <sup>-</sup>	11000
SNR (Сигнал-шум), дБ	105:1
Динамический диапазон, дБ	60
Квантовая эффективность QE <30%	13
Шум считывания, e <sup>-</sup>	Да
Гиперспектральная	Да
Питание, В	+12VDC (-10%) ... +24VDC (+10%)
Энергопотребление, Вт	<5.1
Цветность	ЧБ
Габариты, мм	55 x 55 x 52
Вес, г	265
Разъемы	Hirose 12-pole; RJ-45
Пылевлагозащищенность	IP40
Допустимая влажность, %	20 – 80

# Характеристики камеры Photonfocus



Модель	MV1-D2048x1088-HS05-96-G2
Серия	photonSPECTRAL
Сенсор	CMV2K-LS150-VNIR
Разрешение, Мп	2.2
Разрешение, пикселей	2048 x 1088
Размеры пикселя, мкм	5.5 x 5.5
Оптический формат	2/3"
Диагональ, мм	12.76
Кадровая частота, Гц	42
Макс. кадровая частота, ROI	42
АЦП, бит	8 / 10
Интерфейс камеры	GigE
Тип крепления объектива	C-Mount / CS-Mount
Спектральная чувствительность	VIS (0.4 – 0.75 мкм)
Глубина потенциальной ямы, e <sup>-</sup>	11000
SNR (Сигнал-шум), дБ	105:1
Динамический диапазон, дБ	60
Квантовая эффективность QE <30%	
Шум считывания, e <sup>-</sup>	13
Гиперспектральная	Да
Питание, В	+12VDC (-10%) ... +24VDC (+10%)
Энергопотребление, Вт	<5.1
Цветность	ЧБ
Габариты, мм	55 x 55 x 52
Вес, г	265
Разъемы	Hirose 12-pole; RJ-45
Пылевлагозащищенность	IP40
Допустимая влажность, %	20 – 80

# Характеристики камеры Photonfocus



Модель	MV1-D2048x1088-HS05-96-G2
Серия	photonSPECTRAL
Сенсор	CMV2K-LS <b>150-VNIR</b>
Разрешение, Мп	2.2
Разрешение, пикселей	<b>2048 x 1088</b>
Размеры пикселя, мкм	5.5 x 5.5
Оптический формат	2/3"
Диагональ, мм	12.76
Кадровая частота, Гц	42
Макс. кадровая частота, ROI	42
АЦП, бит	8 / 10
Интерфейс камеры	GigE
Тип крепления объектива	C-Mount / CS-Mount
Спектральная чувствительность	<b>VIS (0.4 – 0.75 мкм)</b>
Глубина потенциальной ямы, e <sup>-</sup>	11000
SNR (Сигнал-шум), дБ	105:1
Динамический диапазон, дБ	60
Квантовая эффективность QE <30%	
Шум считывания, e <sup>-</sup>	13
Гиперспектральная	Да
Питание, В	+12VDC (-10%) ... +24VDC (+10%)
Энергопотребление, Вт	<5.1
Цветность	ЧБ
Габариты, мм	55 x 55 x 52
Вес, г	265
Разъемы	Hirose 12-pole; RJ-45
Пылевлагозащищенность	IP40
Допустимая влажность, %	20 – 80

**475-900нм  
131 канал**

## Клиновидная матрица CMV2K LS150+ VIS-NIR

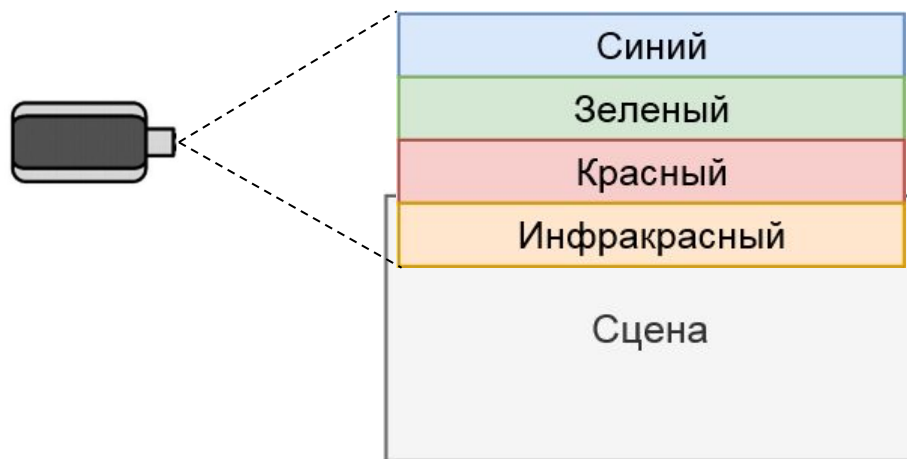
- разрешение 2048x1088
- 10 бит яркости
- 192 фильтра → 131 длина волны
- 470нм-900нм



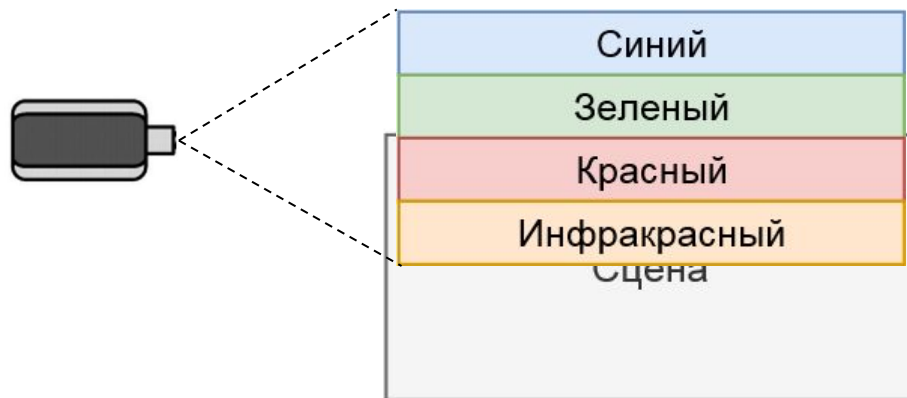
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



# Процесс съёмки гиперспектрального изображения

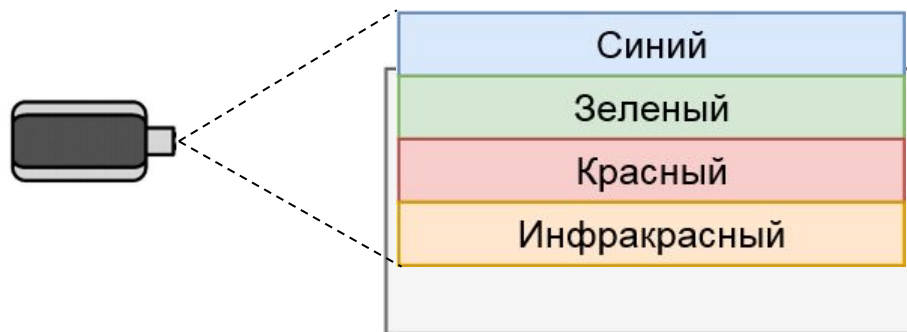


# Процесс съёмки гиперспектрального изображения

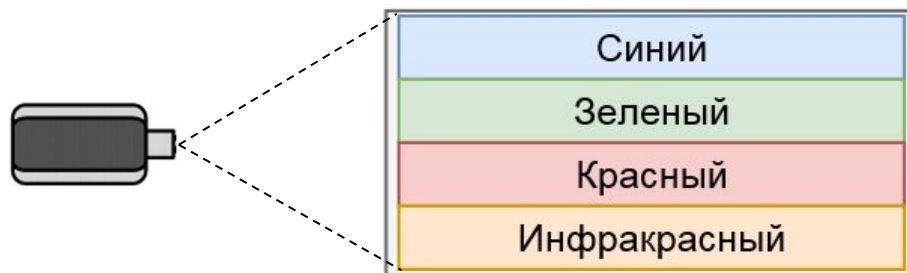




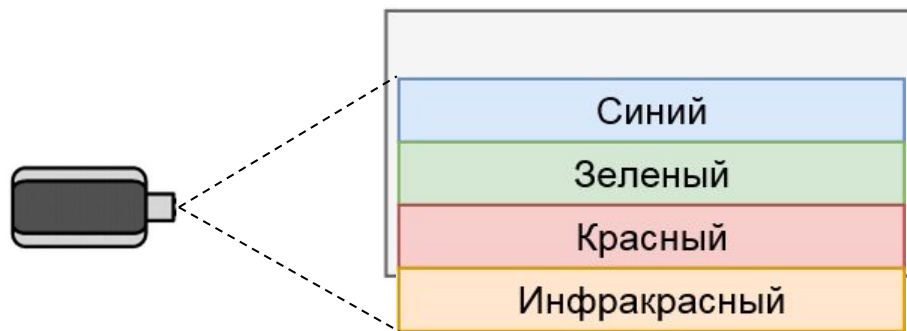
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



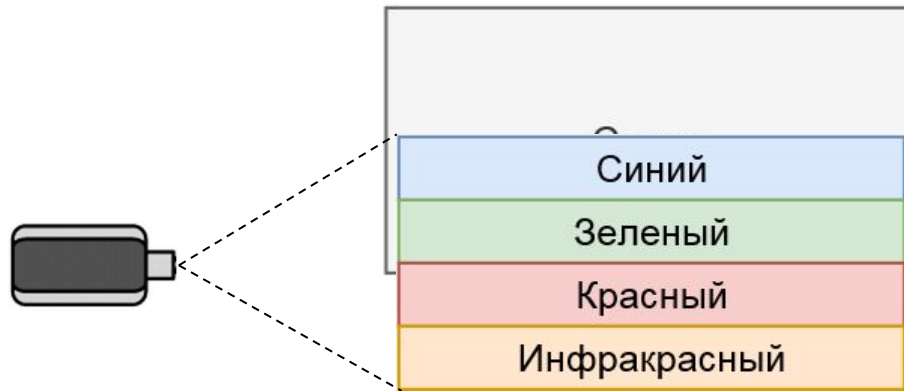
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



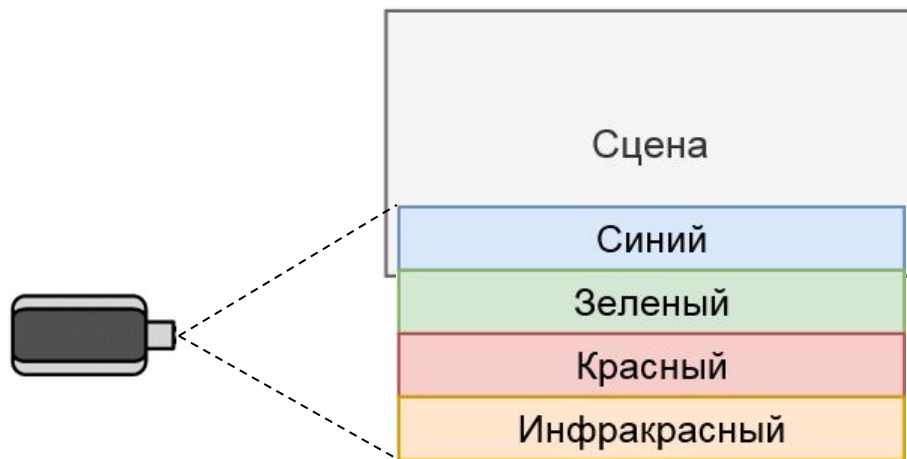
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



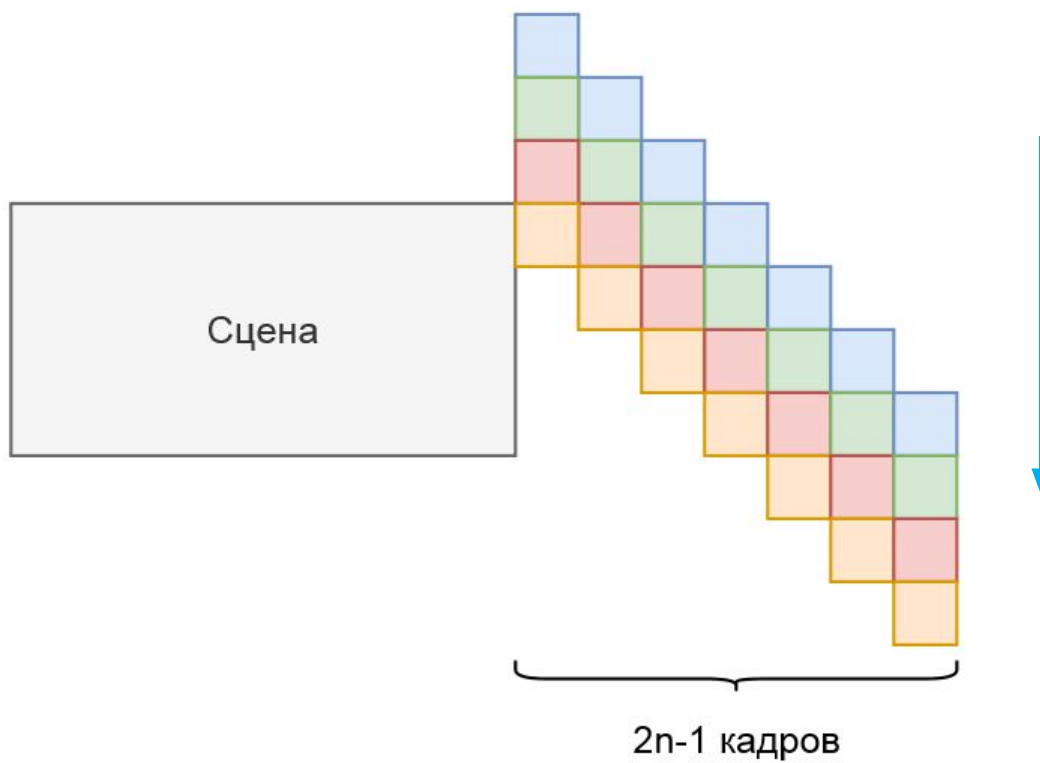
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



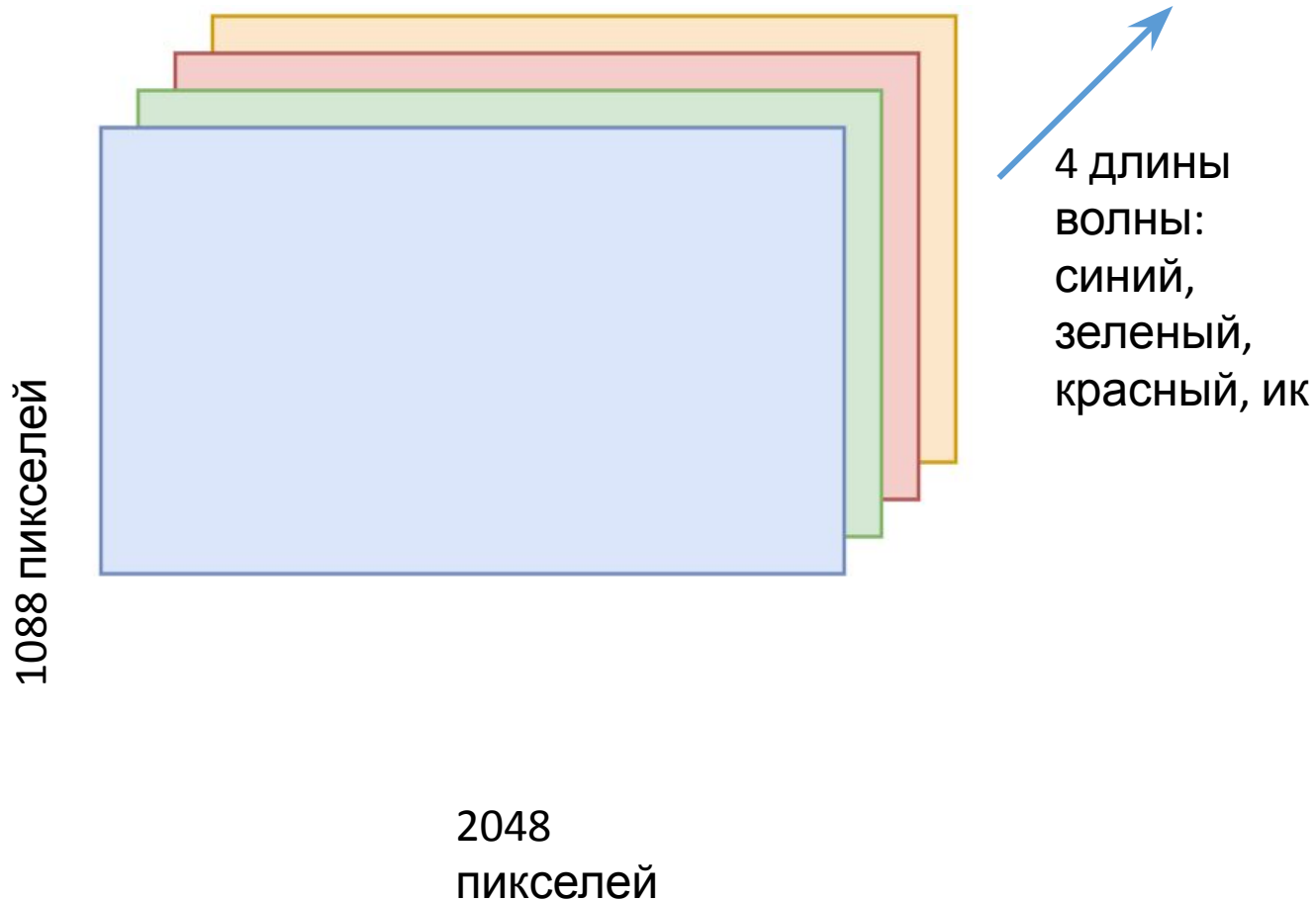
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



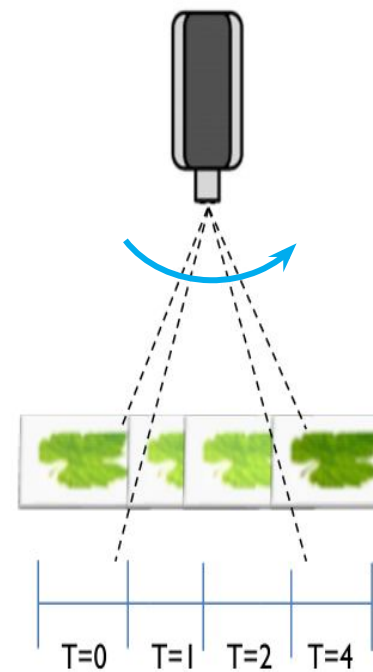
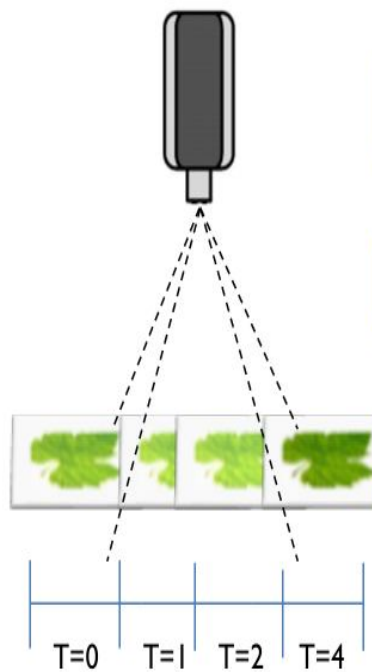
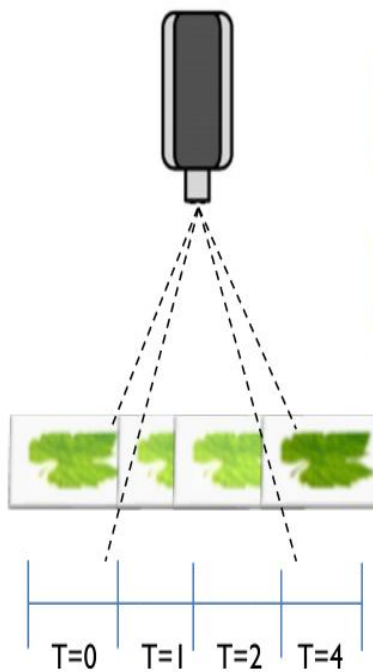
# Процесс съёмки гиперспектрального изображения



# Гиперкуб



# Альтернативные схемы съёмки



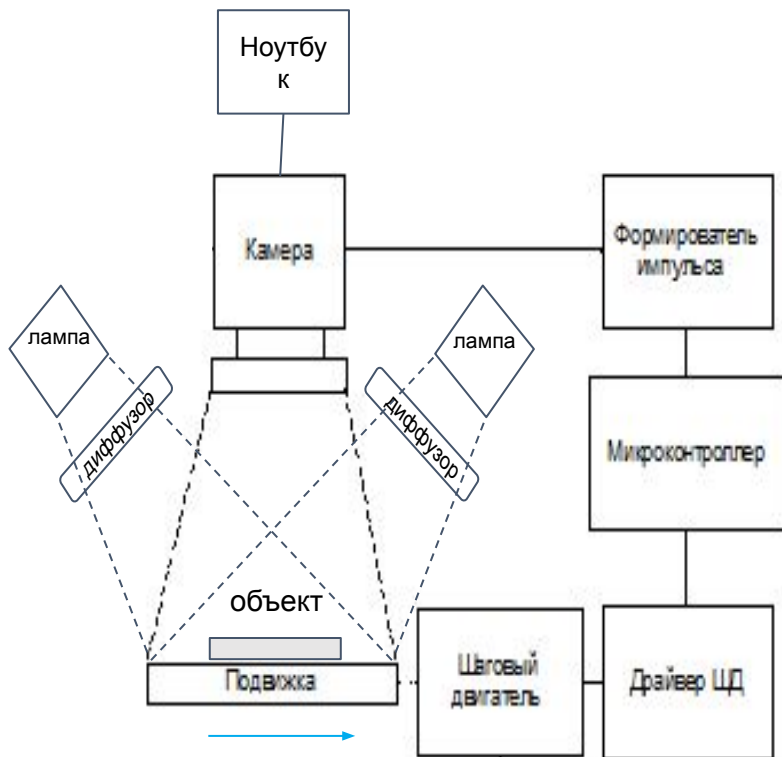
←  
Двигающаяся  
камера  
Стационарный  
объект

→  
Стационарная камера  
Двигающийся  
объект

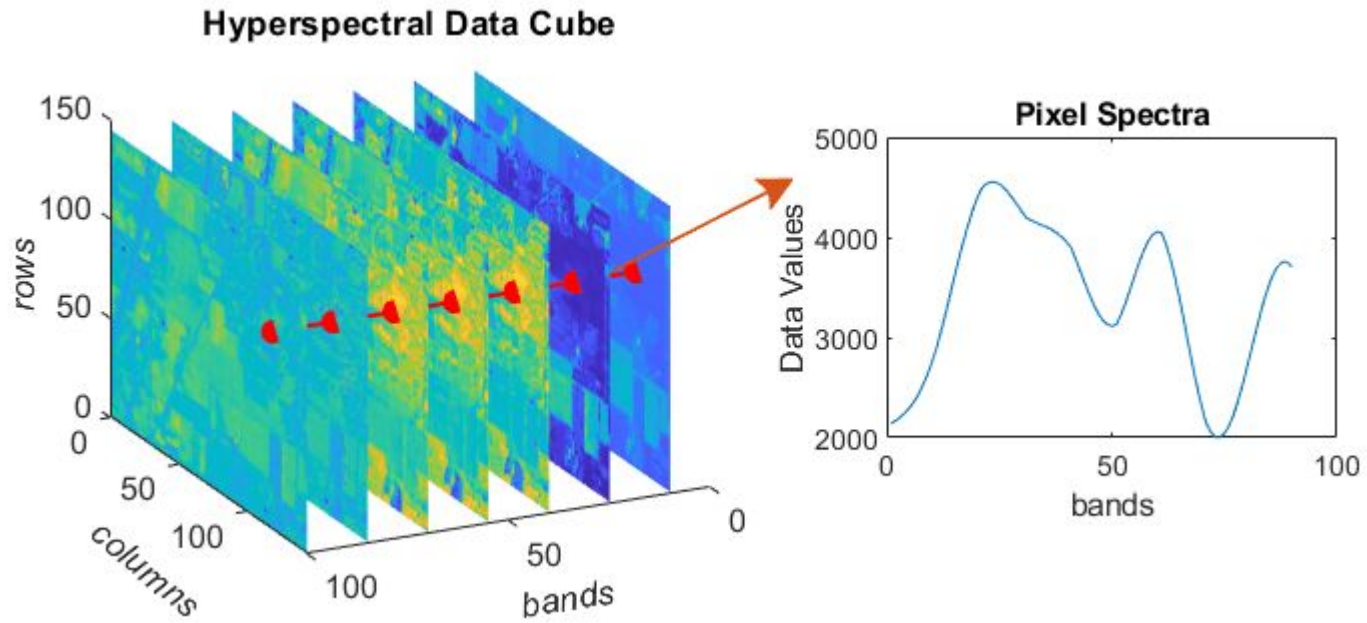
→  
Поворачивающаяся камера  
Стационарный объект



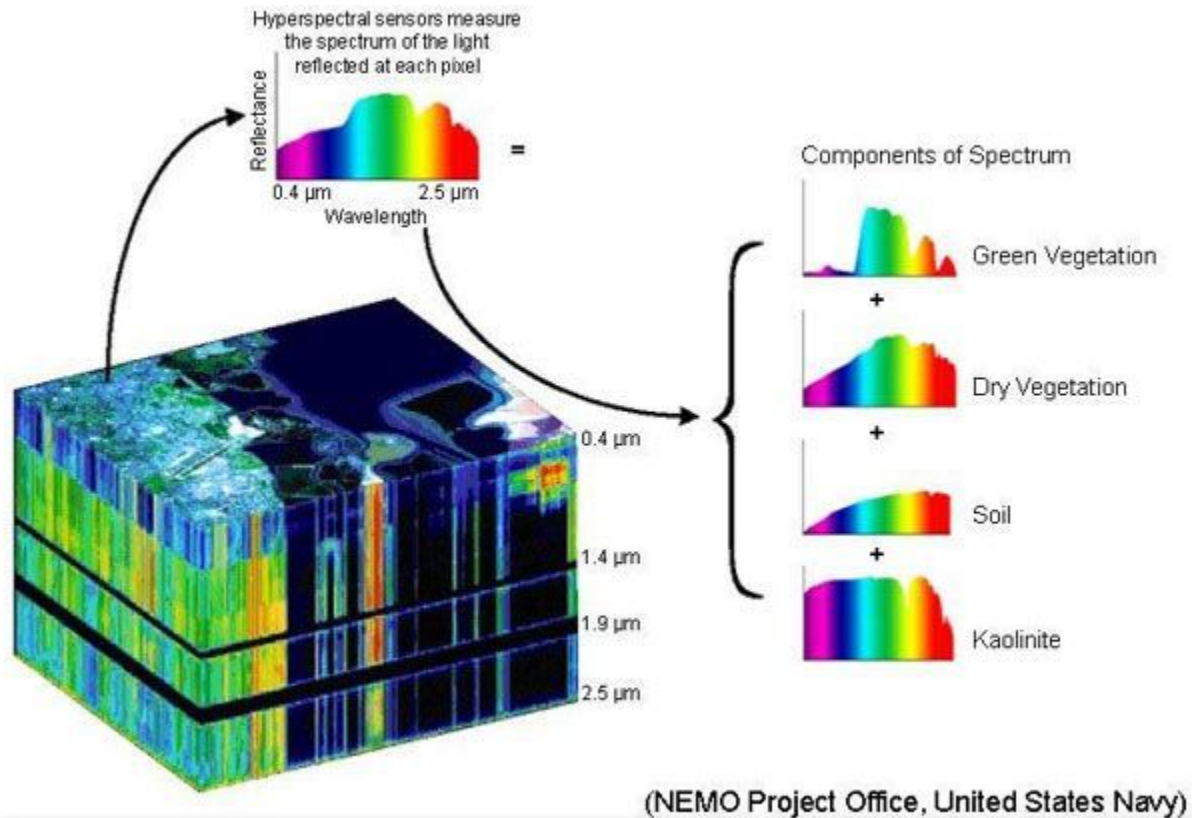
# Схема установки для съёмки гиперспектральной камерой



# Гиперкуб

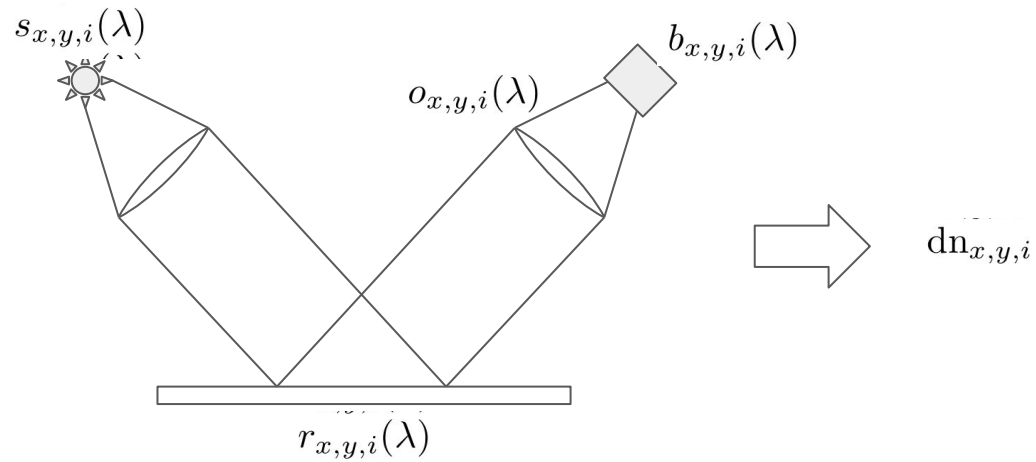


# Анализ данных из гиперкуба



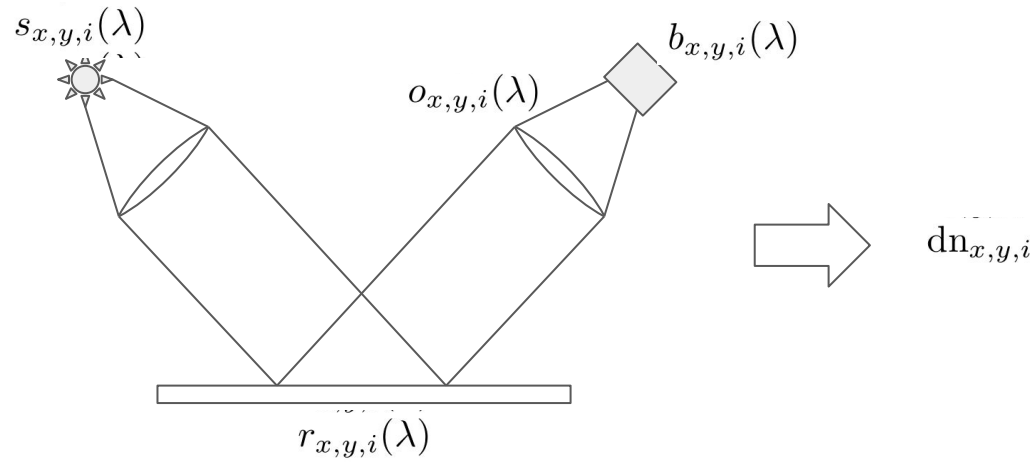


# Математическая модель процесса съёмки



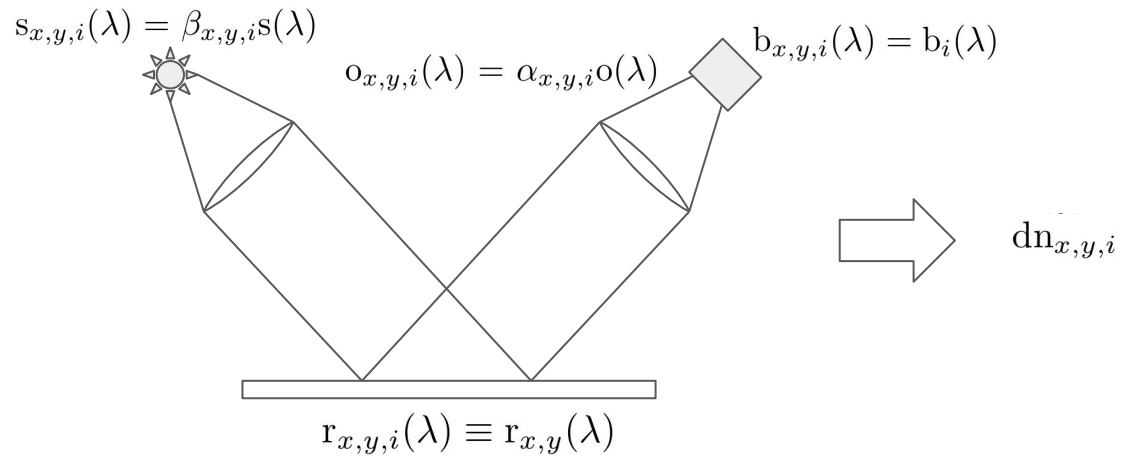
$b_{x,y,i}(\lambda)$	Отклик полосы
$s_{x,y,i}(\lambda)$	Спектр осветителя
$o_{x,y,i}(\lambda)$	Коэффициент пропускания оптики (линзы, отклоняющие фильтры, ...)
$r_{x,y,i}(\lambda)$	Отражательная способность части сцены, проецируемой на данный пиксель
$dn_{x,y,i}$	Измеренный отклик пикселя
$e_{x,y,i}$	Темновой ток
$t$	Время экспозиции
$k$	Коэффициент преобразования

# Математическая модель процесса съёмки



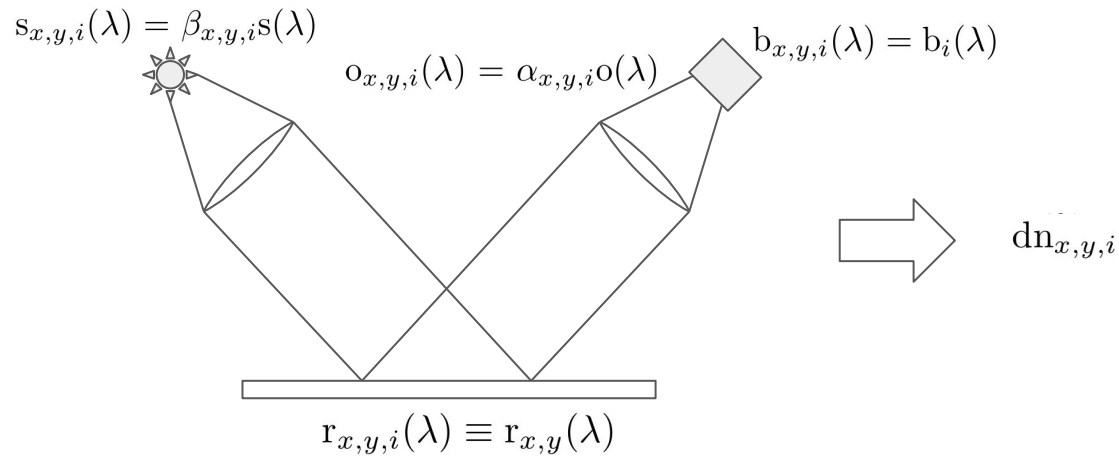
$$dn_{x,y,i} = kt \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_{x,y,i}(\lambda) \cdot o_{x,y,i}(\lambda) \cdot s_{x,y,i}(\lambda) \cdot r_{x,y,i}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

# Математическая модель процесса съёмки



$$dn_{x,y,i} = kt \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_{x,y,i}(\lambda) \cdot o_{x,y,i}(\lambda) \cdot s_{x,y,i}(\lambda) \cdot r_{x,y,i}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

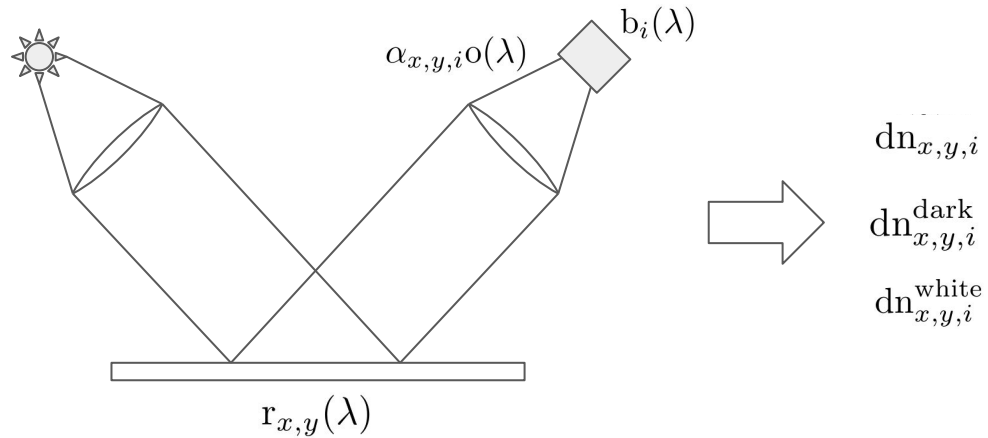
# Математическая модель процесса съёмки



$$\begin{aligned}
 dn_{x,y,i} &= kt \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_{x,y,i}(\lambda) \cdot o_{x,y,i}(\lambda) \cdot s_{x,y,i}(\lambda) \cdot r_{x,y,i}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i} \\
 &= kt \alpha_{x,y,i} \beta_{x,y,i} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}
 \end{aligned}$$

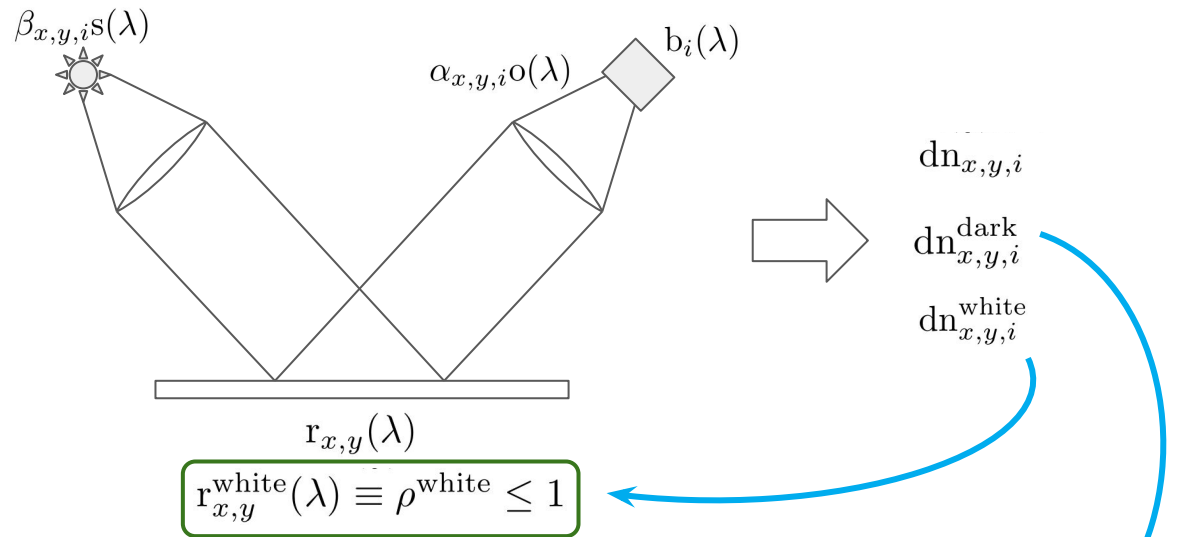


# Математическая модель процесса съёмки



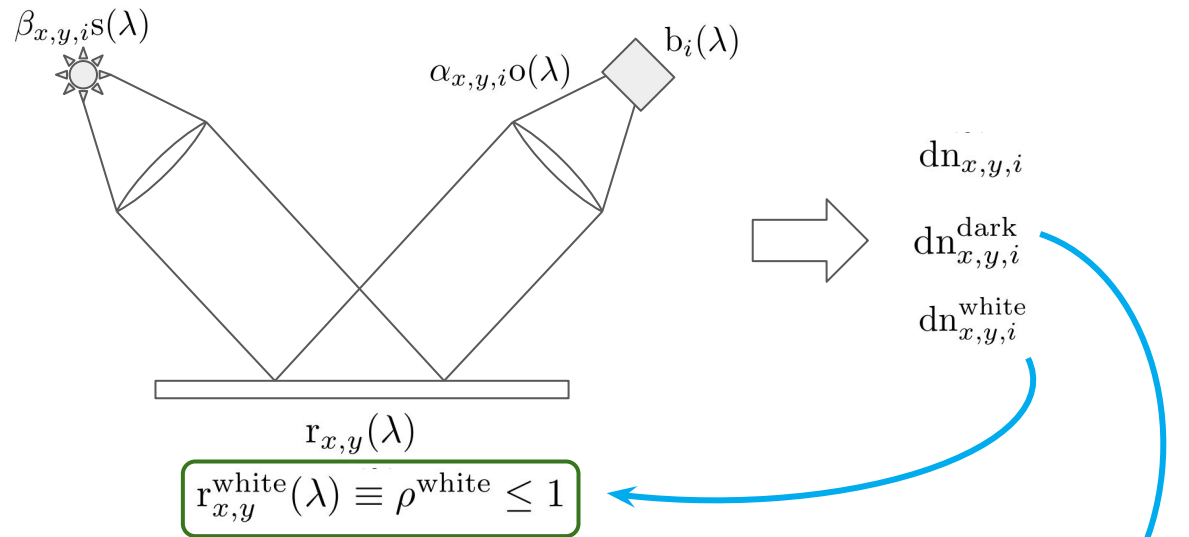
$$dn_{x,y,i} = kt\alpha_{x,y,i}\beta_{x,y,i} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

# Математическая модель процесса съёмки



$$dn_{x,y,i} = kt\alpha_{x,y,i}\beta_{x,y,i} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

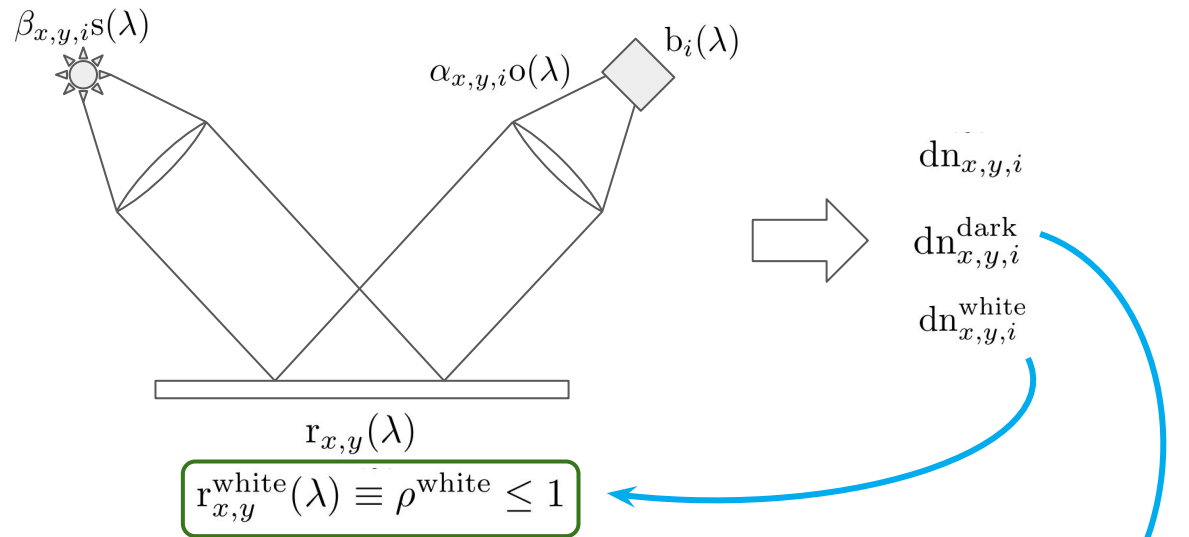
# Математическая модель процесса съёмки



$$dn_{x,y,i} = kt\alpha_{x,y,i}\beta_{x,y,i} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

$$\hat{r}_{x,y,i} = \rho^{\text{white}} \frac{dn_{x,y,i} - dn_{x,y,i}^{\text{dark}}}{dn_{x,y,i}^{\text{white}} - dn_{x,y,i}^{\text{dark}}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}$$

# Математическая модель процесса съёмки



$$dn_{x,y,i} = kt\alpha_{x,y,i}\beta_{x,y,i} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda + e_{x,y,i}$$

$$\hat{r}_{x,y,i} = \rho^{white} \frac{dn_{x,y,i} - dn_{x,y,i}^{dark}}{dn_{x,y,i}^{white} - dn_{x,y,i}^{dark}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot r_{x,y}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} b_i(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}.$$

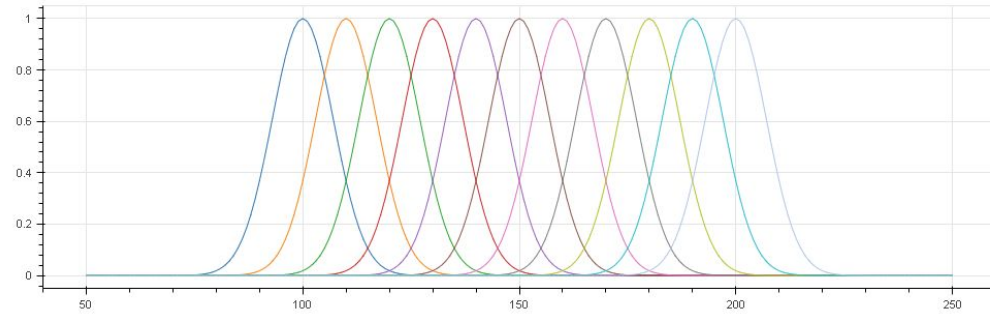
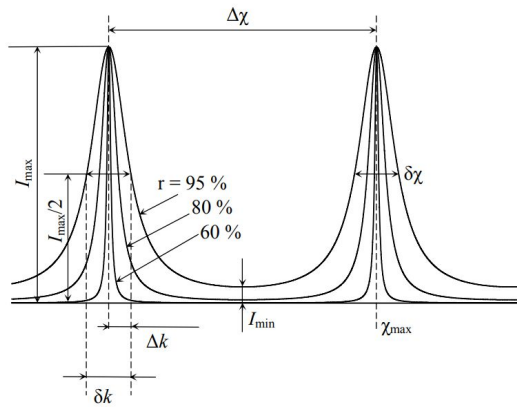
$$b_i(\lambda) \approx q_i \delta(\lambda - \lambda_i)$$

$$\hat{r}_{x,y,i} \approx r_{x,y}(\lambda_i)$$

# Спектральная характеристика отдельных фильтров

формула Эйри

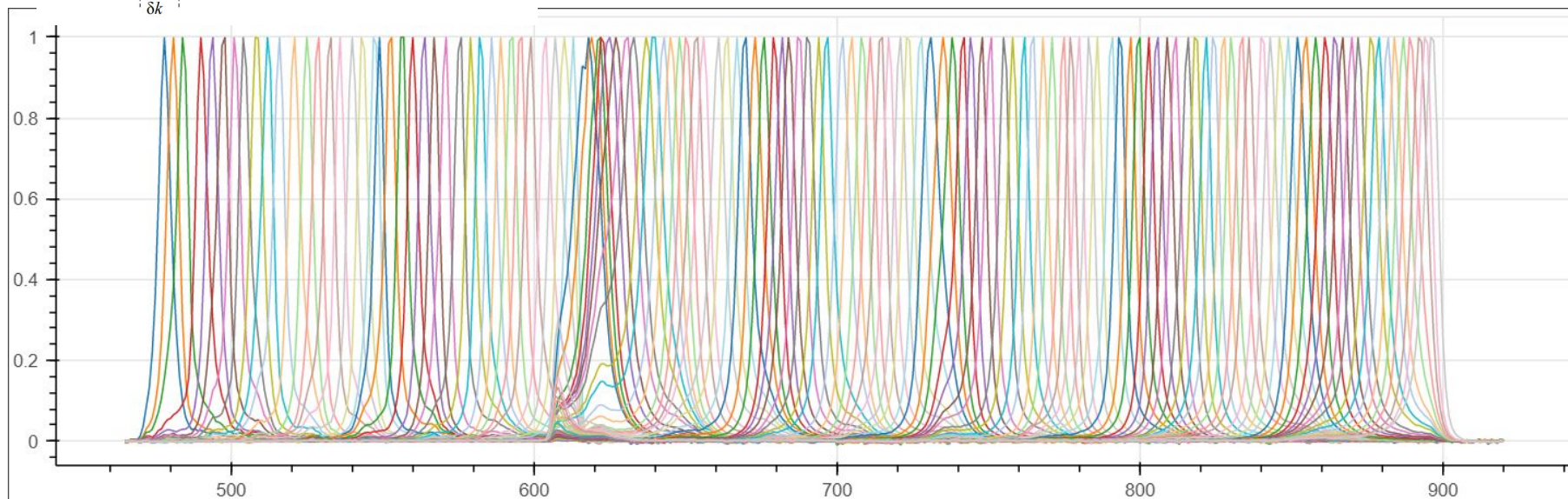
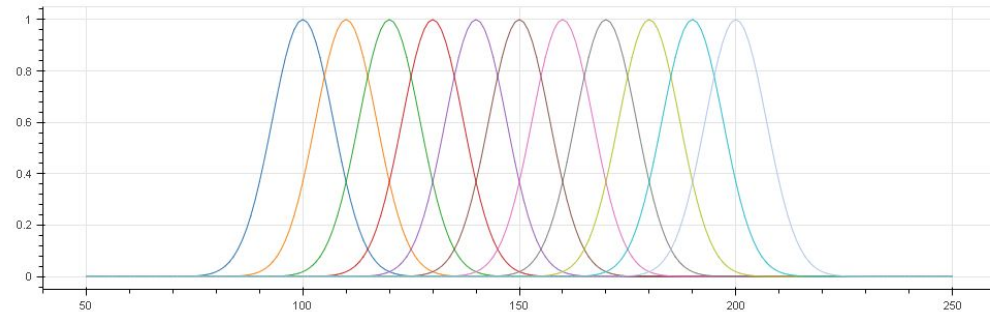
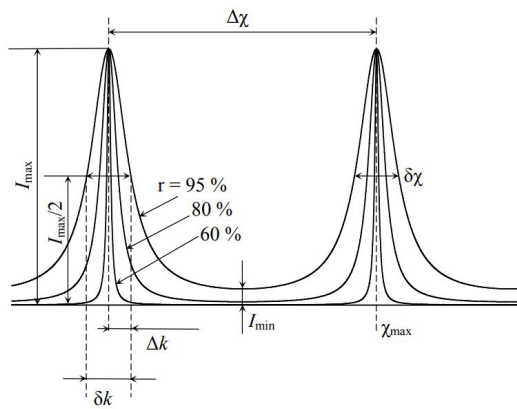
$$I = I_0 \frac{\tau^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)}$$



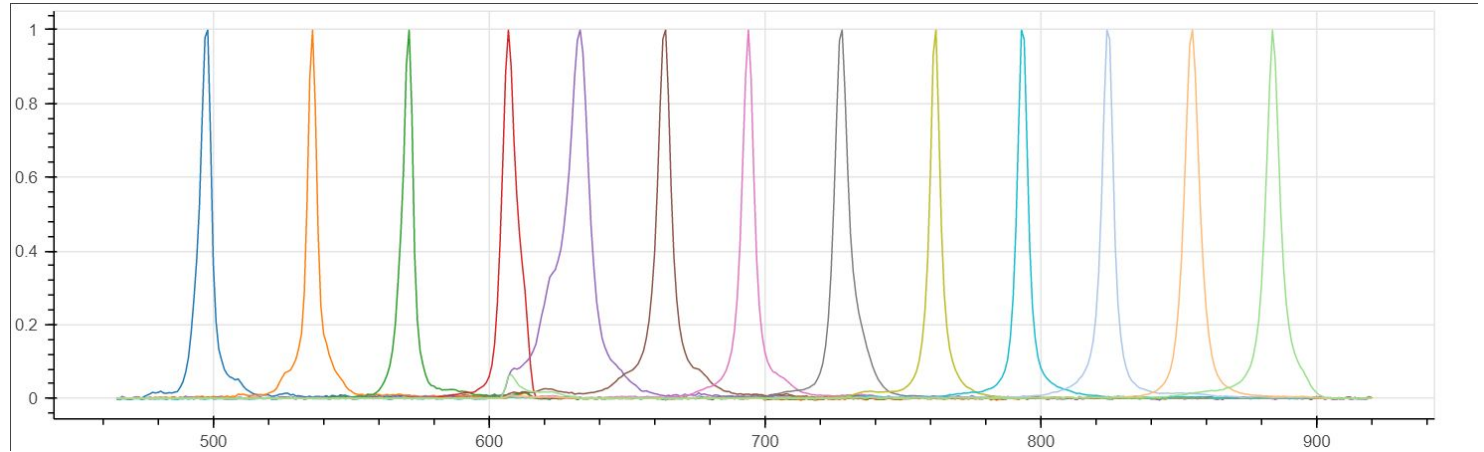
# Спектральная характеристика отдельных фильтров

формула Эйри

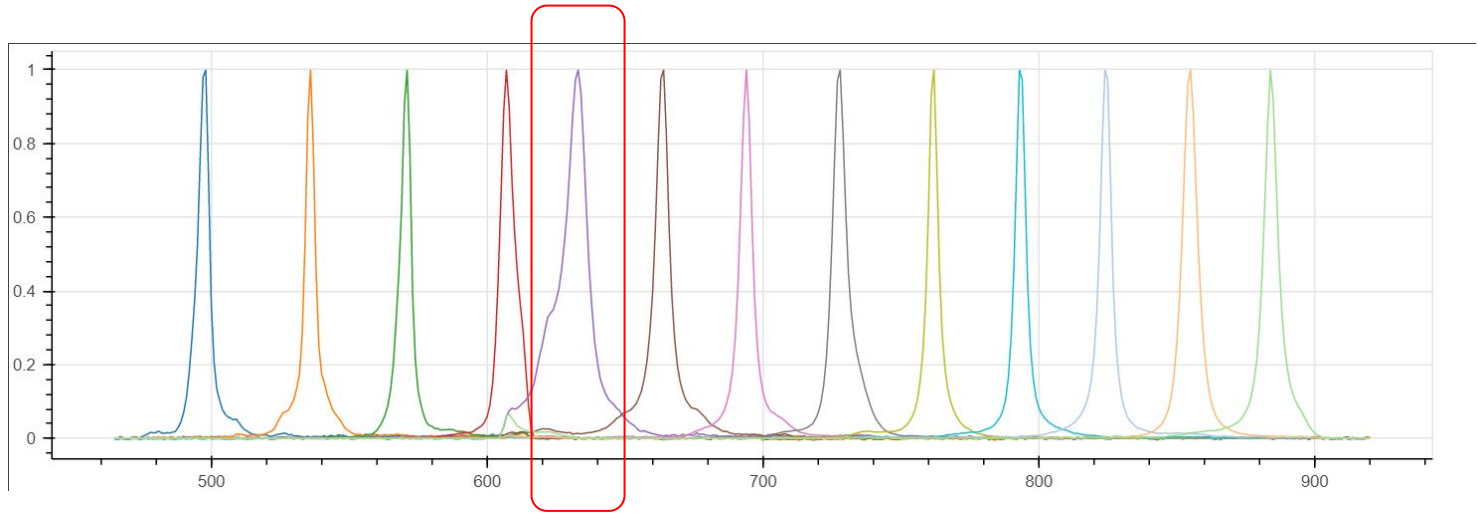
$$I = I_0 \frac{\tau^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2(\delta/2)}$$



## Спектральная характеристика отдельных фильтров (выборка)



# Спектральная характеристика отдельных фильтров (выборка)

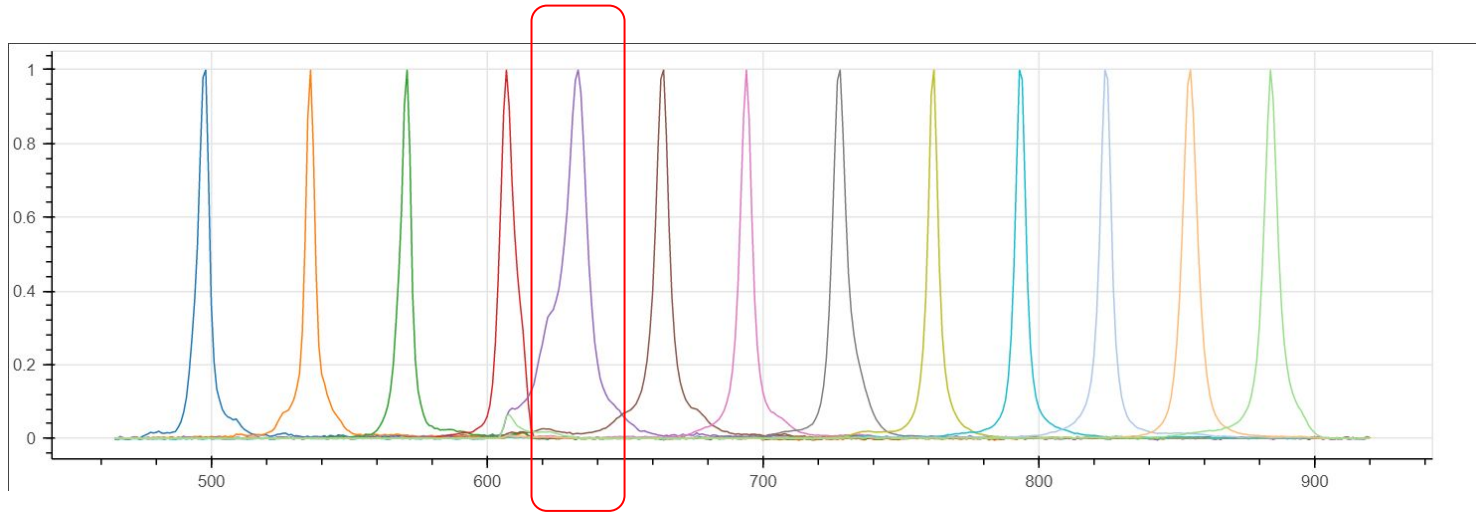


Проблема №1

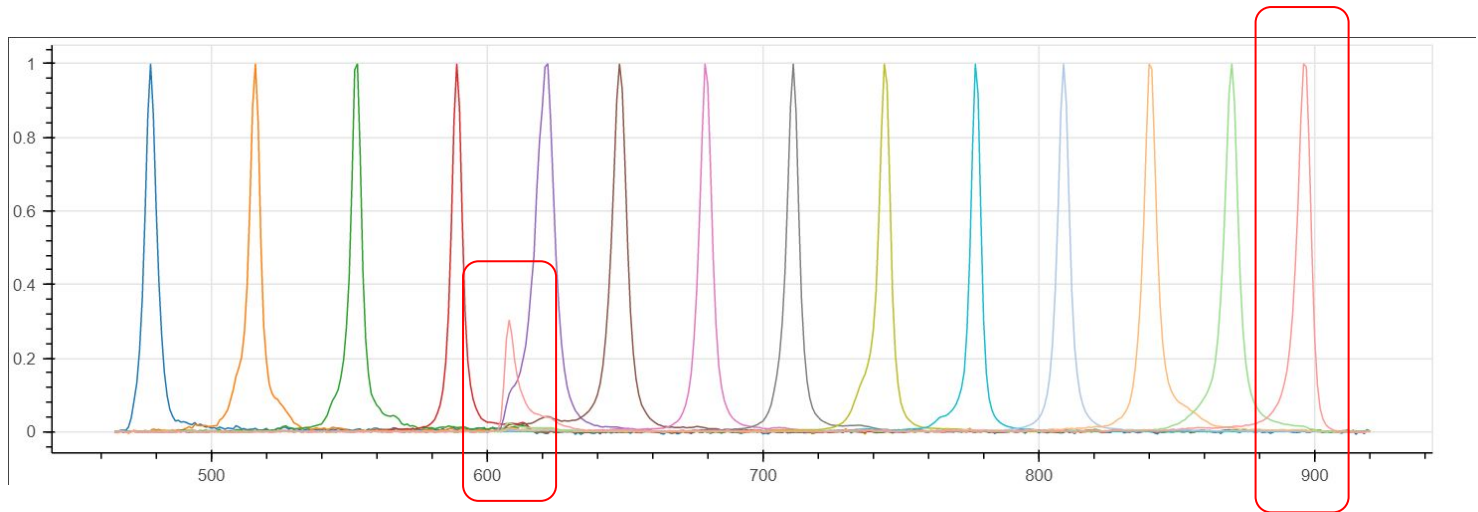


# Спектральная характеристика отдельных фильтров (выборка)

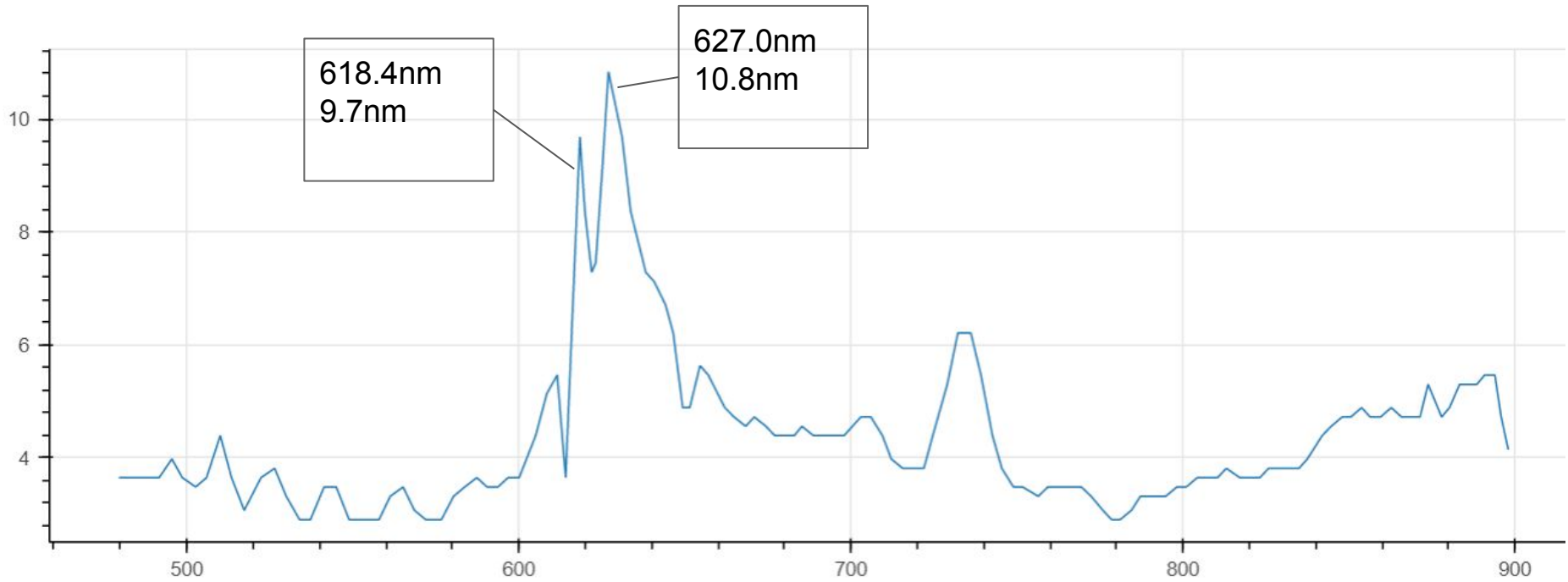
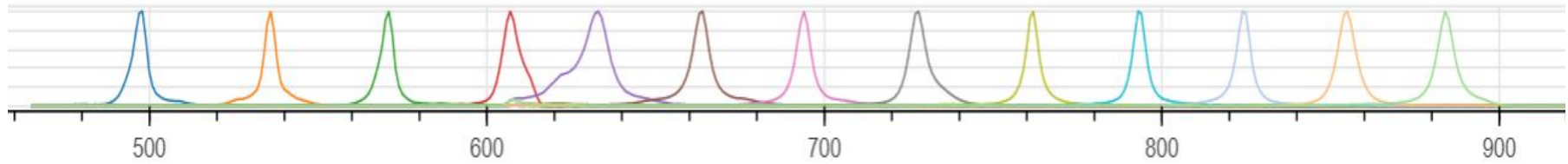
Проблема №1



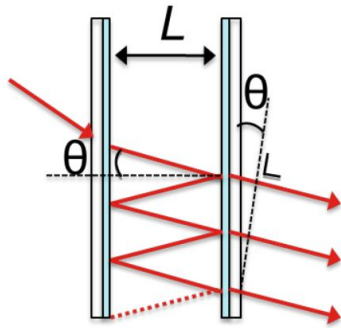
Проблема №2



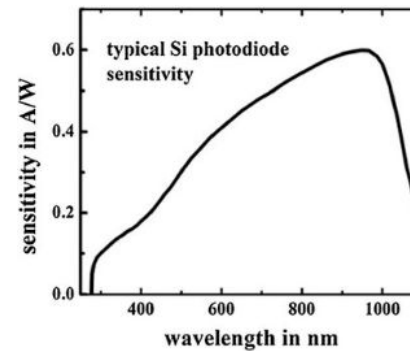
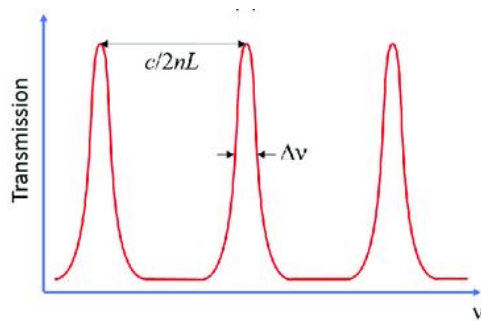
# Проблема №1. Ширина на полувысоте отдельных фильтров



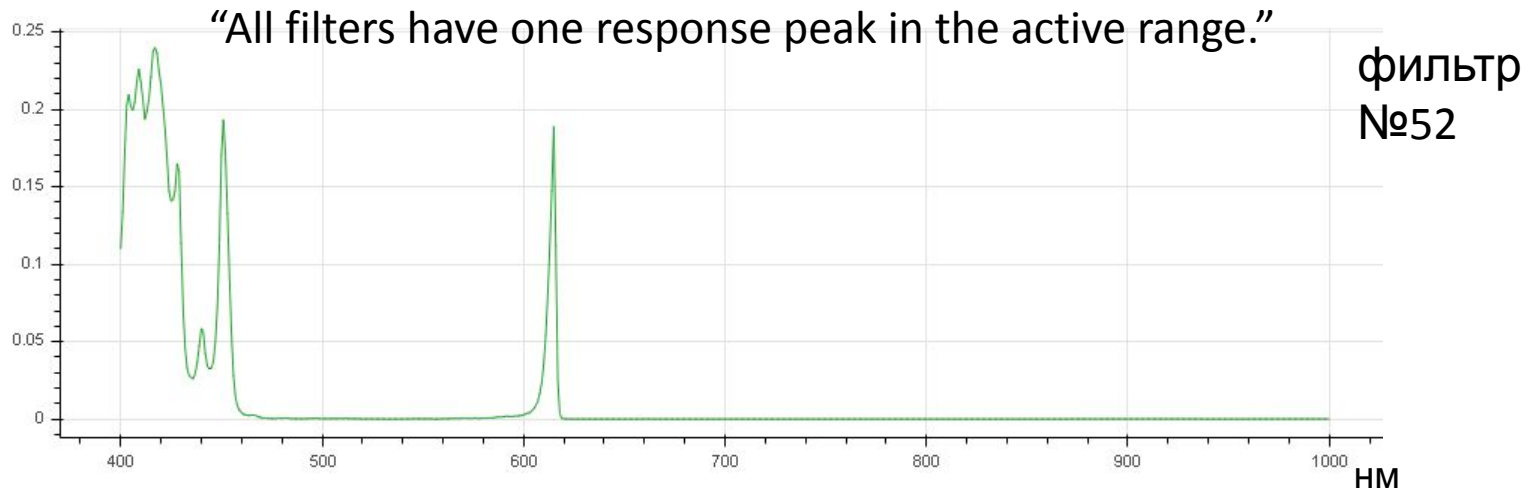
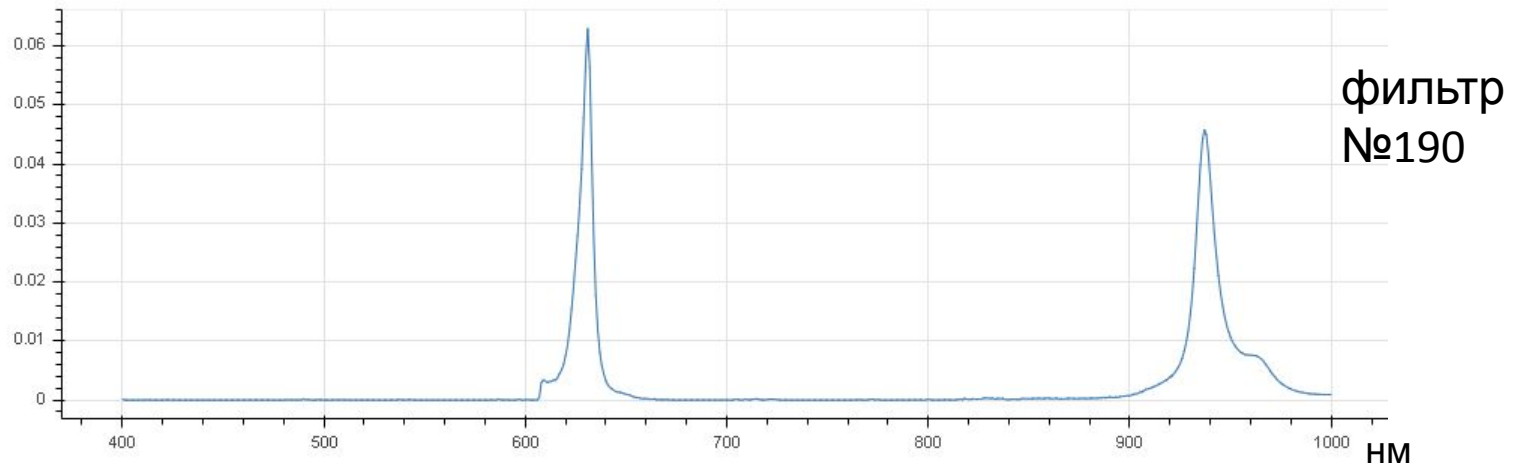
## Проблема №2: Множественные пики, интерферометр Фабри-Перо



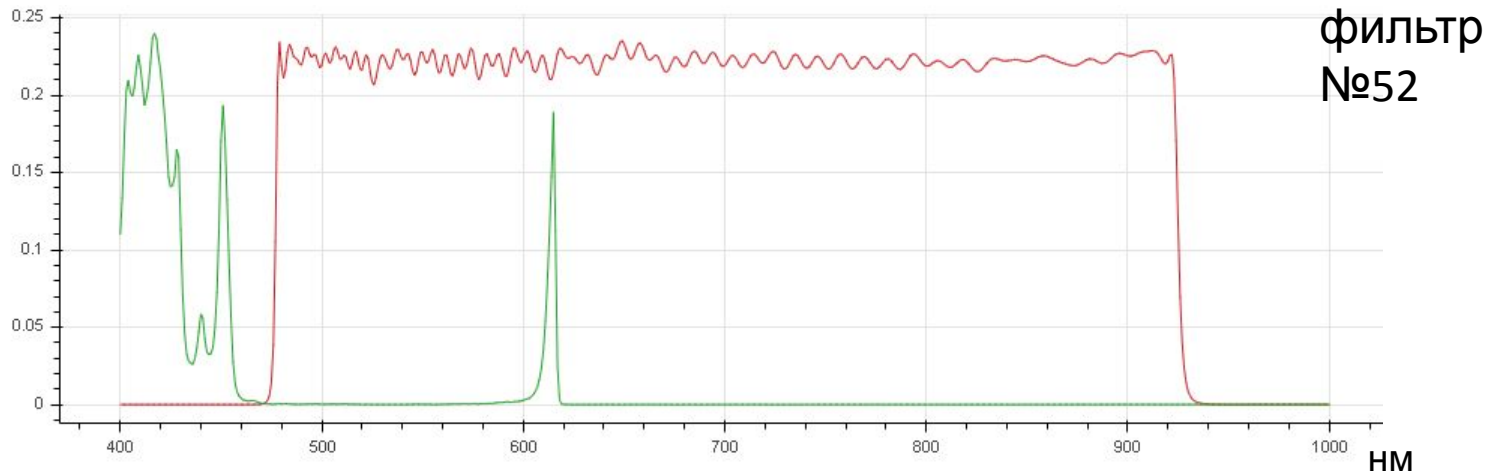
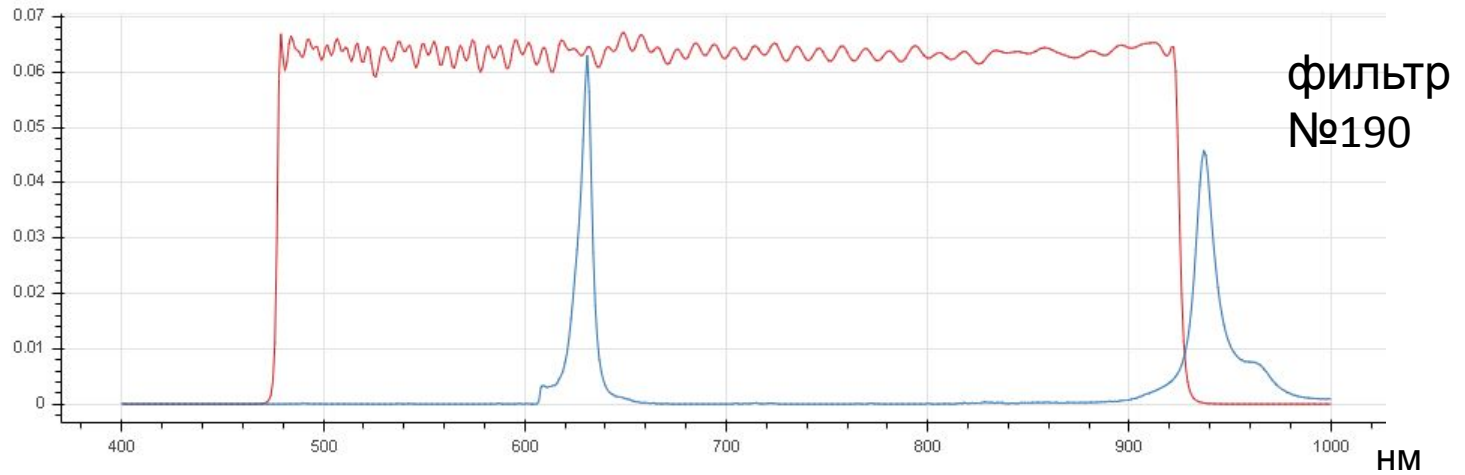
$$k\lambda = 2nL \cos \theta,$$



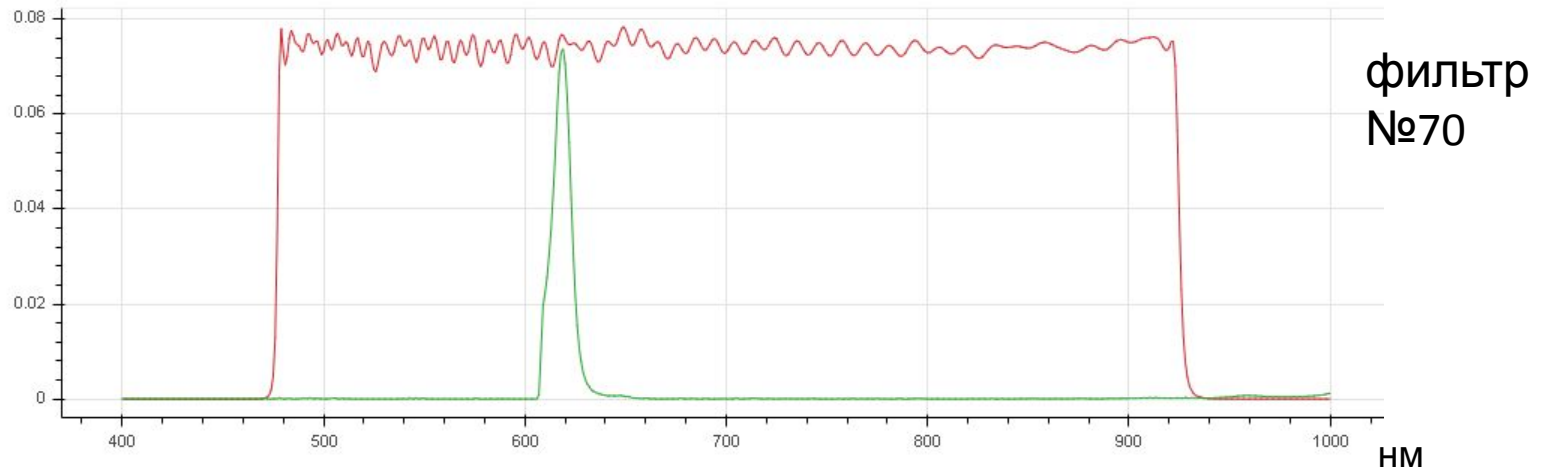
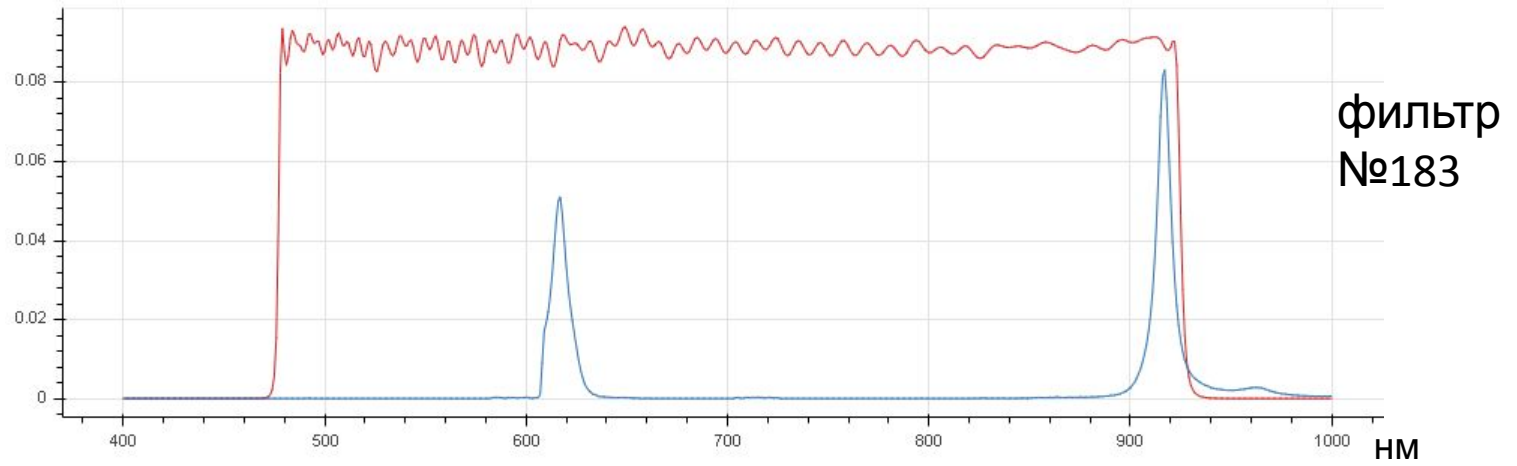
## Наводки из других областей спектра



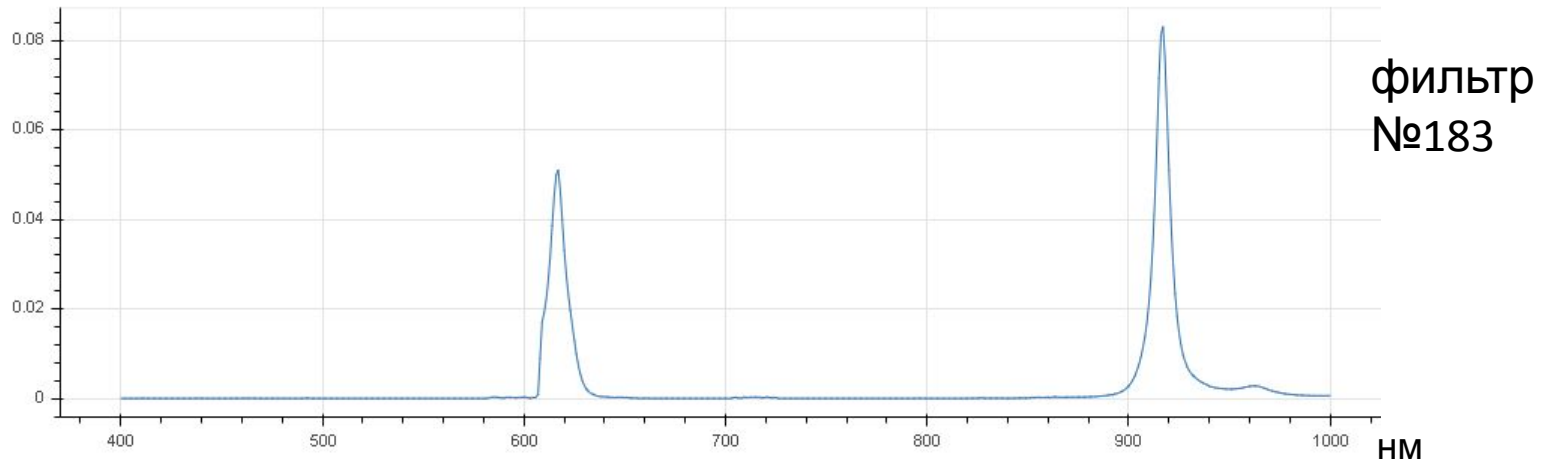
# Широкополосный фильтр 475-900nm



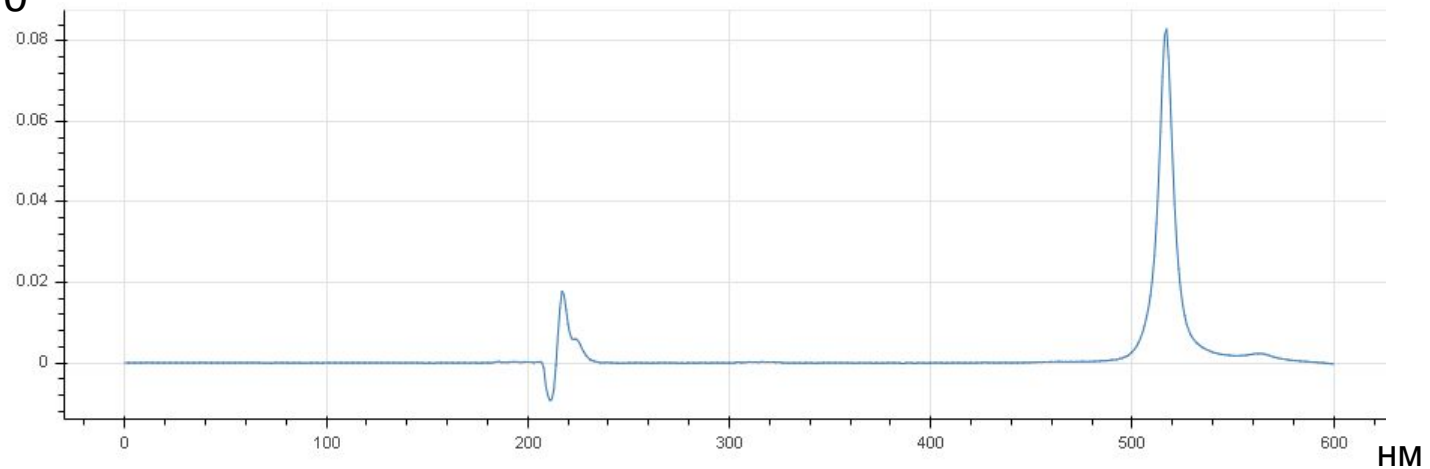
# Линейная комбинация откликов от фильтров



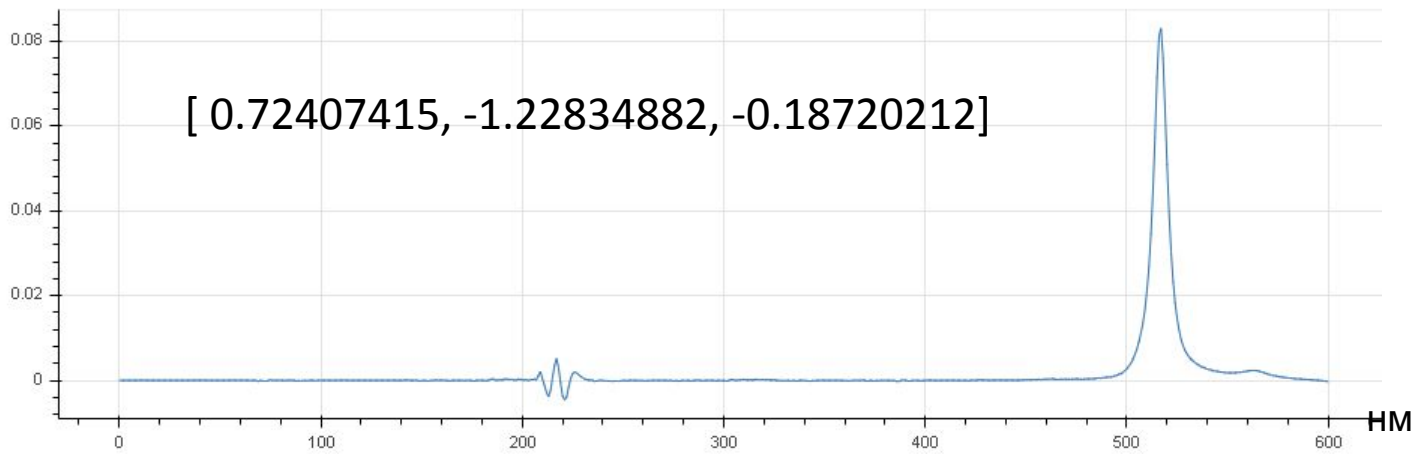
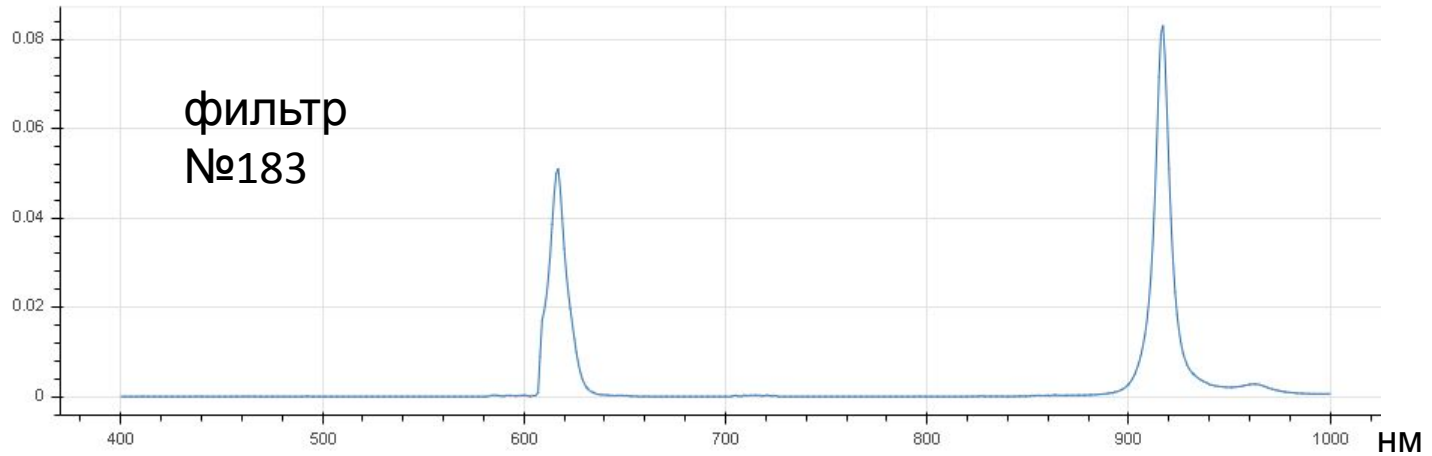
# Линейная комбинация 2 полос



фильтр №183 – 0.7 \* фильтр №70

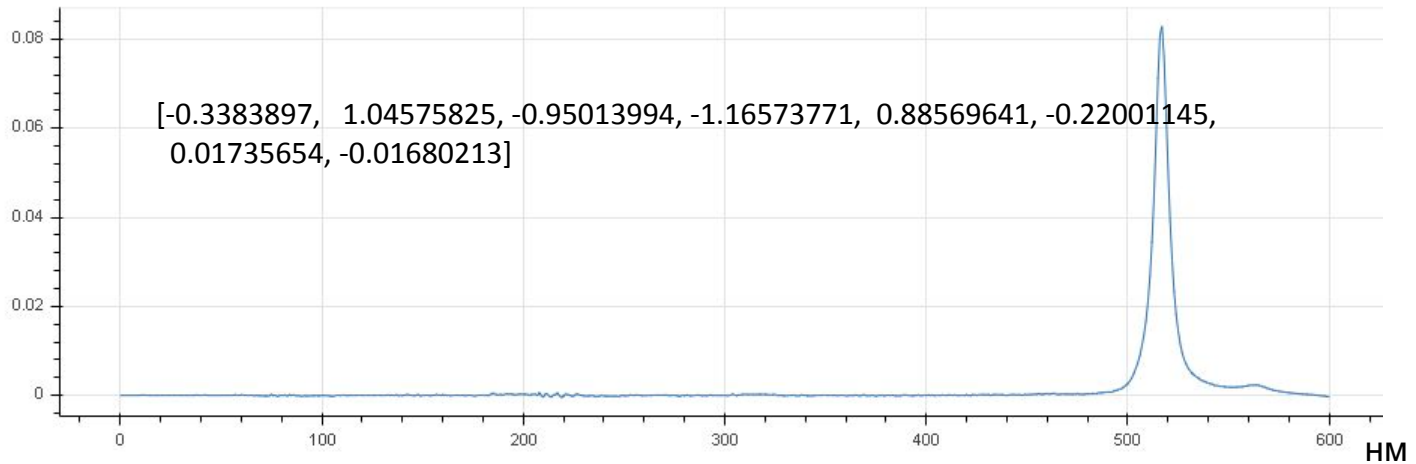
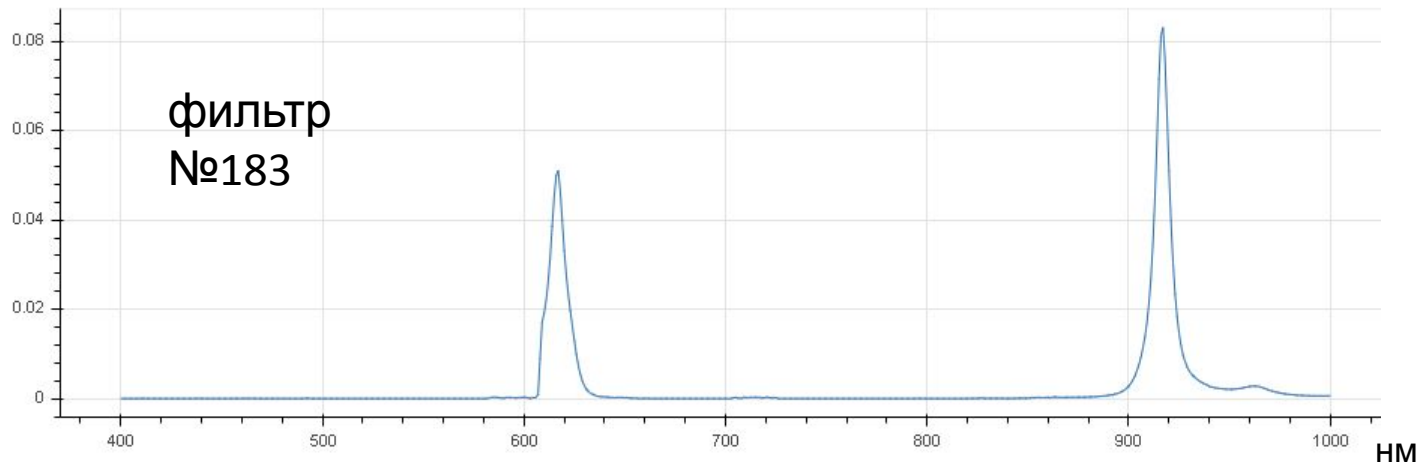


# Линейная комбинация 4 полос

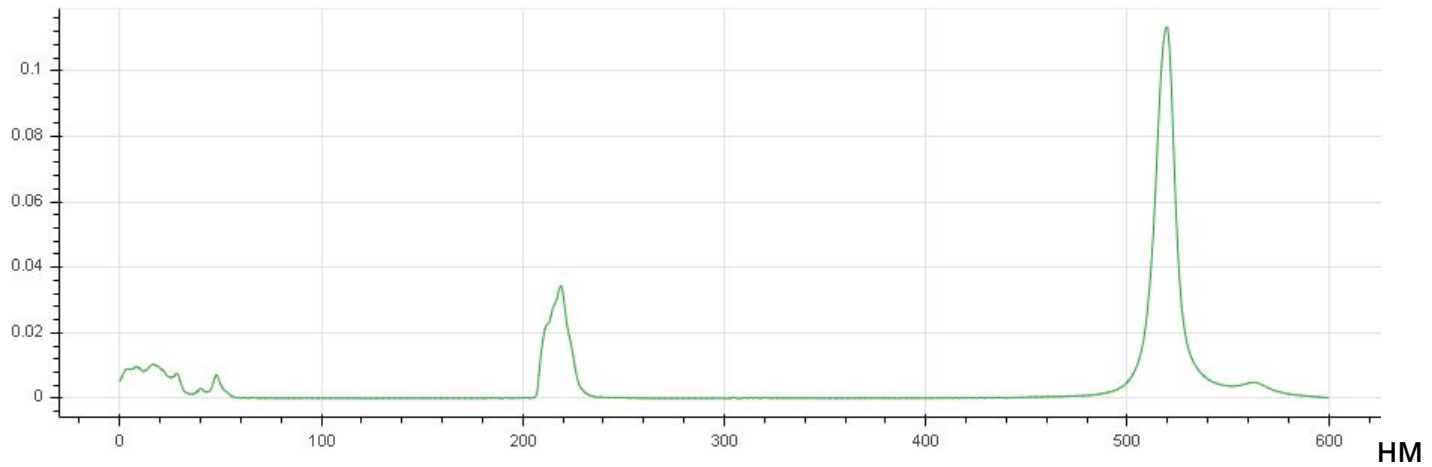
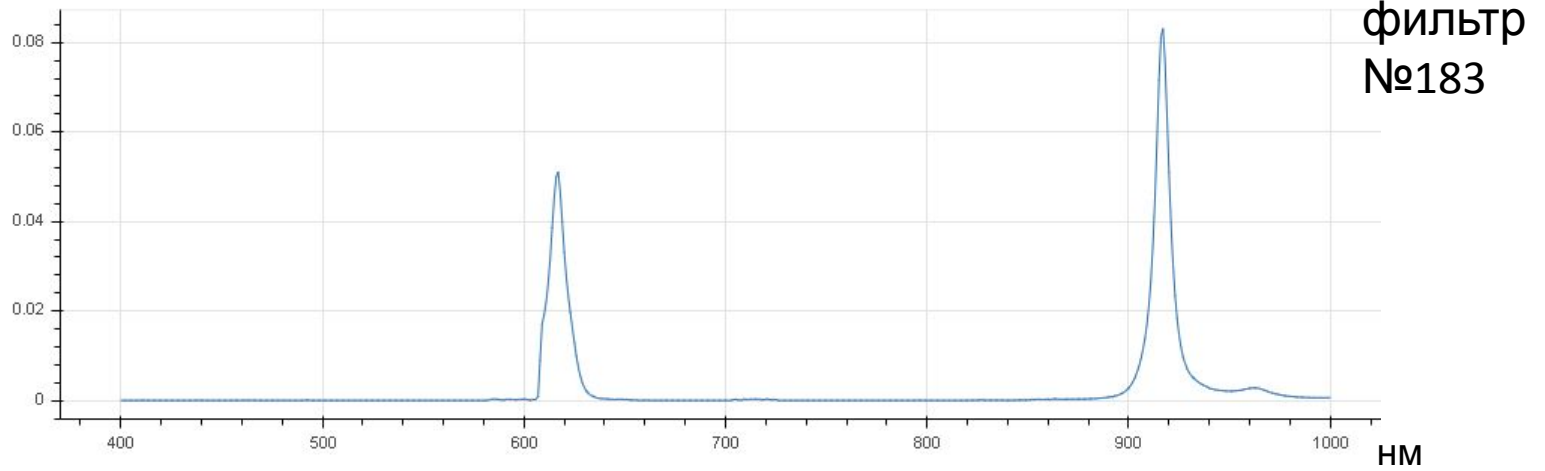




# Линейная комбинация 9 полос

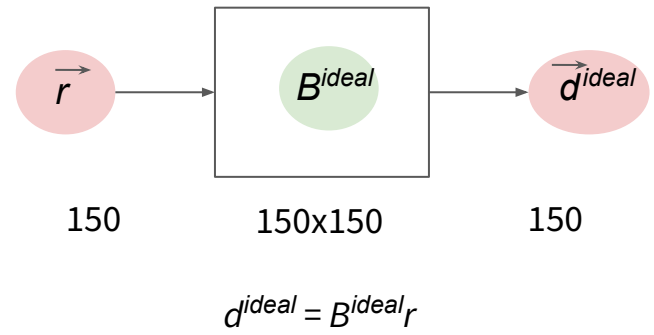
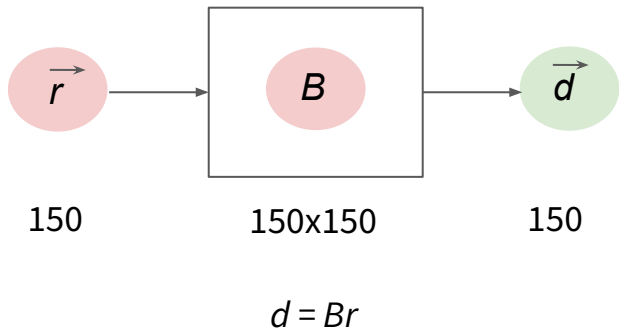


# Линейная комбинация полос от Photonfocus

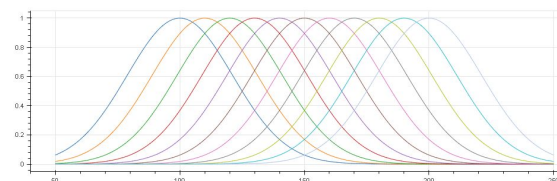
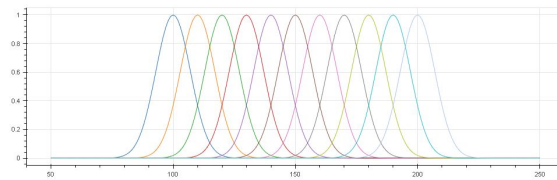
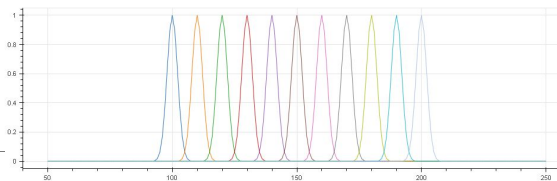
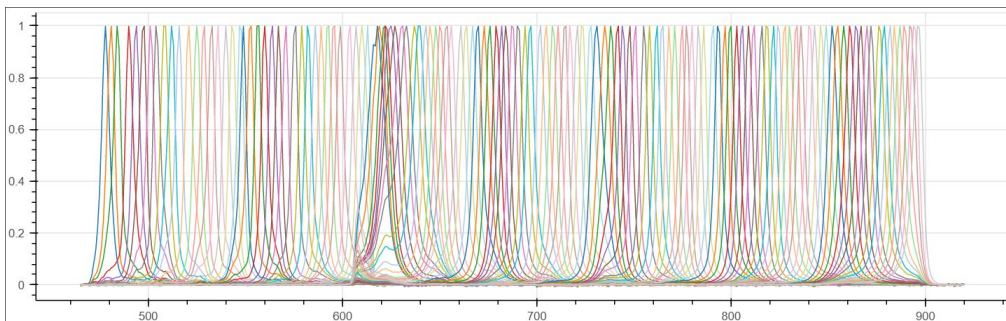
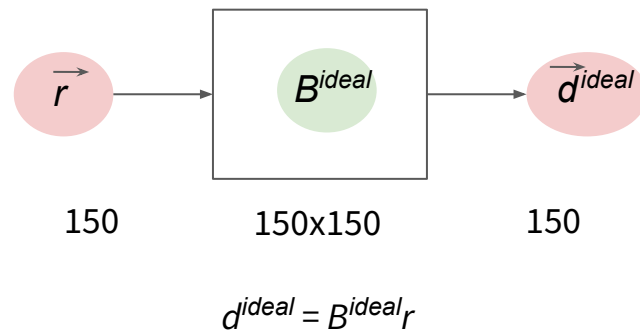
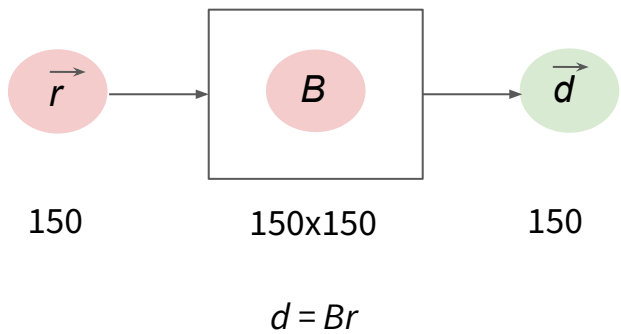




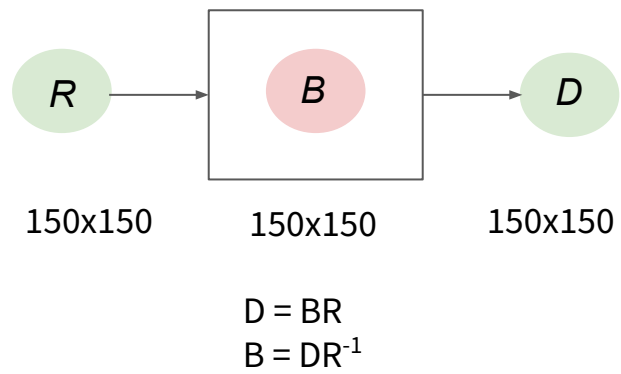
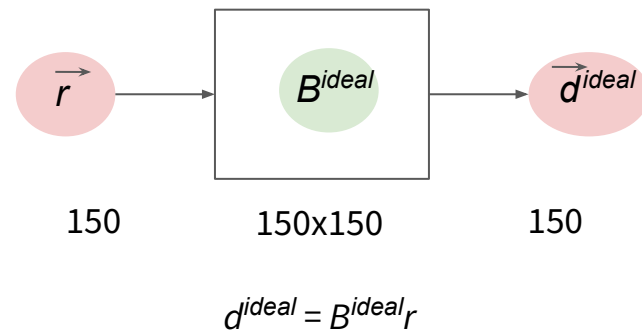
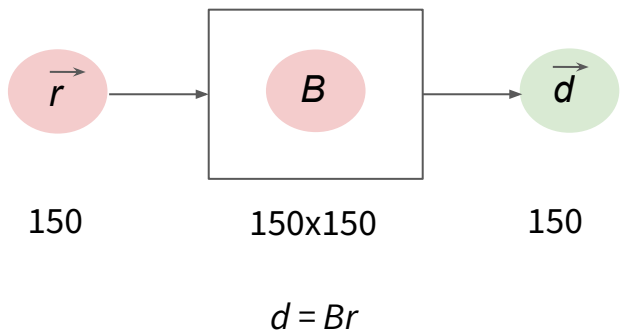
# Дискретизация



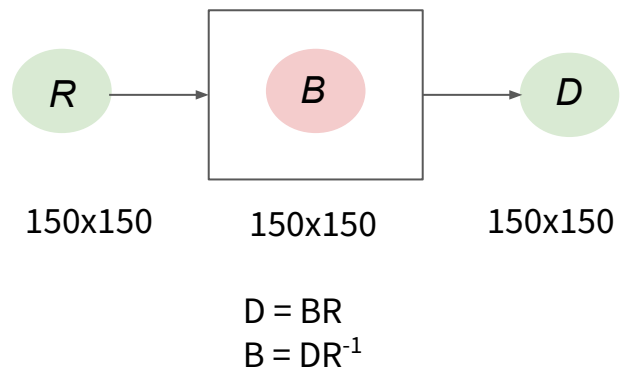
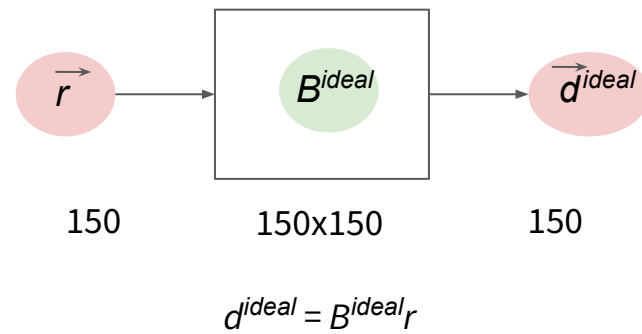
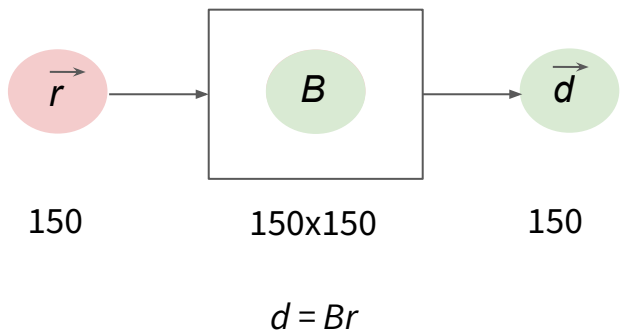
# Спектральная калибровка



# Спектральная калибровка



# Спектральная калибровка



# Спектральная калибровка



$$d^{ideal} \approx C \cdot d$$

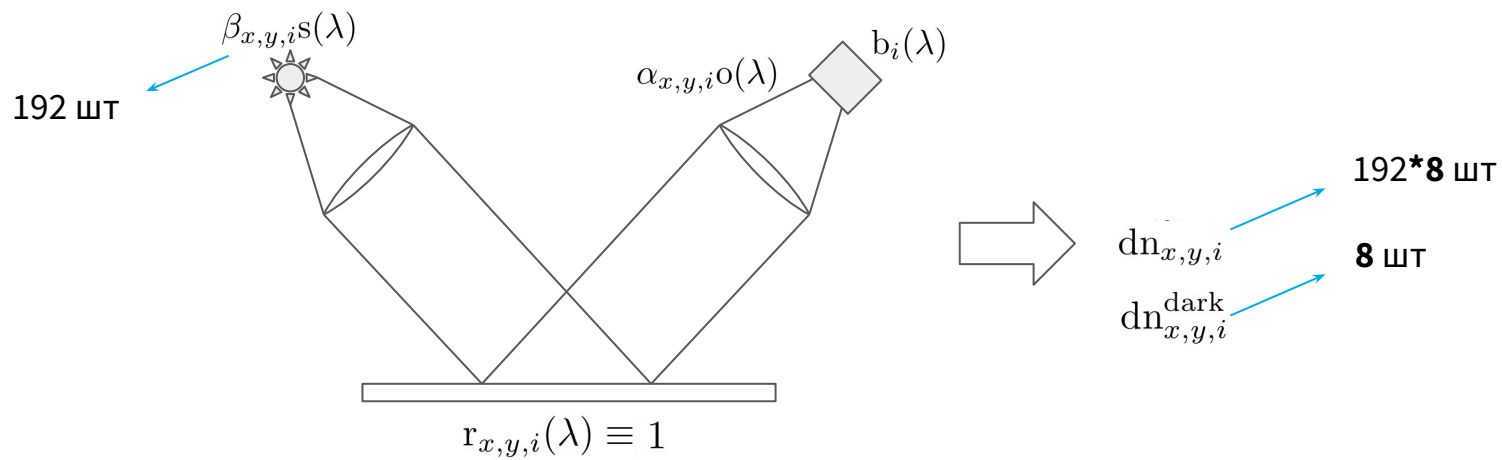
$$B^{ideal} \approx C \cdot B$$

$$C = \arg \min \|CB - B^{ideal}\|$$

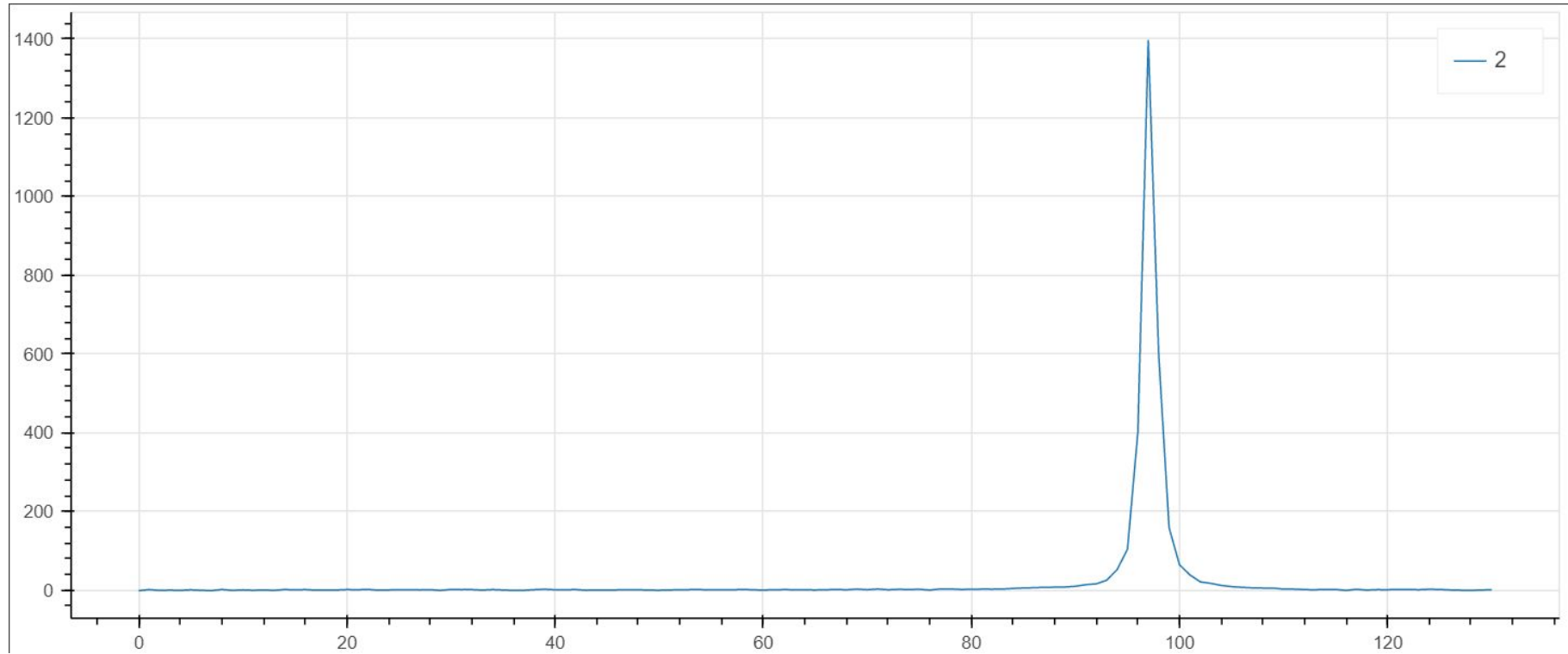
$$C = (B^T B)^{-1} B^T B^{ideal}$$



# Методика HDR

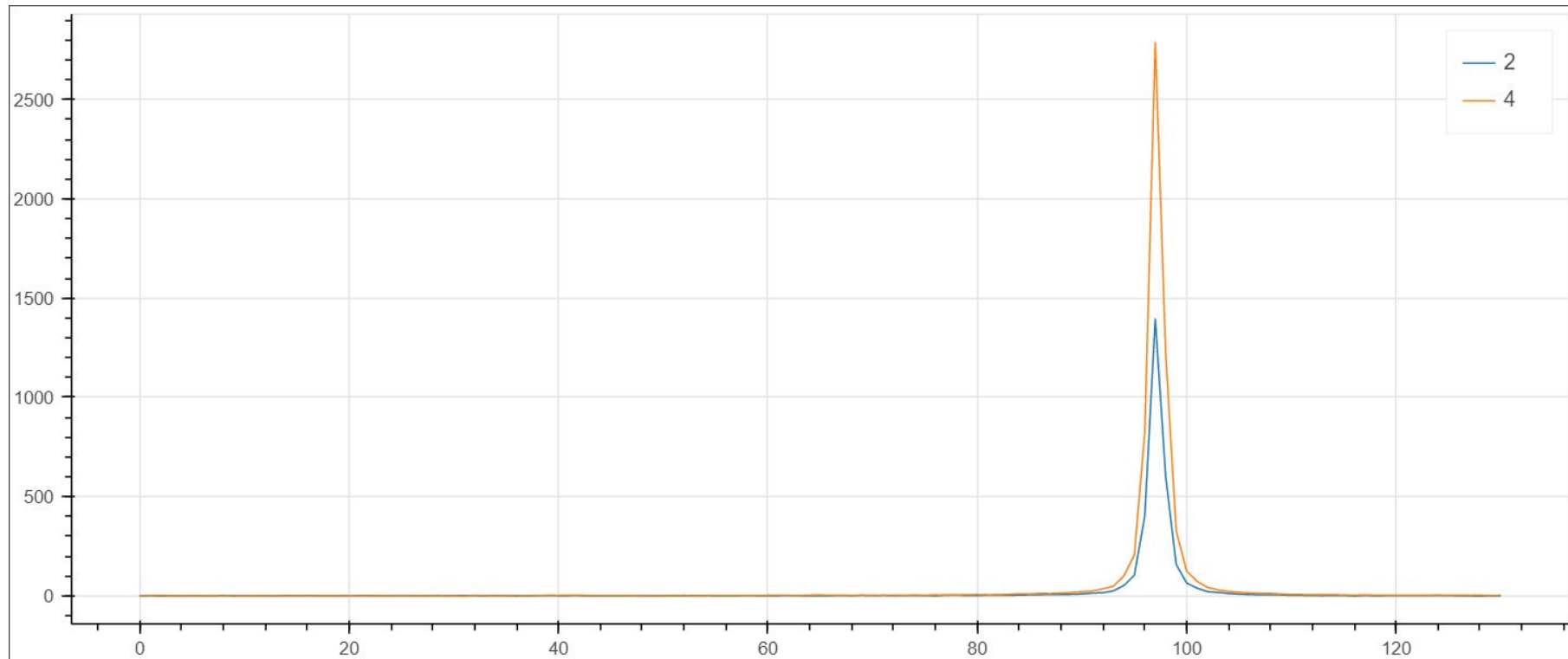


## Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



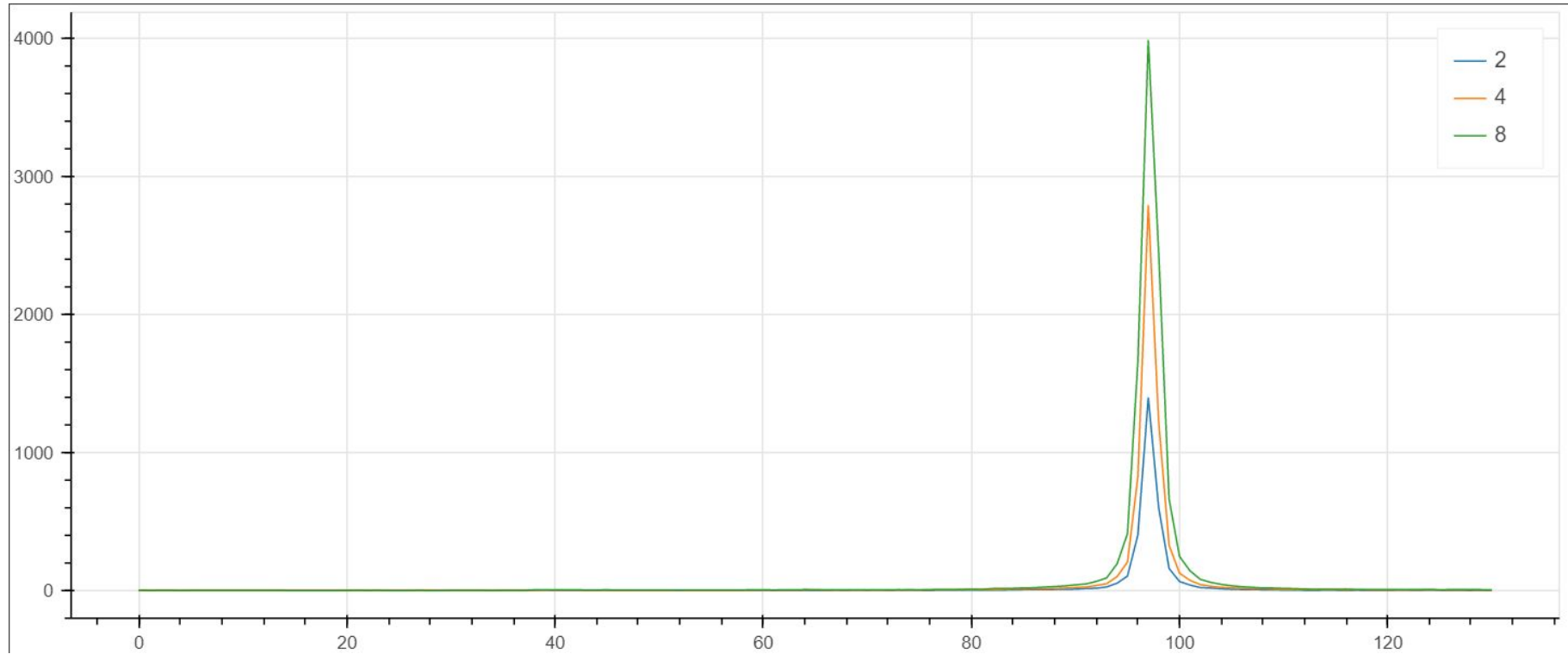
номер канала

## Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



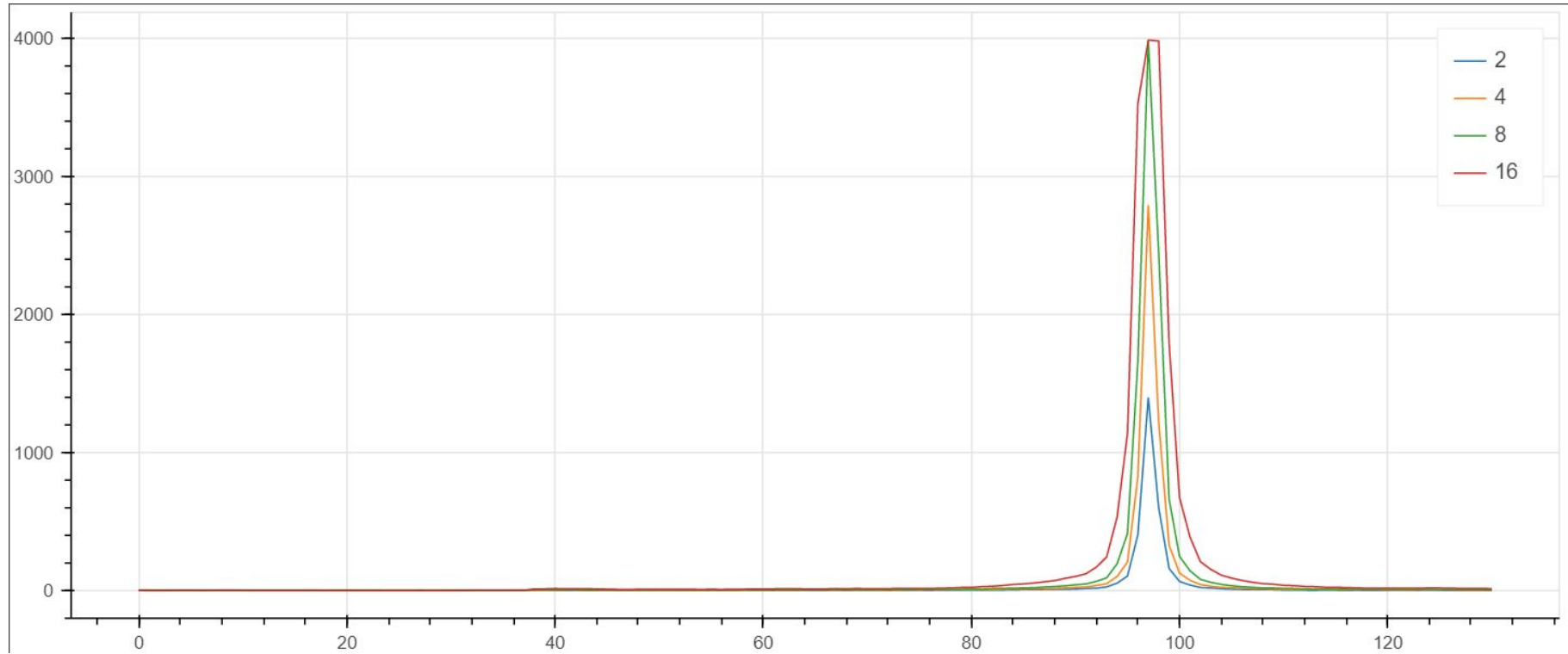
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



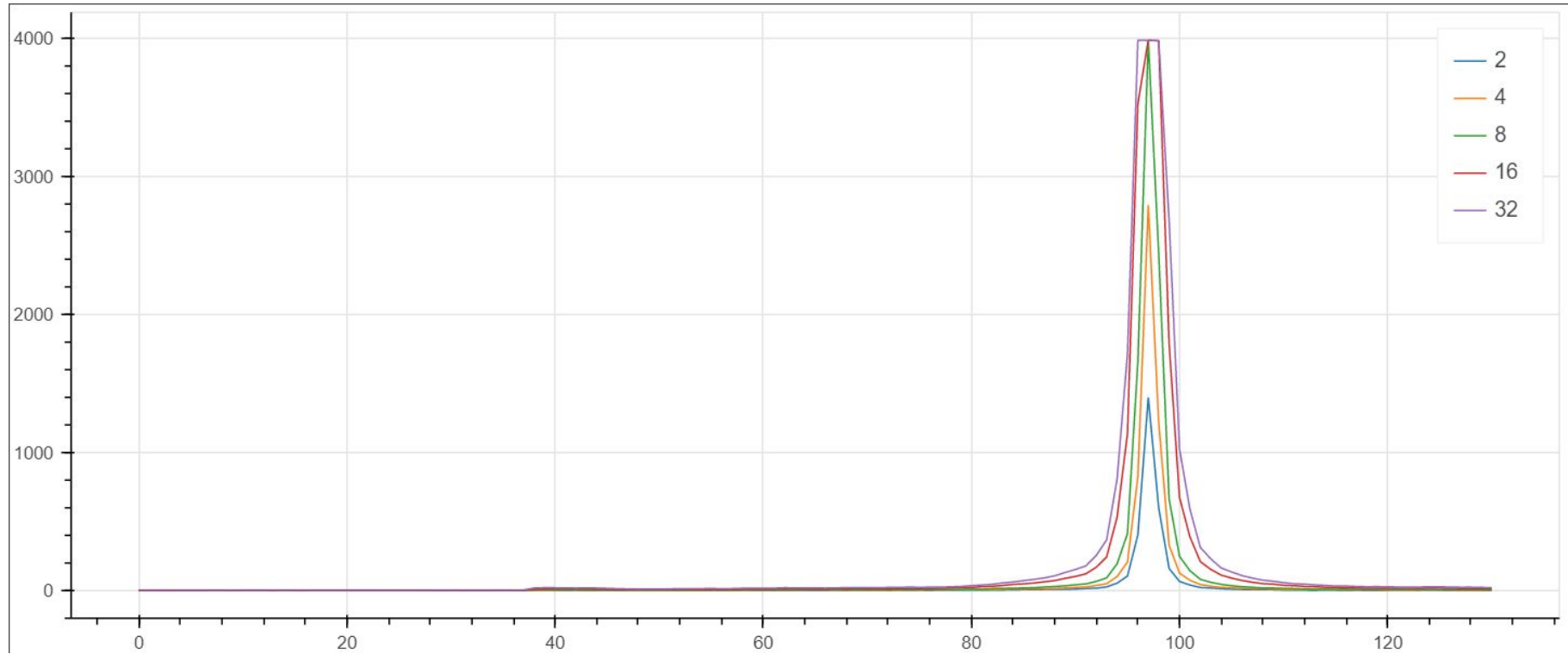
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



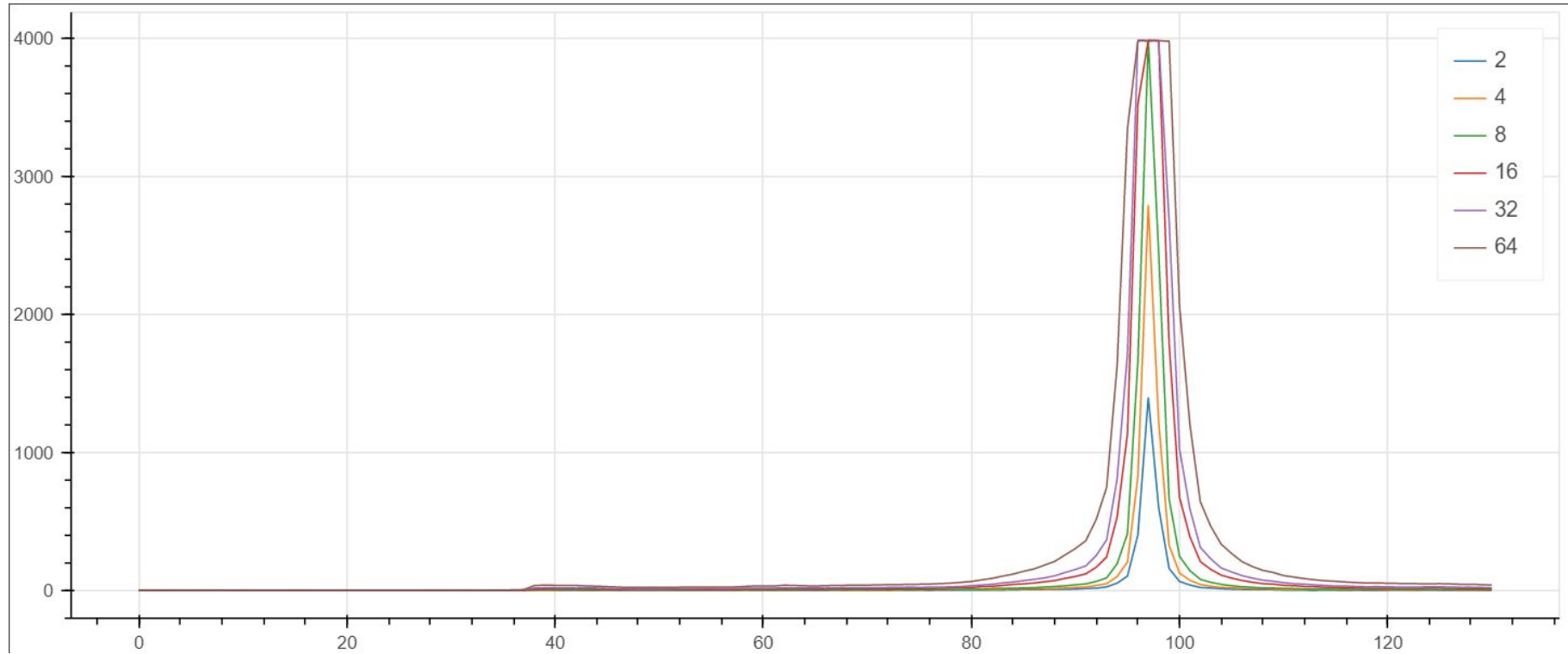
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



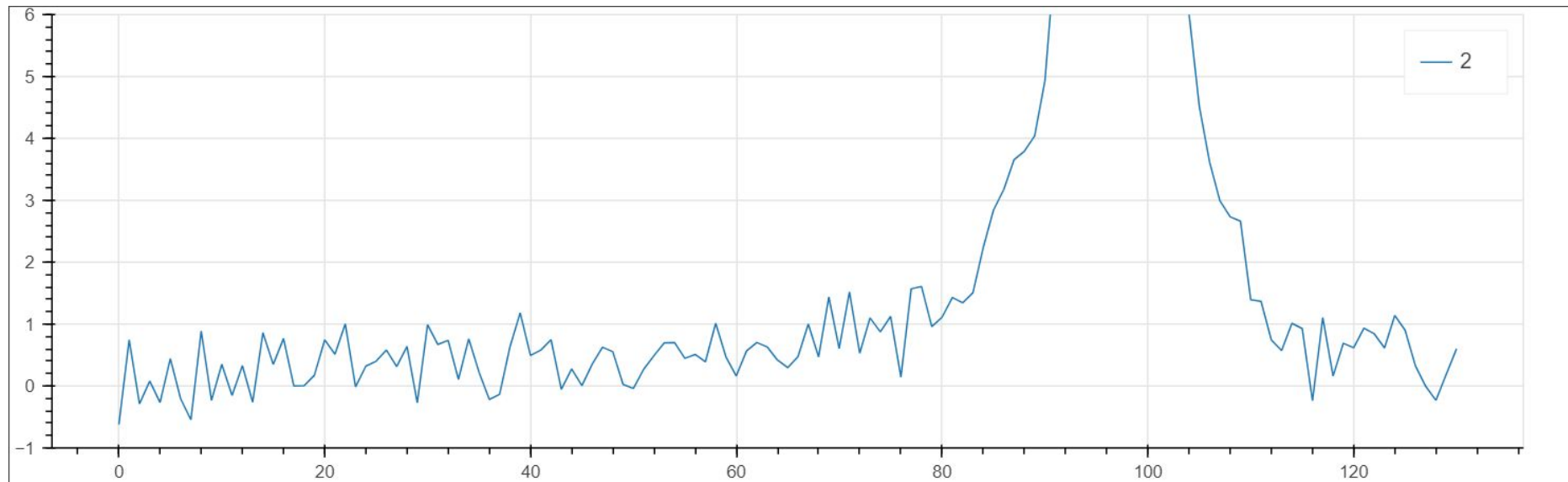
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



номер канала

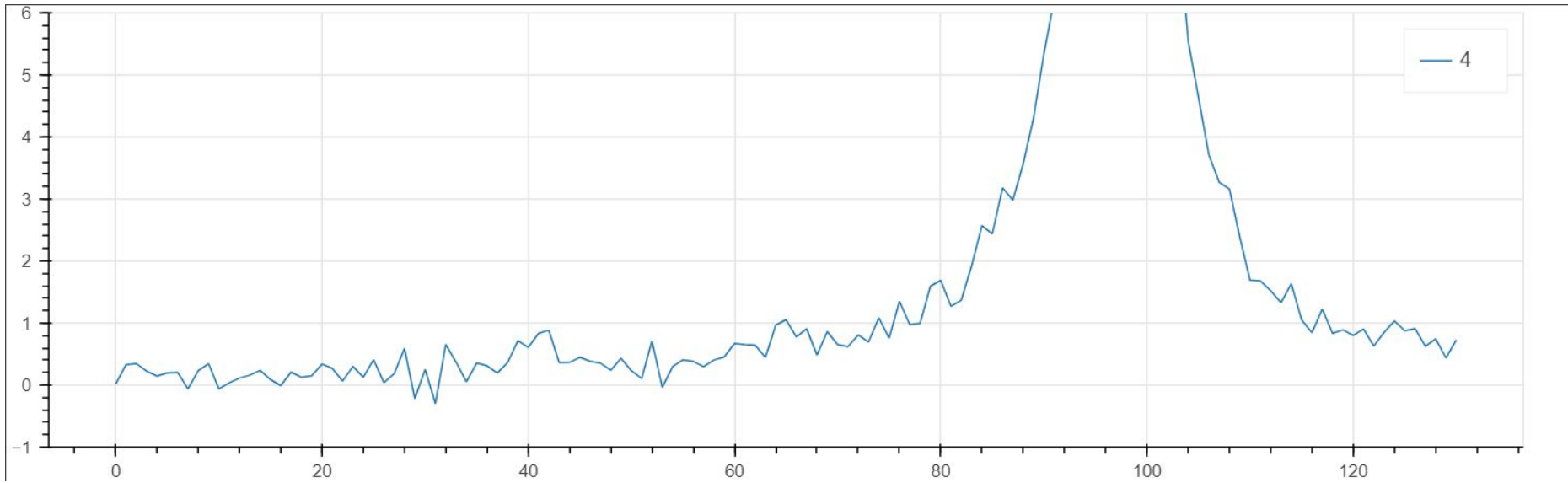
# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



номер канала

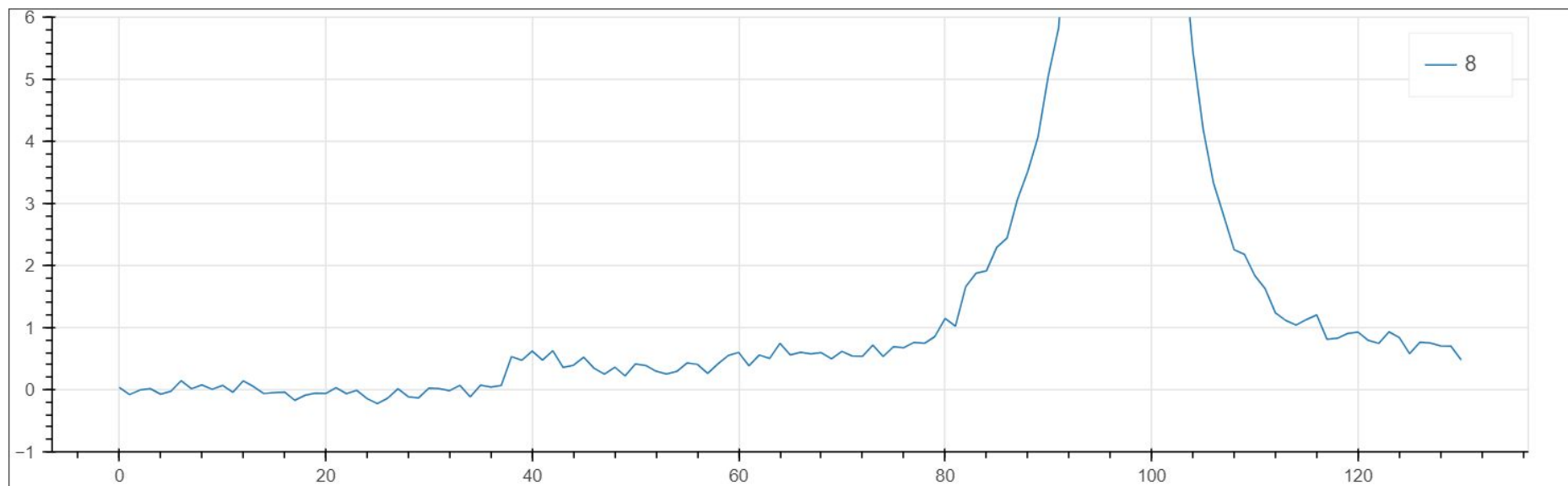


# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



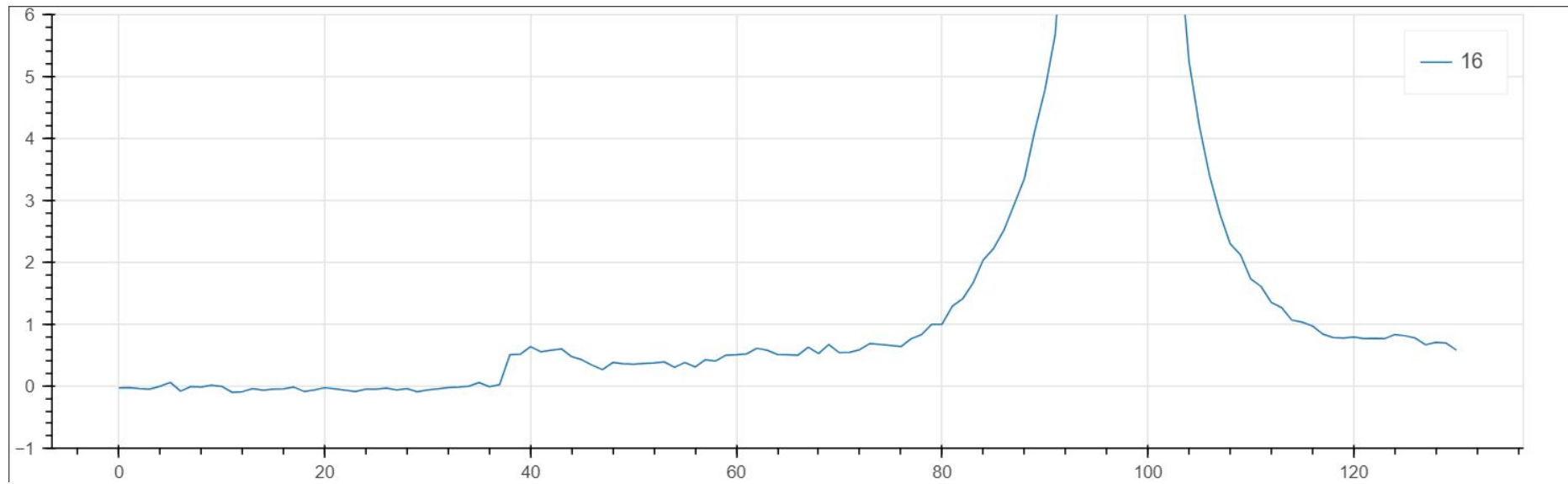
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



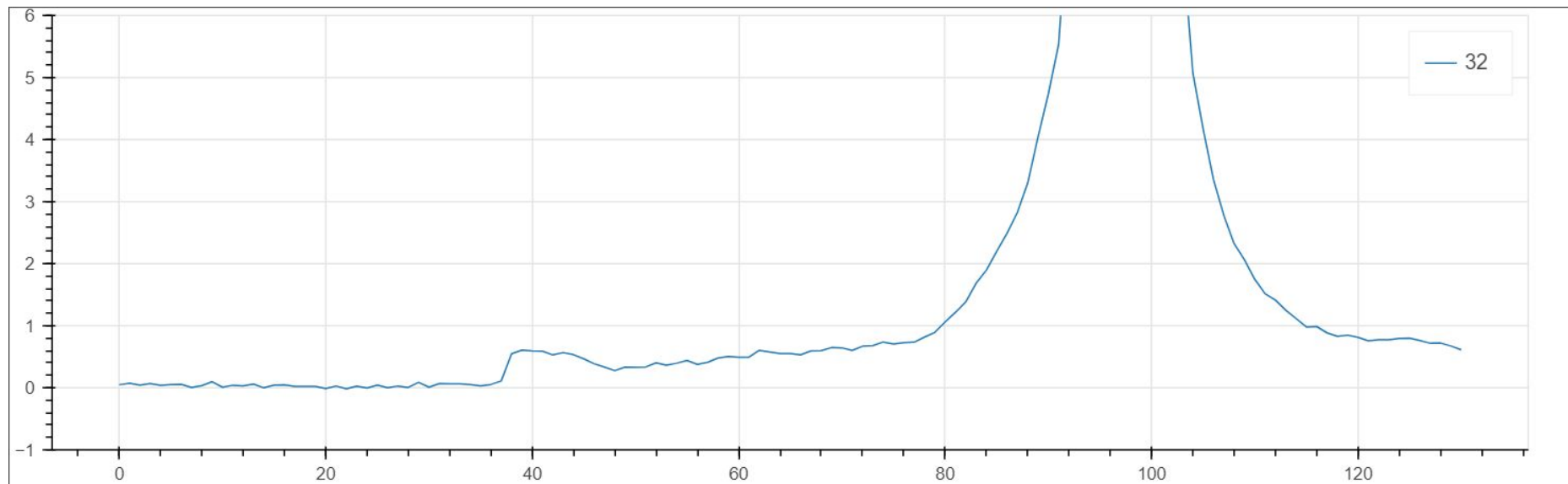
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



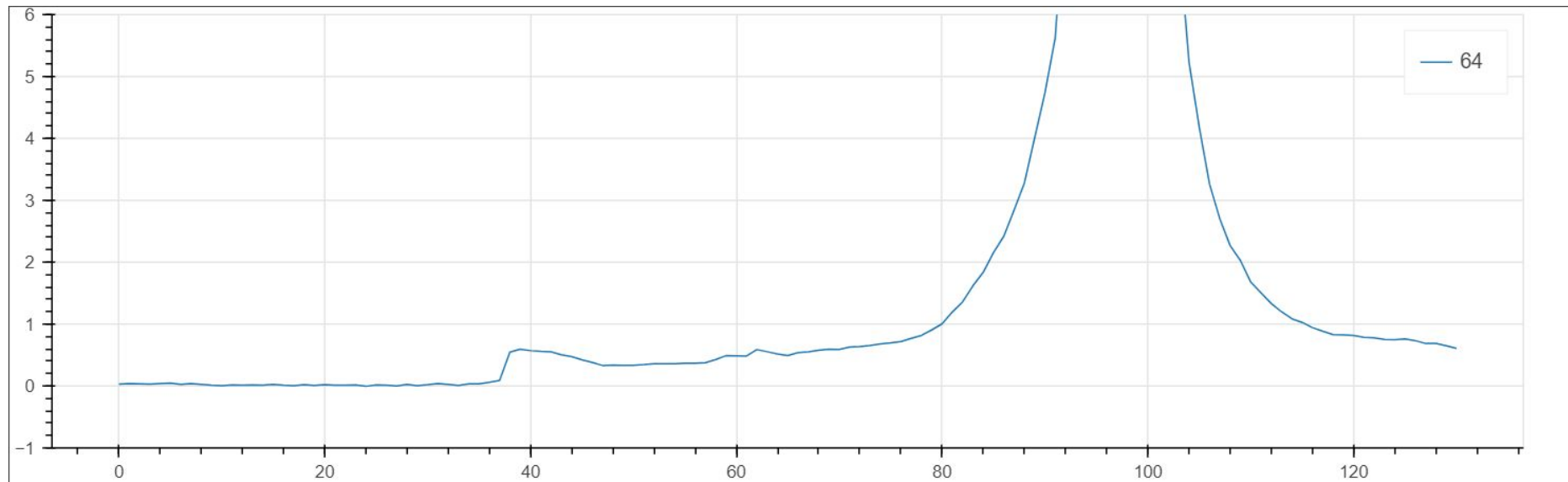
номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



номер канала

# Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм

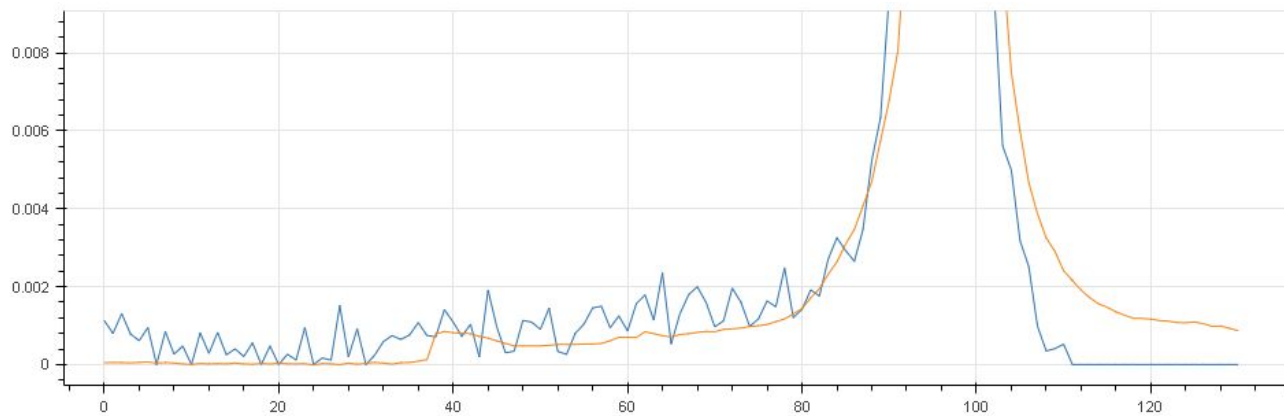


номер канала

## Отклик камеры на монохроматический свет $\lambda=800$ нм



син - штатная  
калибровка  
оранж - новая  
калибровка

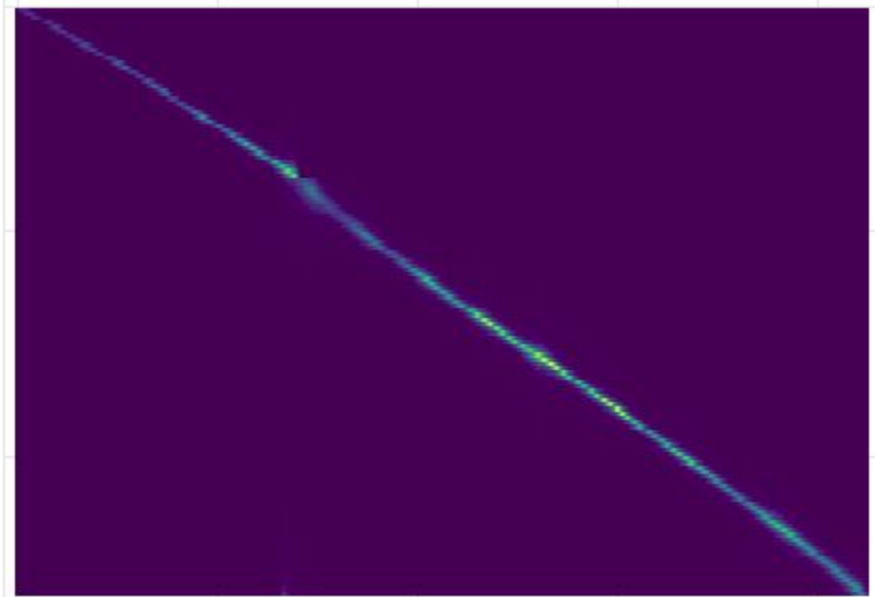
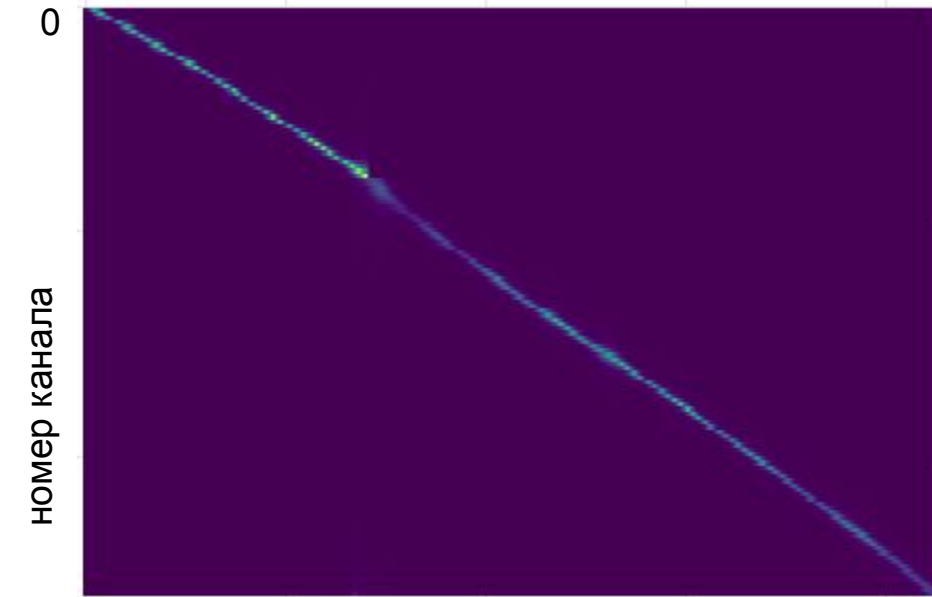


номер канала

# Сравнение калибровочных матриц

С штатная

С новая



475nm

длина волны

900nm

475nm

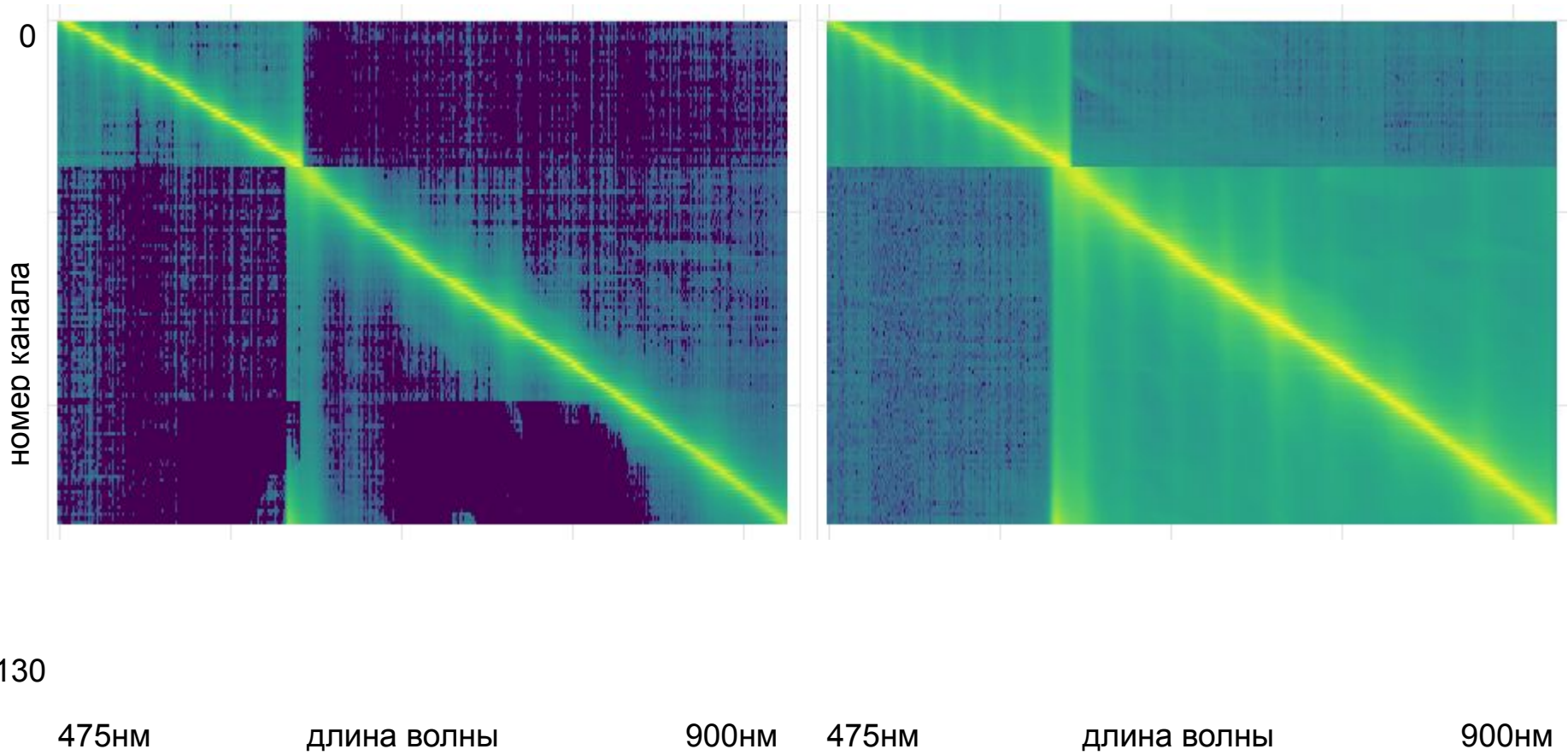
длина волны

900nm

# Сравнение калибровочных матриц (логарифмический масштаб)

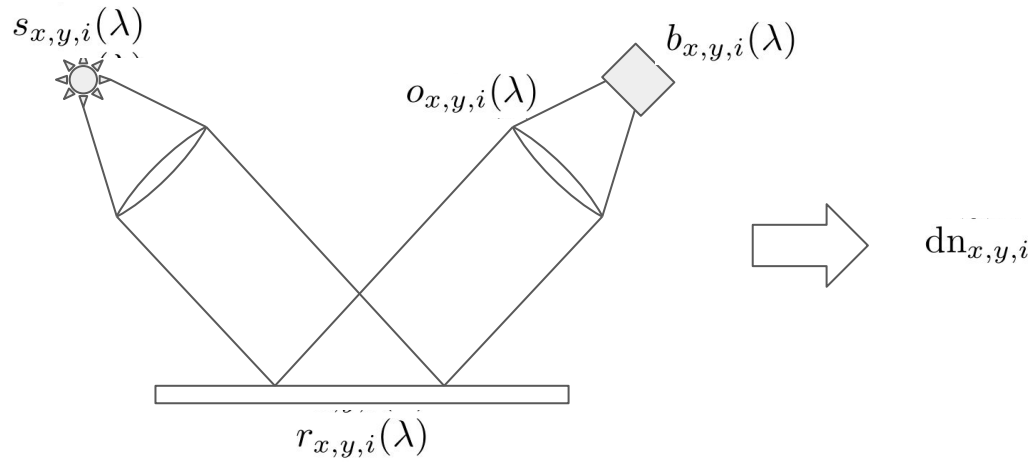
С штатная

С новая

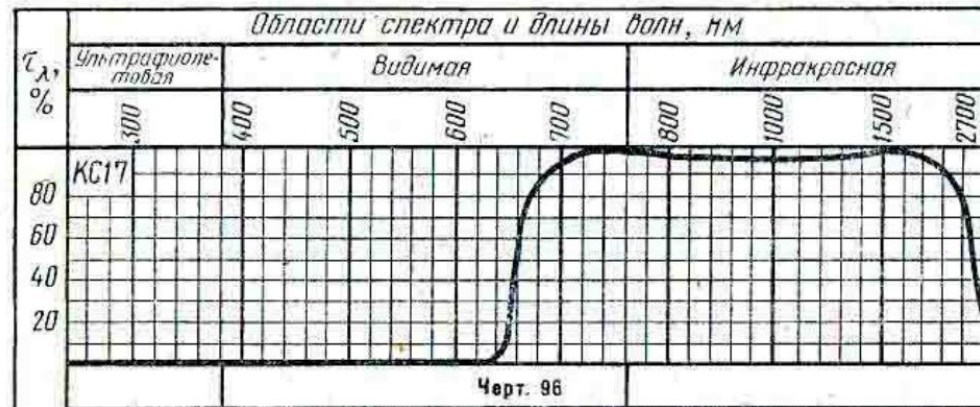




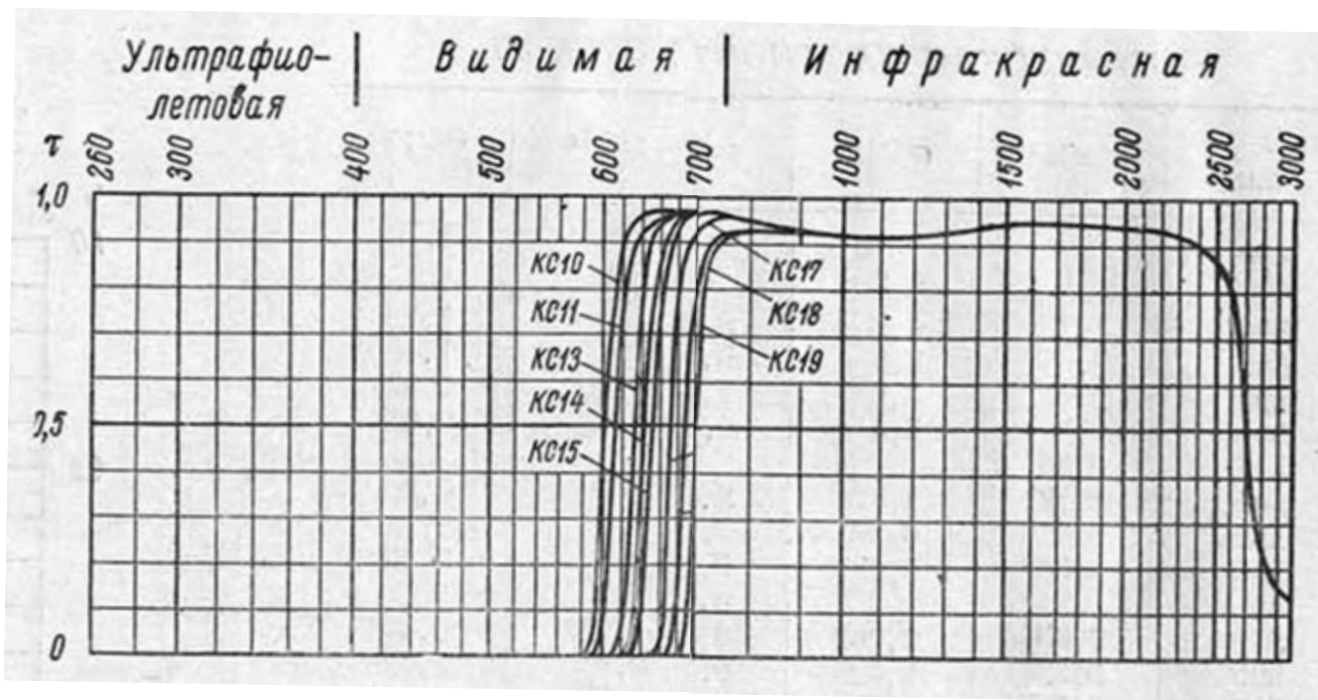
# Модель процесса верификации



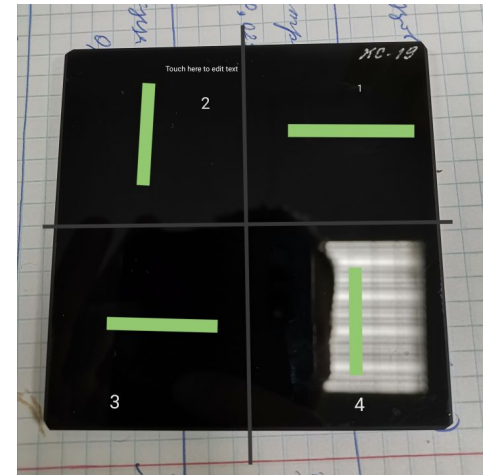
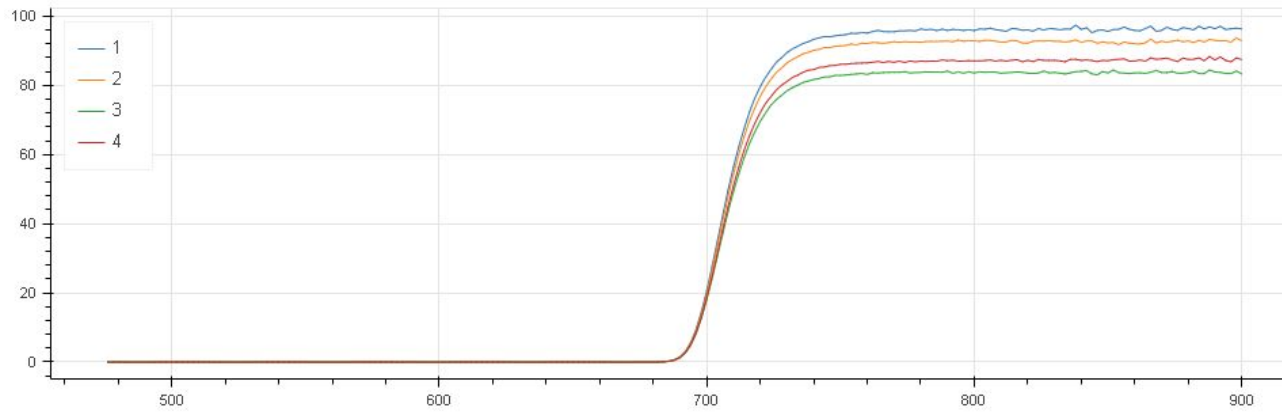
КС17 =  
"красное стекло - 17"



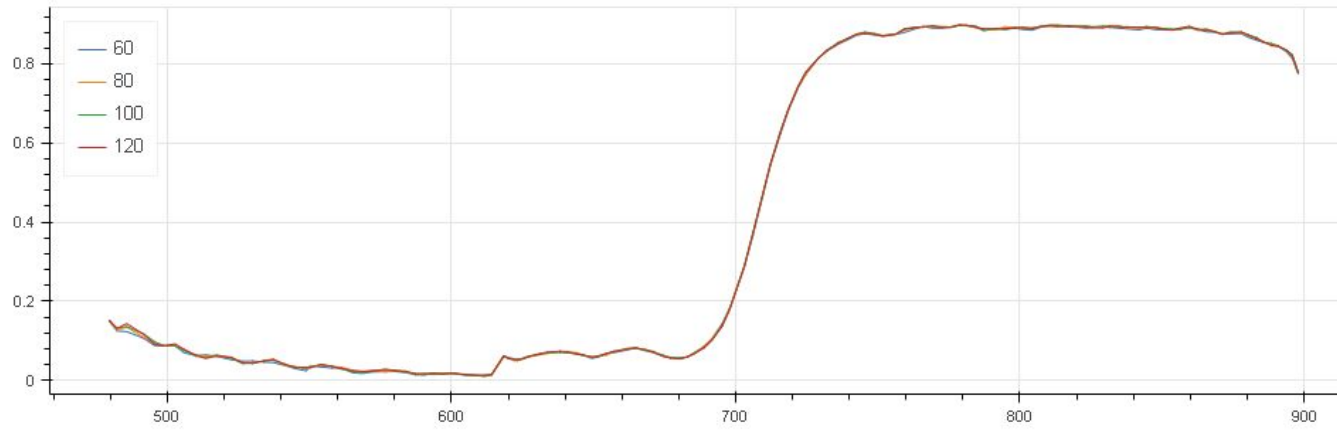
# ГОСТ 3514-94 "Оптические стёкла"



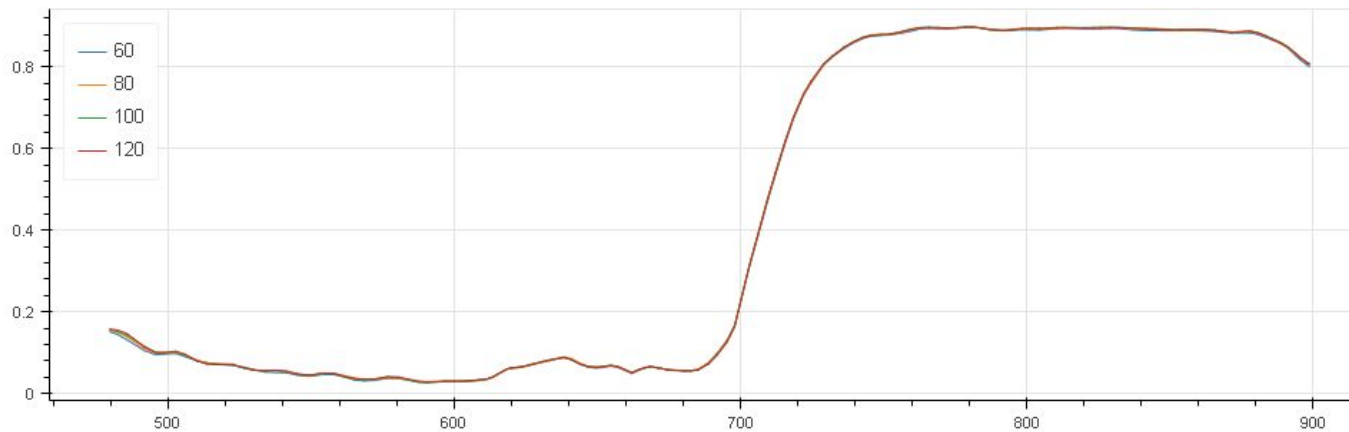
# КС-19, референс



# КС-19

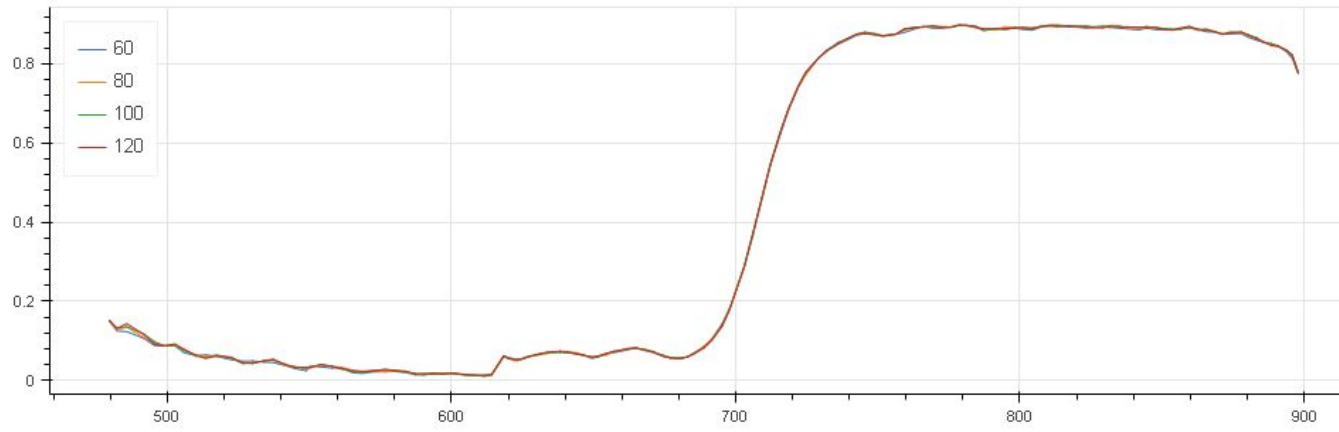


"сырые"  
данные

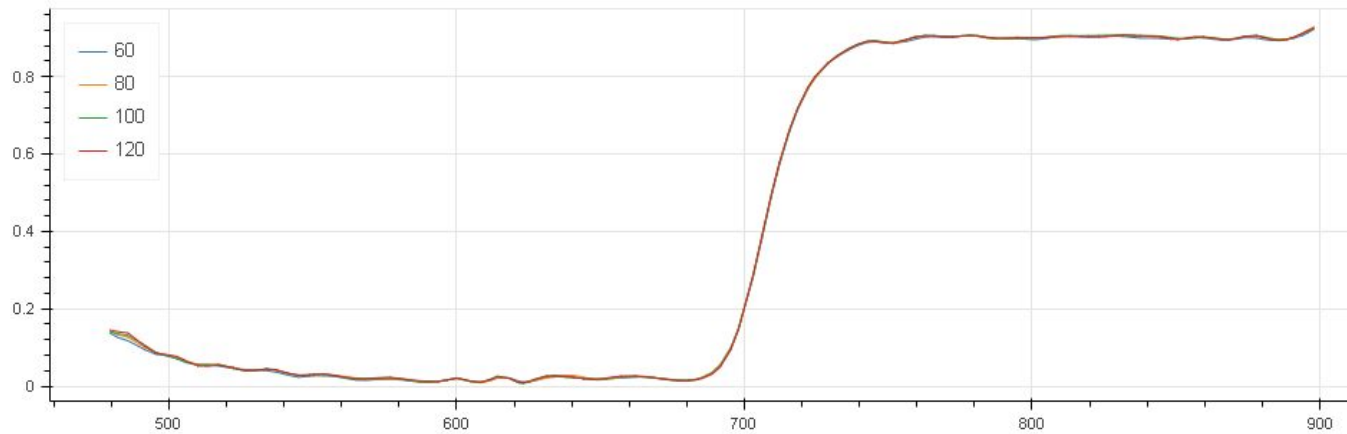


штатная  
калибровка

# КС-19



"сырые"  
данные



новая  
калибровка

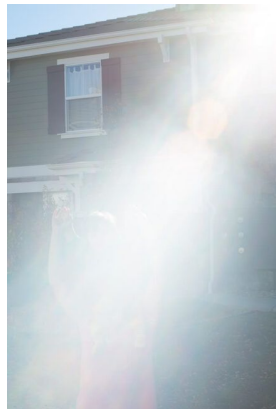
## Разновидности бликов в объективе



*Lens flare,  
Источник в поле зрения объектива*



*Lens flare,  
Источник вне поля зрения объектива*



*Veiling flare*



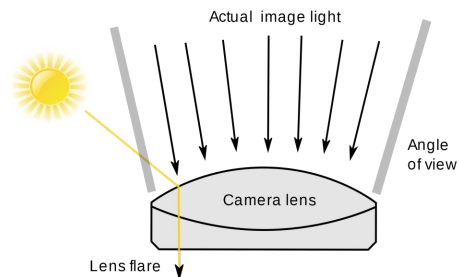
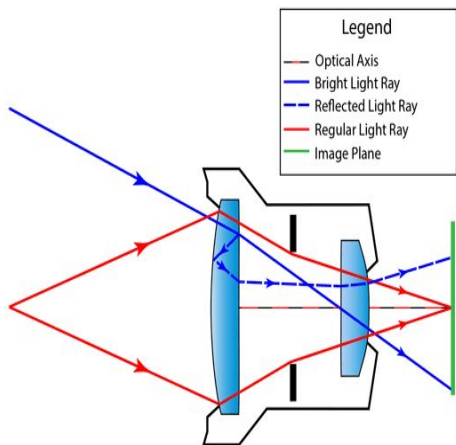
*Red dot flare*

# Причины бликов в объективе

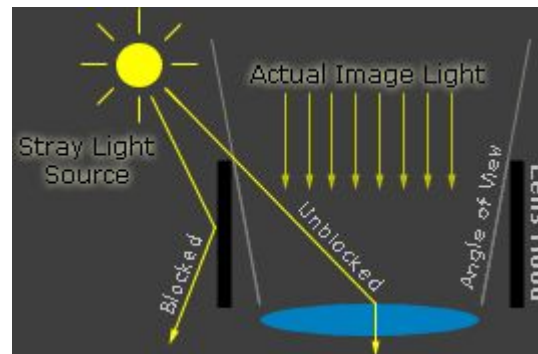


*Источник в поле зрения объектива*

*Источник вне поля зрения объектива*

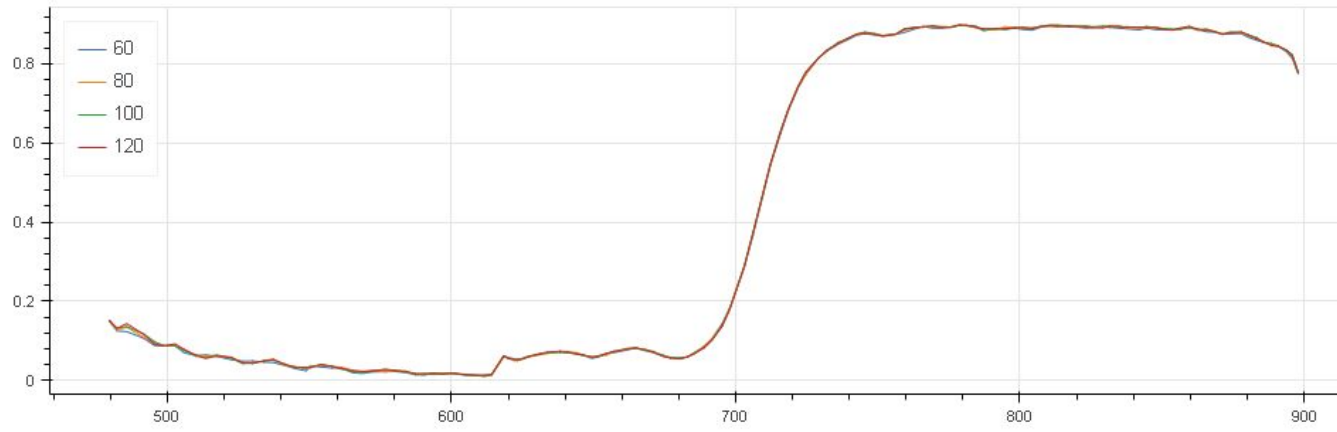


# Бленды

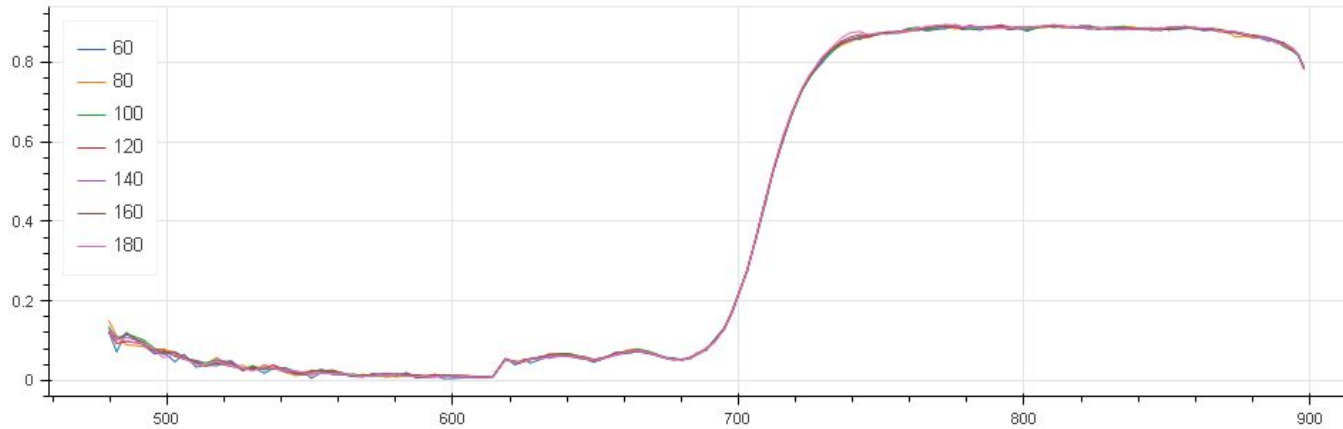




# KC-19

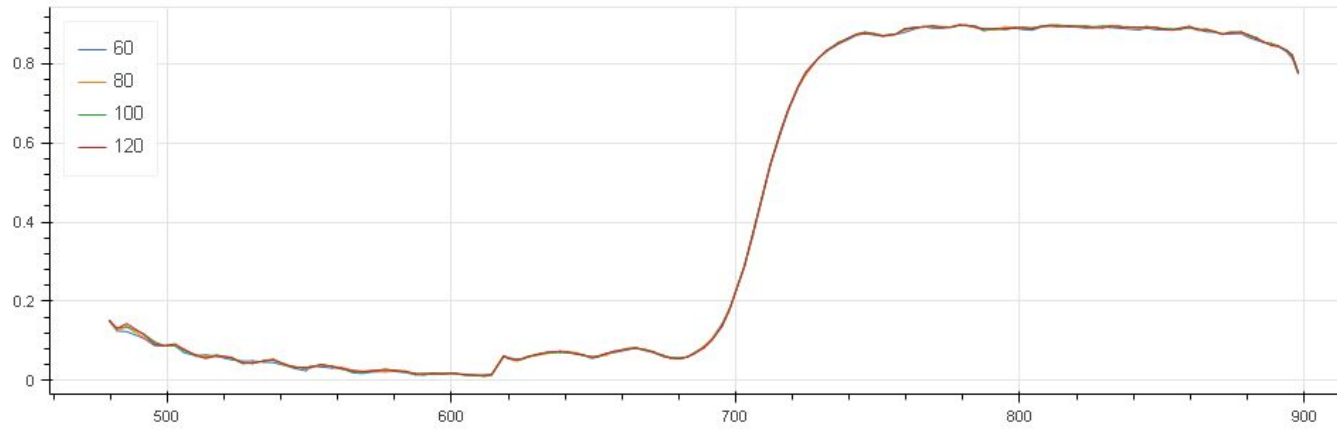


"сырые"  
данные

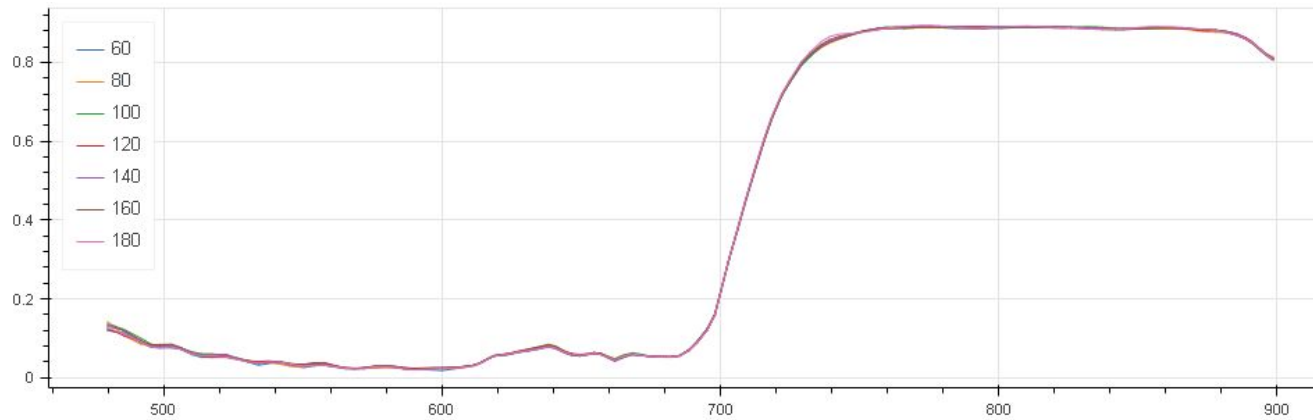


бленда

# КС-19

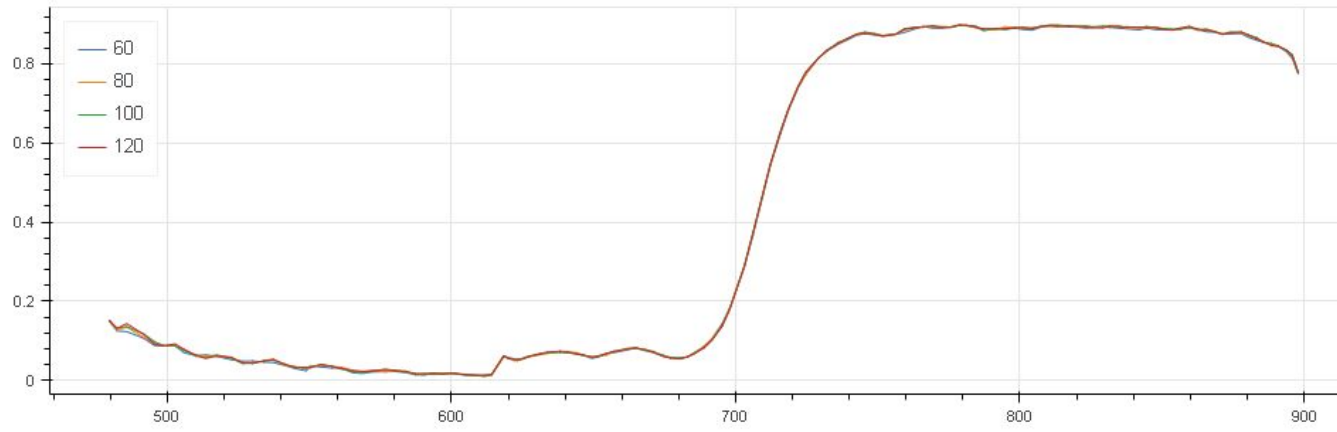


"сырые"  
данные

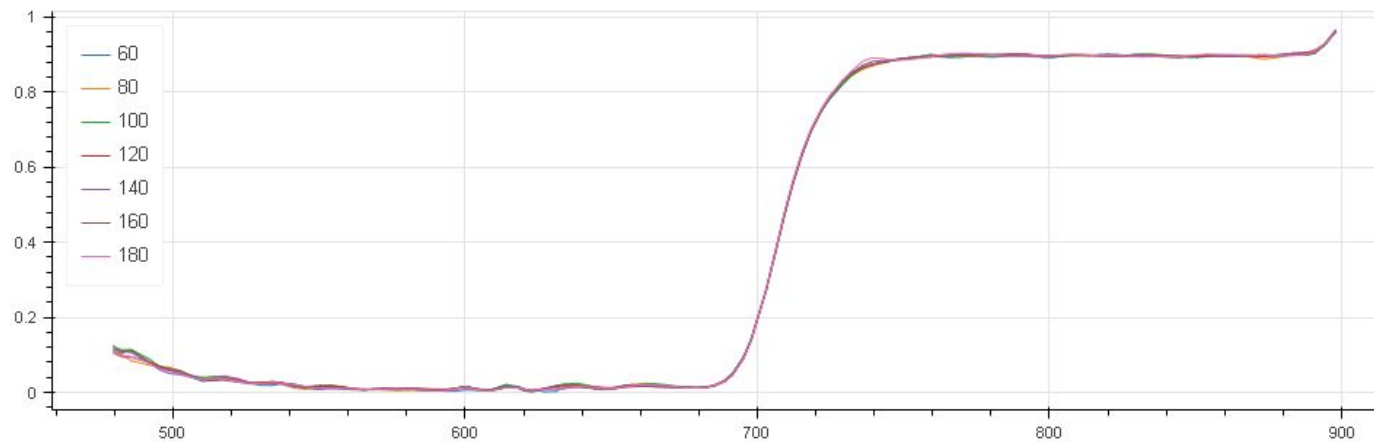


бленда  
+ штатная  
калибровка

# КС-19

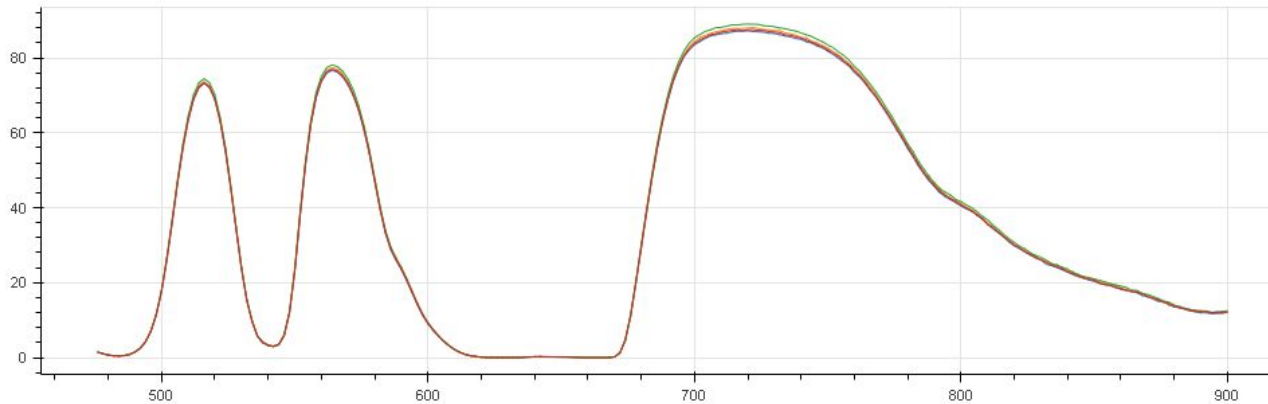


"сырые"  
данные

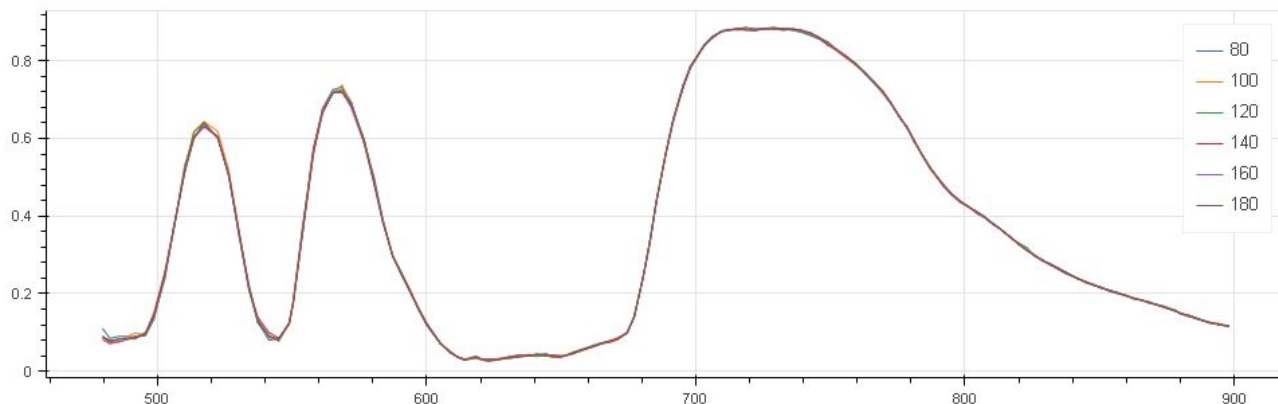


бленда  
+ новая  
калибровка

# 3C-7

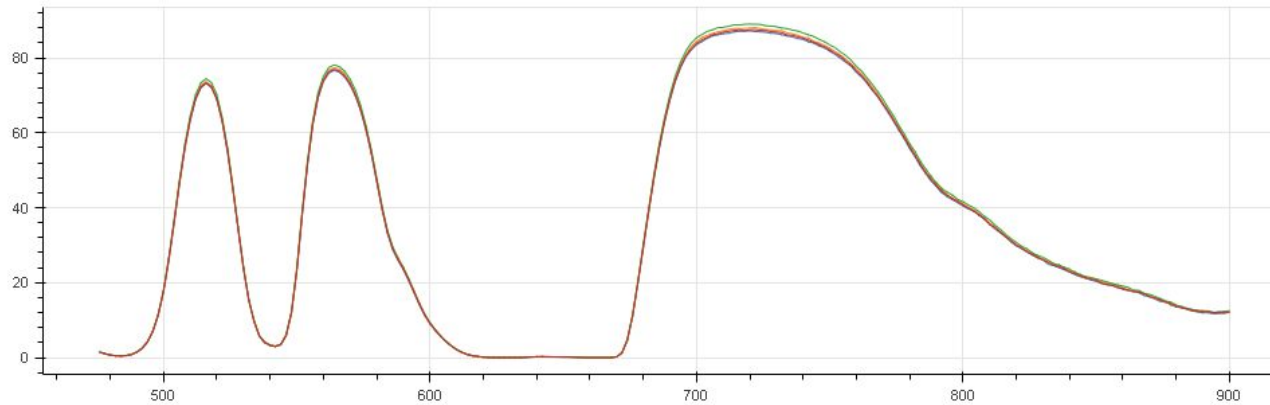


референс

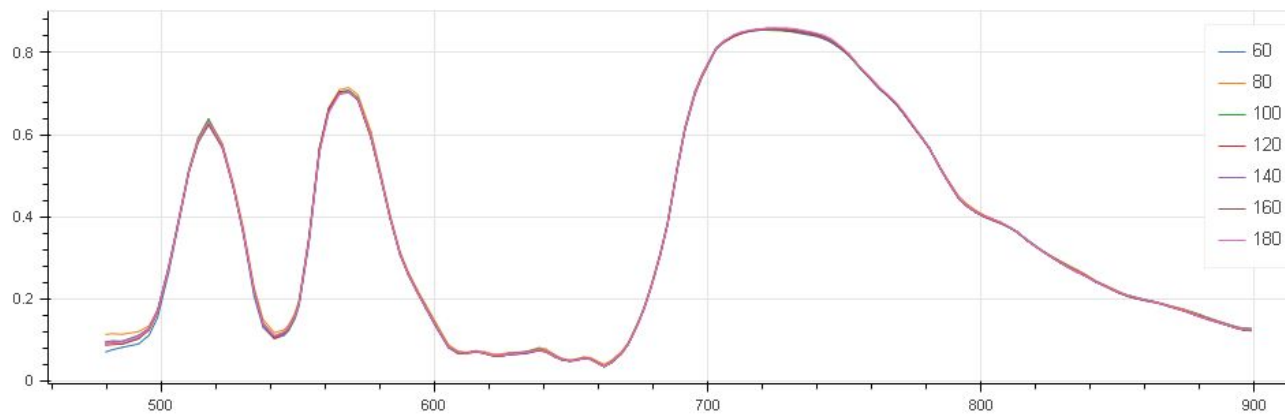


сырые  
данные

# ЗС-7

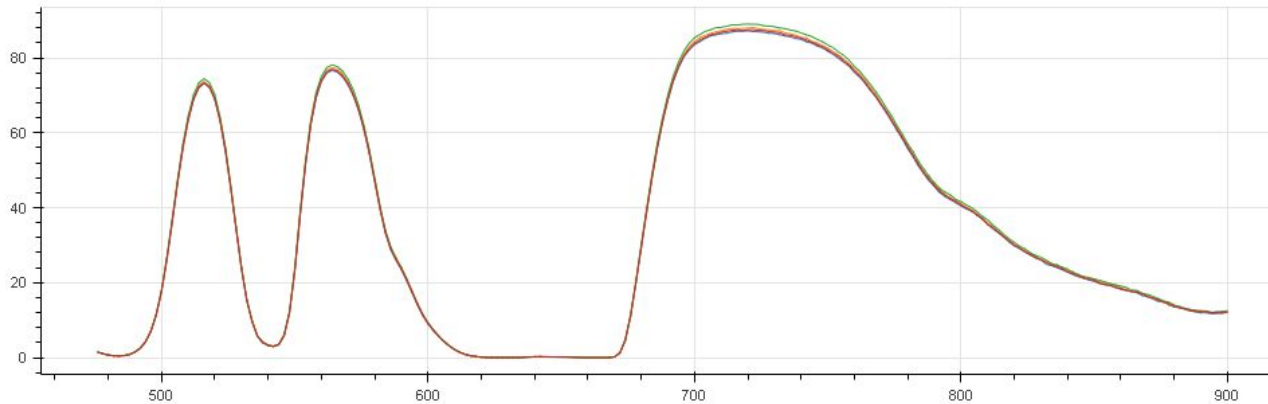


референс

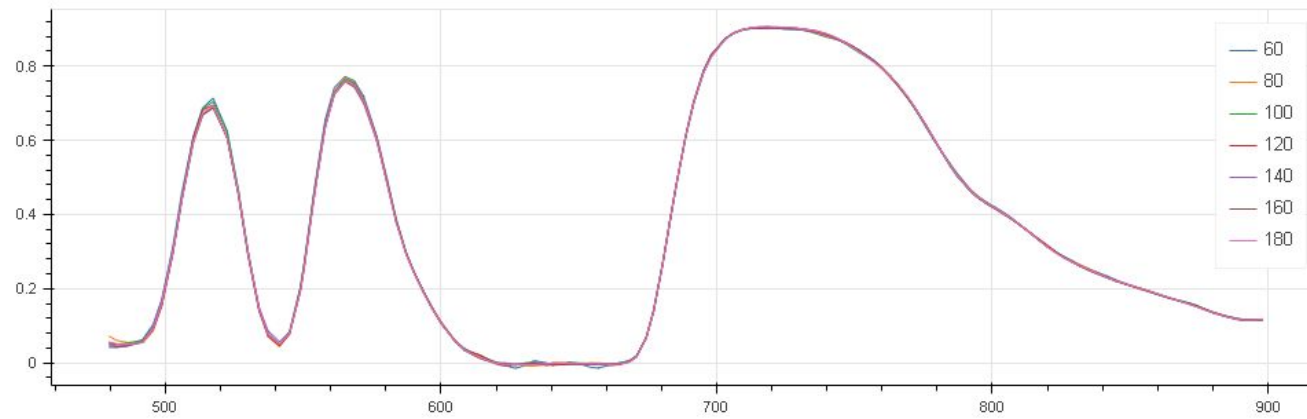


заводская  
калибровка

# 3С-7



референс



новая  
калибровка