

Following by Cao, 2016

Цель работы:

1. Реализовать алгоритмы спектральной и колориметрической реконструкции на основе применения взвешенных версий PCA, описанных в Cao et al. (2016).
2. Сравнить результаты реконструкций спектров на основании среднего RMSE. В случае колориметрической репродукции - на основании двух метрик цветового различия CIE L*a*b* 1976 и CIEDE 2000.

Теоретическое описание эксперимента

Пусть R - матрица $m \times n$, где m - число спектров поверхностного отражения в используемом наборе данных, а n - число длин волн, используемых для дискретизации (в нашем случае - 61). Взвешенная матрица данных может быть определена как:

$$R_w = RW,$$

где W - диагональная $n \times n$ матрица, на диагонали которой расположены значения весовой функции.

Применяя сингулярное разложение ко взвешенной матрице данных, получим:

$$R_w = U_w \Sigma_w V_w^T,$$

где индекс w обозначает применение разложения ко взвешенным, а не оригинальным данным.

Реконструкцию спектральных данных при использовании весовой функции и d главных компонент можно выразить как:

$$\hat{R} = (\tilde{V}_w^T C_w + \bar{R}_w) W^{-1},$$

где \tilde{V}_w - первые d столбцов унитарной матрицы V из сингулярного разложения (базисные векторы), C_w - столбец коэффициентов, \bar{R}_w - среднее значение спектра во взвешенном наборе данных.

В работе Cao et al. (2016) были описаны следующие варианты весовых функций:

$$WF_1 = (\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)) / \max(\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda))$$

$$WF_2 = (\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda) + 1) / \max(\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda) + 1)$$

$$WF_3 = (\sqrt{\bar{x}(\lambda)} + \sqrt{\bar{y}(\lambda)} + \sqrt{\bar{z}(\lambda)}) / \max(\sqrt{\bar{x}(\lambda)} + \sqrt{\bar{y}(\lambda)} + \sqrt{\bar{z}(\lambda)})$$

$$WF_4 = (\sqrt{\bar{x}(\lambda)} + \sqrt{\bar{y}(\lambda)} + \sqrt{\bar{z}(\lambda)}) \times D_{65} / \max((\sqrt{\bar{x}(\lambda)} + \sqrt{\bar{y}(\lambda)} + \sqrt{\bar{z}(\lambda)}) \times D_{65}),$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ - функции цветового захвата стандартного наблюдателя CIE 1931, D_{65} - относительное спектральное распределение мощности стандартного осветителя CIE D65.

Обзор данных

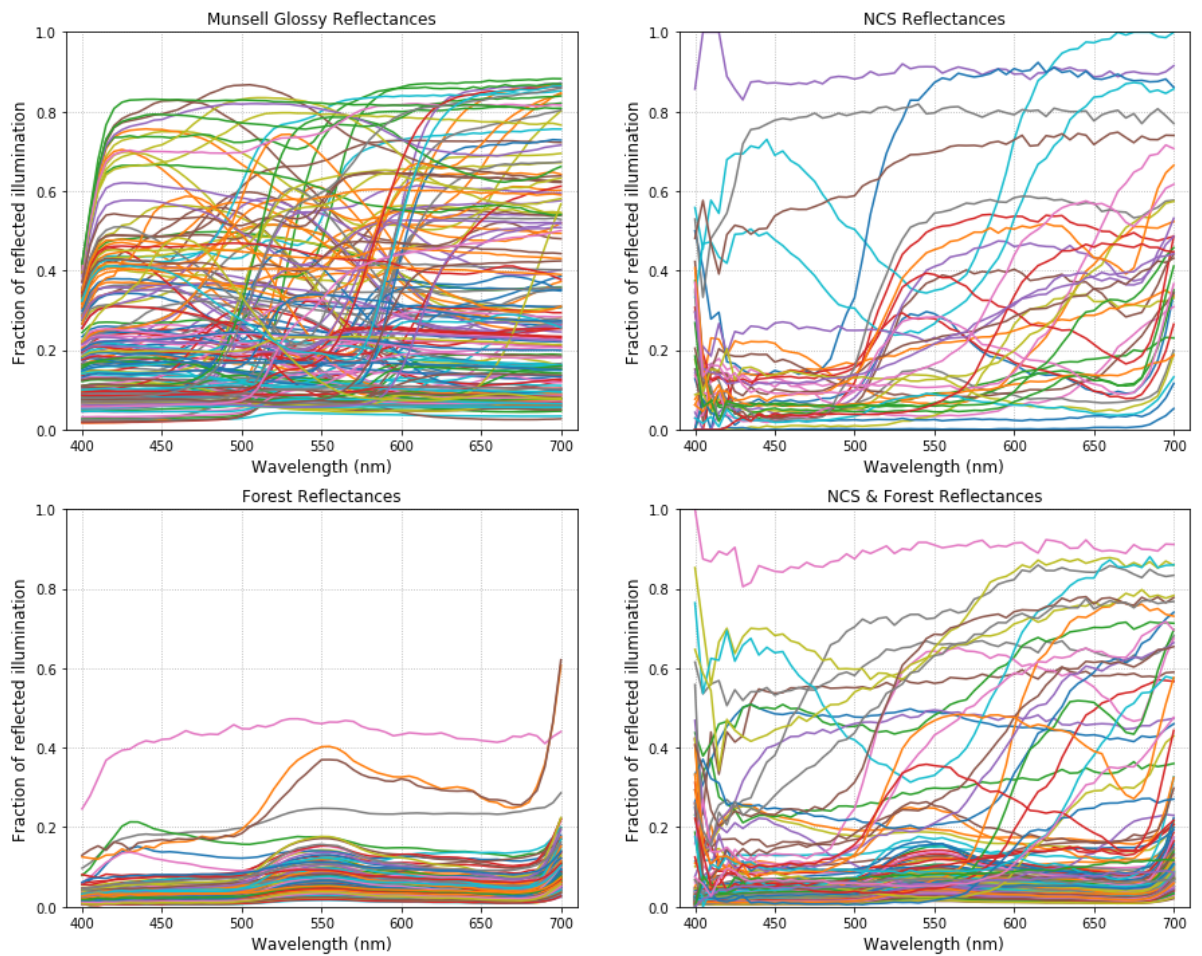
В качестве обучающих данных в работе используются 1600 спектров поверхностного отражения Munsell colors glossy, в качестве тестовых данных - небольшой набор из датасета NCS, включающий в себя 183 спектра природных объектов (листья, цветы и проч.). Также, в последней части используются данные 337 спектров окрасок листьев берёз, 370 спектров хвои сосен и 349 спектров, соответствующих окраскам хвои елей.

Два основных осветителя, используемые для колориметрической реконструкции, - стандартные осветители CIE D65 и A (соответственно - нормальное дневное освещение и нормальное комнатное освещение вольфрамовой нитью).

В качестве функций чувствительности используются функции цветового захвата для стандартного наблюдателя CIE 1931.

Все спектральные данные лежат в диапазоне длин волн от 400 нм до 700 нм с интервалом в 5 нм. Заметим, что в оригинальной работе Cao использовался несколько иной набор спектральных данных, и дискретизация составляла 10 нм.

Рис. 0. Спектры поверхностного отражения имеющихся наборов данных



Описание эксперимента

Последовательность действий:

1. Получение базисных векторов и аппроксимация

1.1. Формирование матрицы $m \times n$ спектральных данных R , где m - число спектров, n - дискретизация. В случае взвешенных алгоритмов - происходит домножение матрицы данных слева на матрицу весов (см. теоретическое описание).

1.2. Вычисление среднего значения спектров (столбцов) для каждой взвешенной матрицы данных и центрирование данных.

1.3. Обучение PCA на наборе Munsell Glossy (Для взвешенных версий - к соответствующим взвешенным наборам) при фиксированном числе используемых главных компонент.

1.4. Применение обученного алгоритма для всех соответствующих наборов спектров, прибавление среднего. В взвешенных версиях - домножение справа на обратную матрицу весов (см. теоретическое описание).

2. Расчёт ошибки спектральной реконструкции. Рассчитывается RMSE для каждого спектра из тестового набора с соответствующим спектром из набора аппроксимаций. Затем значения ошибок для всех спектров усредняются. Построение графиков.

3. Расчёт ошибки колориметрической реконструкции.

3.1. Расчёт значений XYZ для всех оригинальных и аппроксимированных спектров в соответствии с функциями чувствительности стандартного наблюдателя CIE 1931. В качестве источника освещения рассматриваются два варианта - стандартные осветители CIE D65 и A.

3.2. Конвертация значений XYZ в значения CIE Lab с помощью реализованного метода `convert_color` python-библиотеки `colormath`. (Согласно документации, конвертация производится с явным заданием нужного источника освещения, следовательно в двух вариантах устанавливаются значения `illuminant='d65'` или `'a'` соответственно, как при инициализации переменных XYZ, так и при их переводе в CIE Lab (установка `target_illuminant`)).

3.3. Расчёт колориметрических ошибок CIE 1976 и CIEDE 2000 для каждой пары оригинальные координаты CIE Lab - аппроксимированные значения CIE Lab методами библиотеки `colormath`. Усреднение по всем вектор-стимулам аналогично пункту 2. Построение графиков.

Полную версию реализованных алгоритмов и визуализации результатов можно найти [здесь](https://github.com/Slava1688/iitp-color/blob/main/Autumn/Following%20by%20Cao.ipynb) (<https://github.com/Slava1688/iitp-color/blob/main/Autumn/Following%20by%20Cao.ipynb>).

Рис. 1. Кривые весовых функций

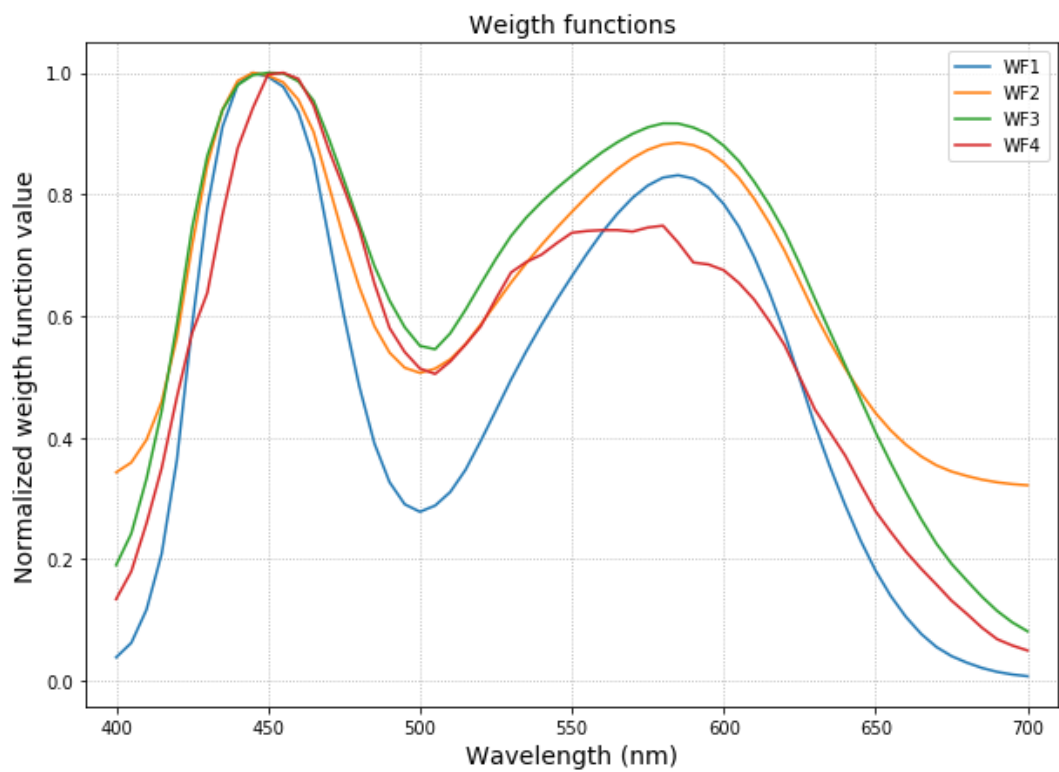


Рис. 2. Относительное спектральное распределение мощности стандартных осветителей CIE D65 и CIE A

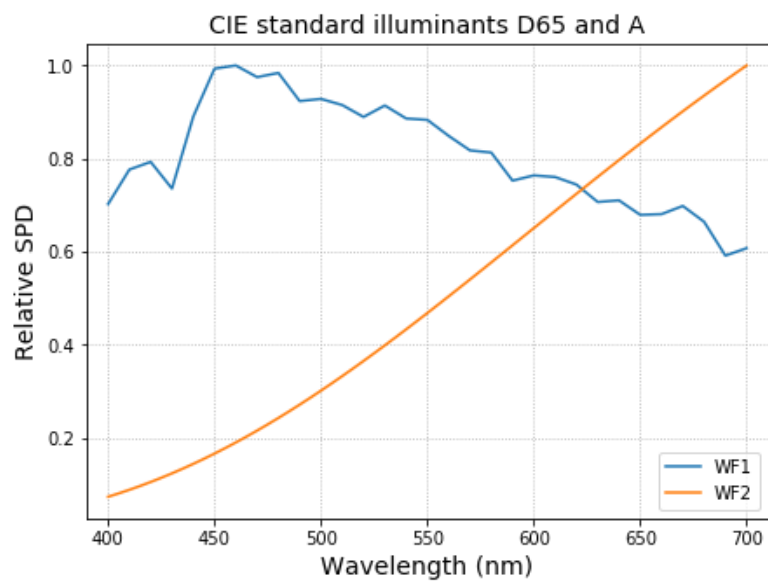
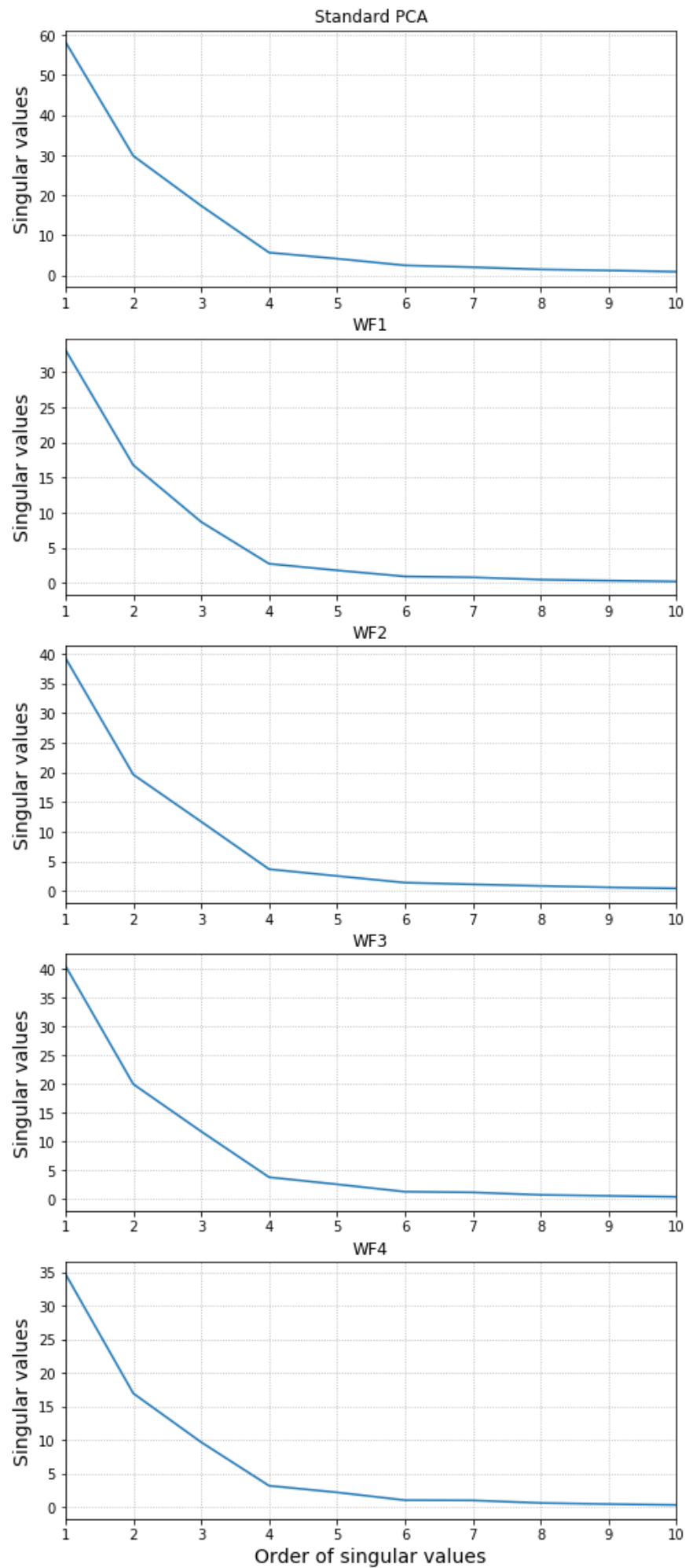


Рис. 3. Обзор сингулярных значений матрицы данных спектров Munsell Glossy после применения различных видов PCA



Можно видеть, что характер спада сингулярных значений от первого до четвертого сохраняется постоянным, независимо от использования весовой функции. Единственно, что меняется - величина самих значений, причём для оригинального PCA эти значения наибольшие.

Спектральная реконструкция

Рассмотрим несколько примеров спектральной реконструкции.

```
In [39]: 1 plot_approximation(4, 1500, approximations_munsell, 'munsell')
```

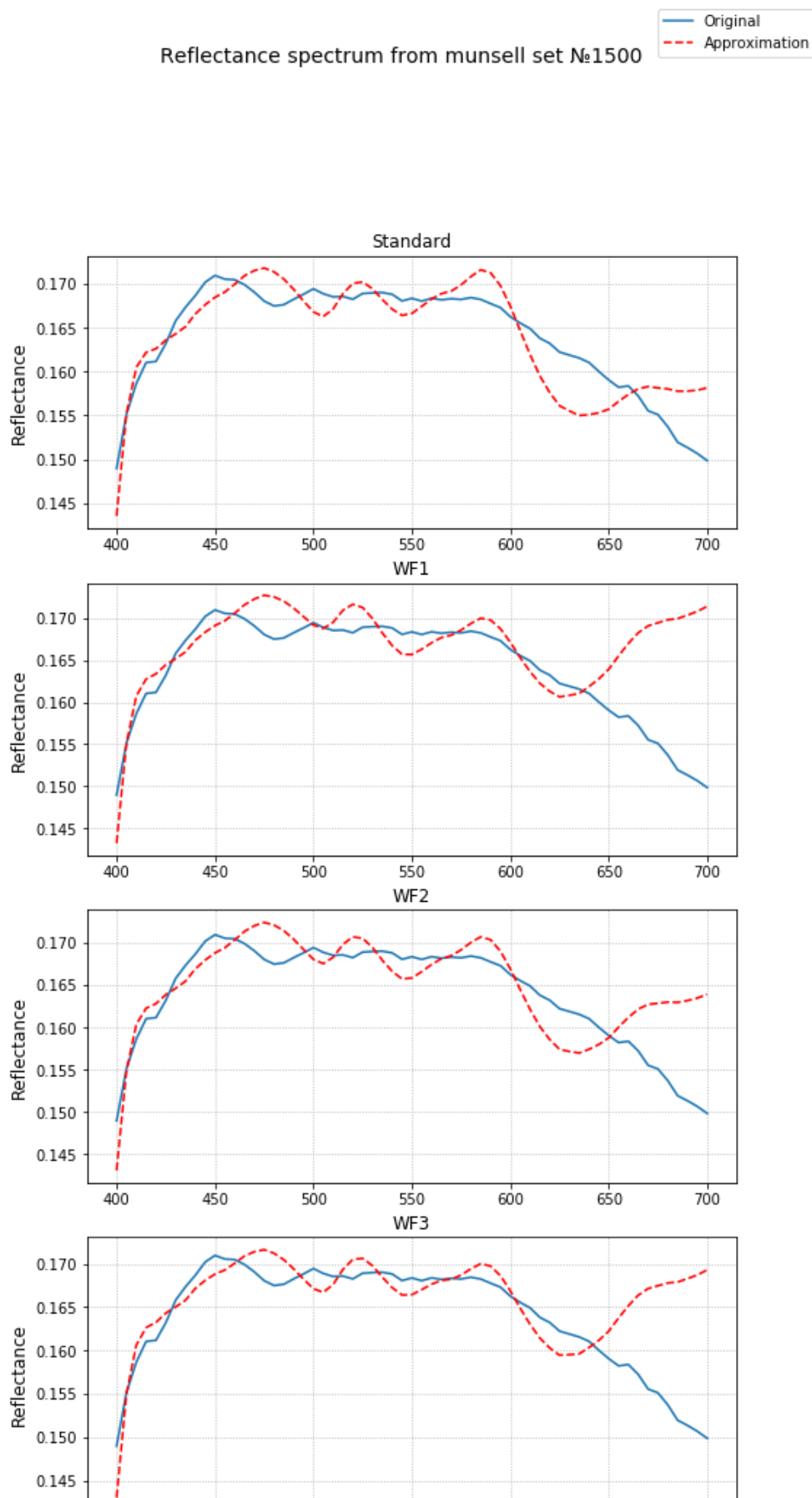
Standard PCA, RMSE: 0.0033

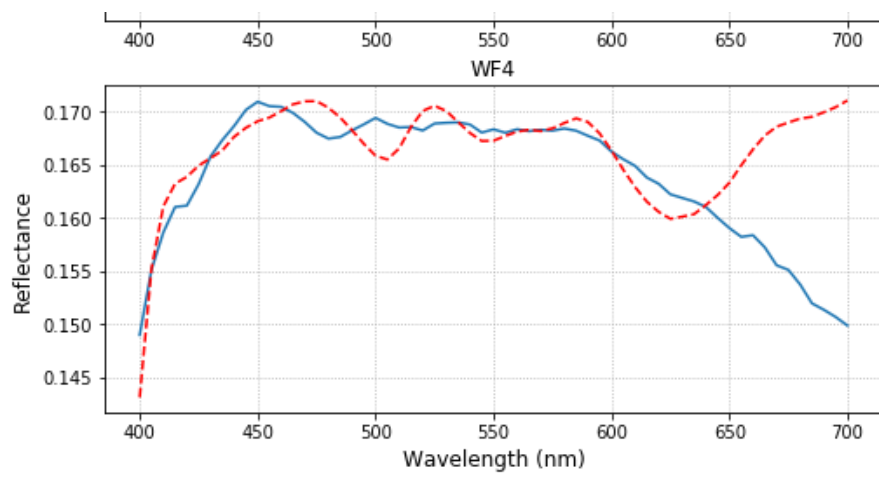
WF1 PCA, RMSE: 0.00665

WF2 PCA, RMSE: 0.00438

WF3 PCA, RMSE: 0.00584

WF4 PCA, RMSE: 0.00642






```
In [40]: 1 plot_approximation(4, 0, approximations_natural, 'natural')
```

Standard PCA, RMSE: 0.0694

WF1 PCA, RMSE: 0.07383

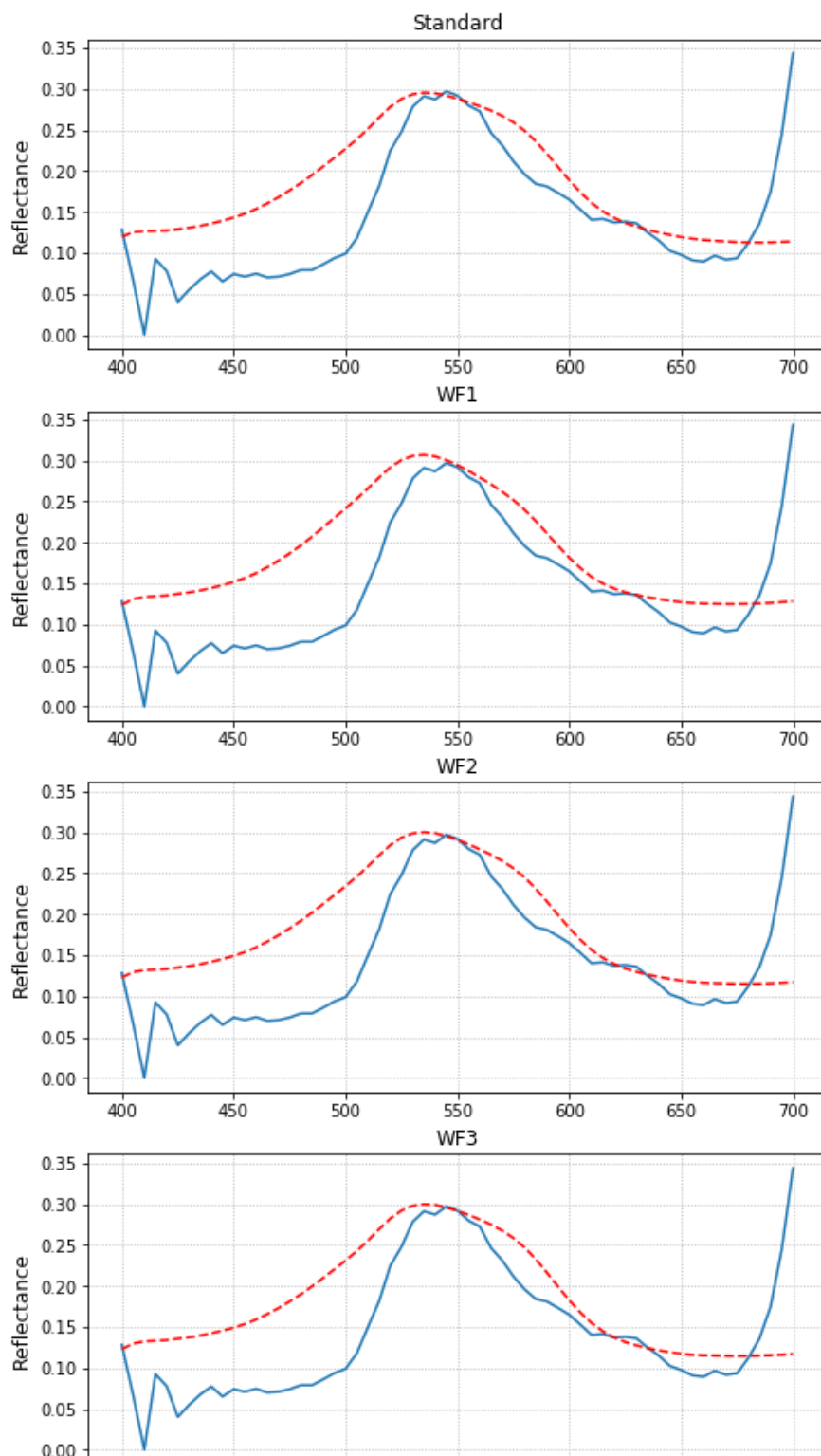
WF2 PCA, RMSE: 0.07217

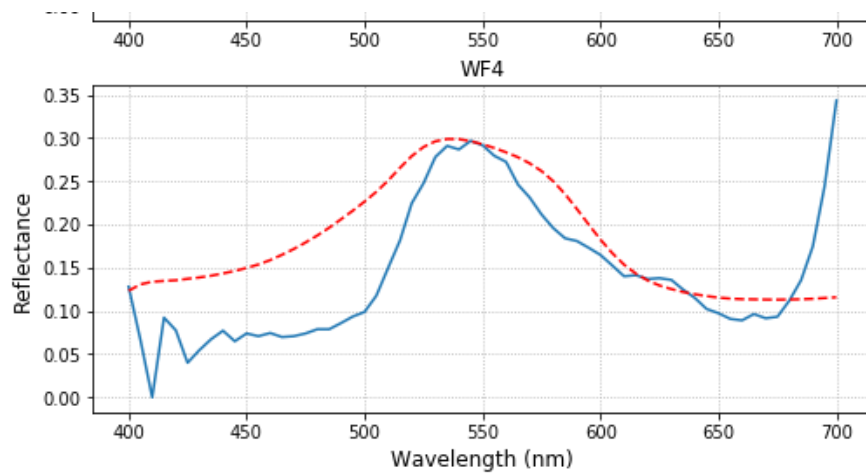
WF3 PCA, RMSE: 0.07152

WF4 PCA, RMSE: 0.07105

Reflectance spectrum from natural set №0

— Original
- - - Approximation





Усреднение по набору спектров используется для центрирования матрицы данных перед использованием PCA. В данном случае и ниже рассматриваются две ситуации, когда аппроксимация спектров из тестового набора происходит с помощью центрирования по собственному, тестовому среднему спектру, и когда используется предрасчитанный на обучающей выборке средний спектр.

Ниже представлена аппроксимация спектра из малого набора природных объектов с использованием предрасчитанного среднего спектра из набора Munsell Glossy.

```
In [41]: 1 plot_approximation(4, 0, approximations_natural_precalc, 'natural')
```

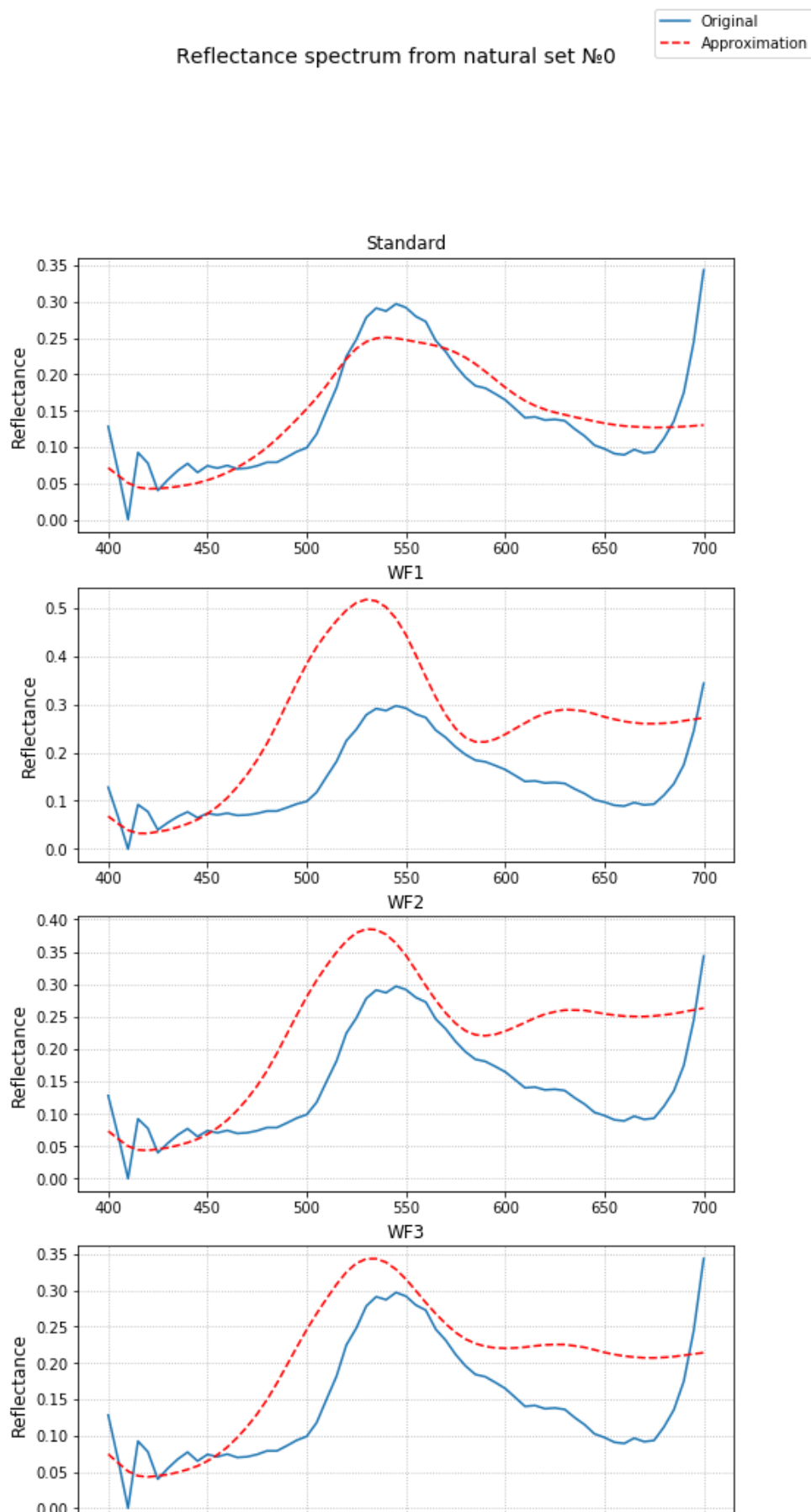
Standard PCA, RMSE: 0.04255

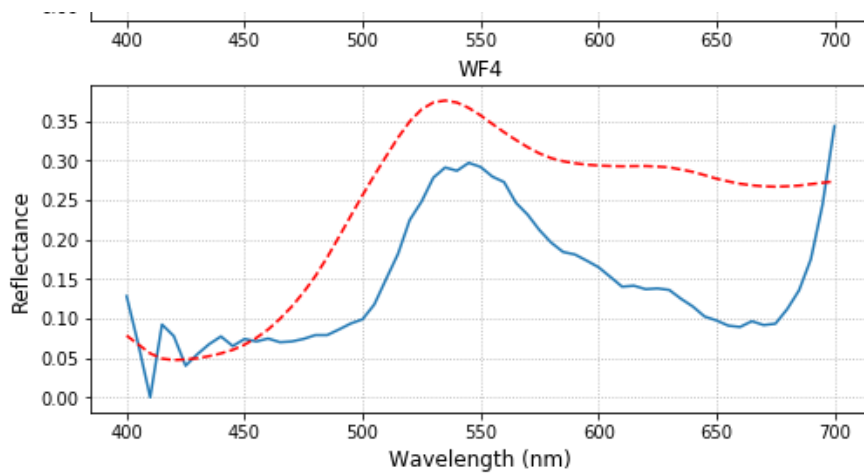
WF1 PCA, RMSE: 0.14927

WF2 PCA, RMSE: 0.10187

WF3 PCA, RMSE: 0.07785

WF4 PCA, RMSE: 0.11412





Исследование ошибок спектральной реконструкции

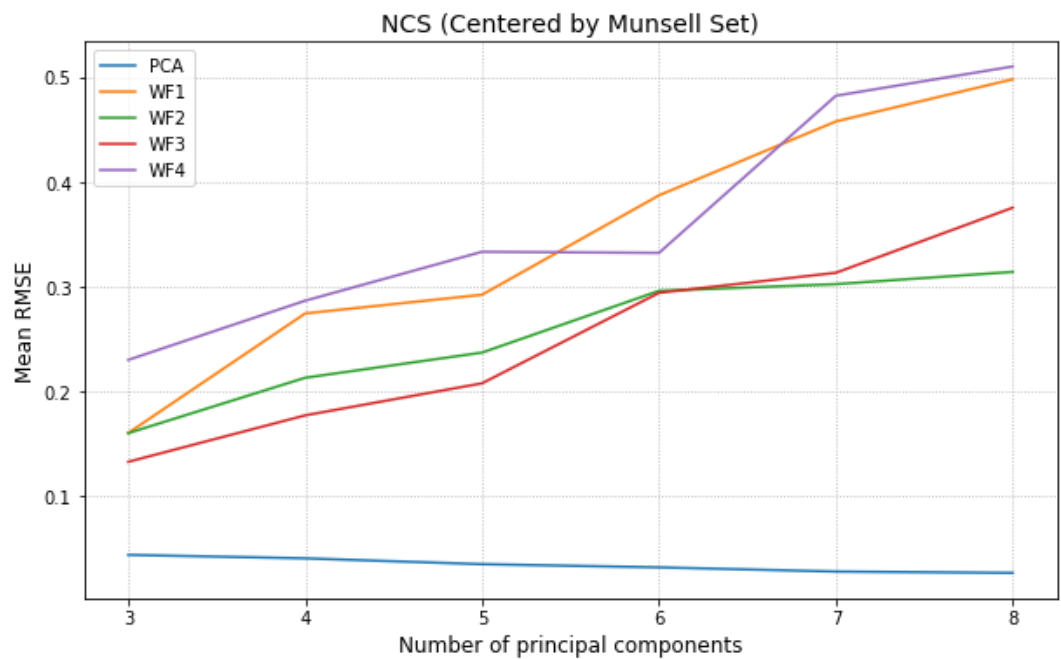
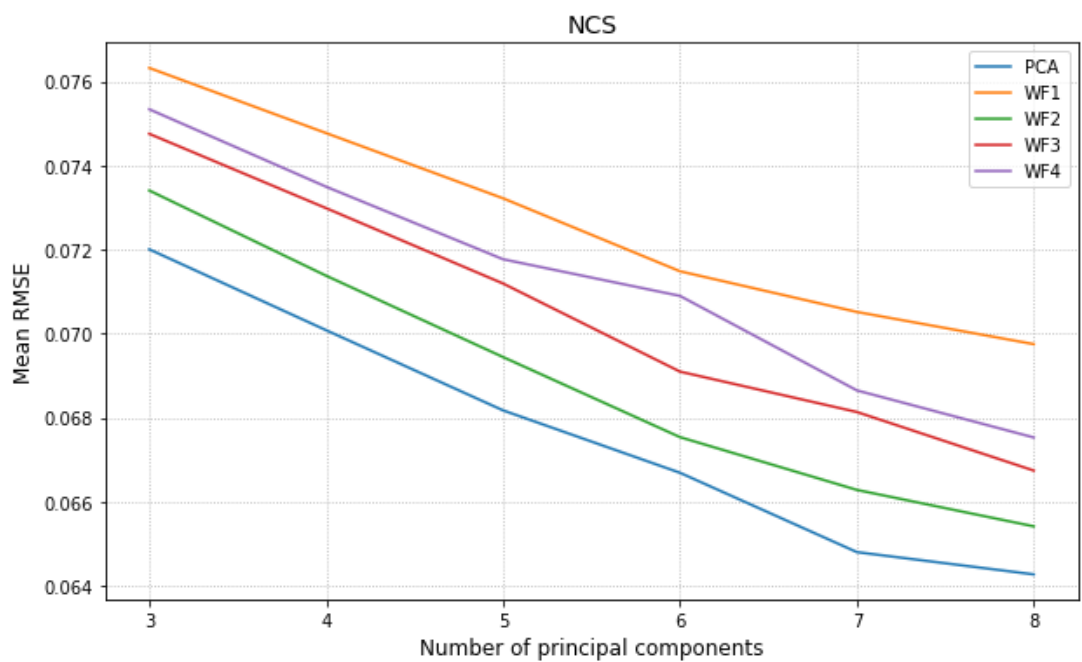
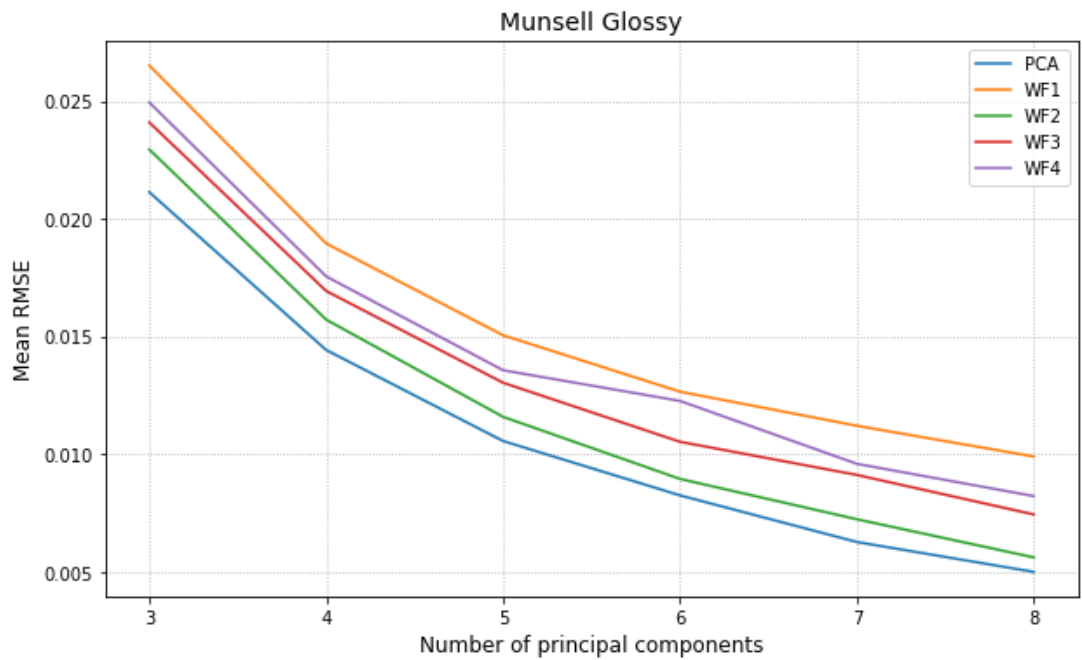
Таблица 1. Ошибки спектральной реконструкции спектров при разном числе главных компонент, полученных из набора Munsell Glossy

In [45]: 1 all_errors

Out[45]:

| | RMSE Munsell | | | | | RMSE NCS | | | | | PC |
|---|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | |
| 3 | 0.021134 | 0.026510 | 0.022945 | 0.024092 | 0.024941 | 0.072012 | 0.076329 | 0.073412 | 0.074761 | 0.075345 | 0.0441 |
| 4 | 0.014436 | 0.018955 | 0.015725 | 0.016939 | 0.017557 | 0.070087 | 0.074778 | 0.071383 | 0.072991 | 0.073501 | 0.0408 |
| 5 | 0.010574 | 0.015060 | 0.011600 | 0.013047 | 0.013577 | 0.068179 | 0.073226 | 0.069448 | 0.071198 | 0.071776 | 0.0352 |
| 6 | 0.008268 | 0.012668 | 0.008966 | 0.010542 | 0.012275 | 0.066694 | 0.071490 | 0.067543 | 0.069102 | 0.070904 | 0.0322 |
| 7 | 0.006289 | 0.011220 | 0.007254 | 0.009135 | 0.009606 | 0.064806 | 0.070522 | 0.066287 | 0.068140 | 0.068655 | 0.0282 |
| 8 | 0.005022 | 0.009916 | 0.005636 | 0.007457 | 0.008237 | 0.064276 | 0.069756 | 0.065419 | 0.066747 | 0.067534 | 0.0269 |

Рис. 4. Зависимость величины ошибки спектральной реконструкции от числа главных компонент



Хорошо видно, что стандартный PCA обладает самой высокой точностью спектрального восстановления. Как и следовало ожидать, реконструкция природных спектров на основе главных компонент, полученных из набора Munsell, показывает более худшие результаты.

Что касается аппроксимации природных спектров с использованием предрасчитанного среднего по набору Munsell, то здесь стандартный PCA демонстрирует более лучшие результаты, чем с использованием среднего по самому набору природных спектров, в то время как все остальные методы показывают неадекватные результаты.

Отметим, что первые два графика практически полностью совпадают с аналогичными результатами Cao. Это позволяет удостовериться в непротиворечивости используемых здесь методов и методов, предложенных в статье.

Исследование ошибок колориметрической реконструкции

Рассмотрим ошибку колориметрической реконструкции вектор-стимулов с точки зрения формулы цветовой разности CIE 1976.

Таблица 2. Ошибки ΔE CIE 1976 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора Munsell Glossy и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент

In [65]:

| | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1 | munsell_delta_E | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Out[65]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 76 (A) | | | | |
|---|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 48.776540 | 37.623003 | 39.065721 | 30.915317 | 21.752613 | 31.349908 | 20.379730 | 17.357226 | 9.495627 | 10.878540 |
| 4 | 21.144426 | 13.810725 | 6.691742 | 4.066266 | 3.106071 | 24.155650 | 17.458273 | 11.560459 | 7.689243 | 5.594527 |
| 5 | 11.276947 | 8.909948 | 6.145395 | 3.879308 | 2.912693 | 11.357834 | 9.787405 | 6.280684 | 3.839130 | 3.647724 |
| 6 | 10.775981 | 7.011560 | 5.341936 | 3.788762 | 1.313345 | 9.273009 | 5.992276 | 4.704038 | 2.939120 | 2.412941 |
| 7 | 3.337176 | 4.038655 | 1.856463 | 0.606806 | 1.274771 | 2.513351 | 5.482523 | 2.438602 | 0.734632 | 1.539444 |
| 8 | 2.585254 | 3.204024 | 0.698303 | 0.522604 | 0.879999 | 2.091139 | 4.167071 | 1.182442 | 0.650057 | 1.117407 |

Таблица 3. Ошибки ΔE CIE 1976 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора NCS и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент

In [66]:

| | | | | | | | | | | |
|---|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1 | NCS_delta_E | | | | | | | | | |
|---|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Out[66]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 76 (A) | | | | |
|---|------------------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 205.743696 | 201.739025 | 199.104657 | 199.474175 | 198.261287 | 226.210838 | 217.958818 | 216.324507 | 217.047314 | 216.947314 |
| 4 | 202.337215 | 197.621455 | 196.003388 | 196.698163 | 196.626465 | 223.008540 | 218.236471 | 215.809042 | 217.045344 | 216.945344 |
| 5 | 200.691628 | 196.961088 | 196.163667 | 196.799388 | 196.692906 | 218.310663 | 218.117596 | 216.051628 | 217.277944 | 216.947944 |
| 6 | 200.628923 | 195.955384 | 196.536968 | 196.504449 | 197.067539 | 219.218677 | 217.364060 | 215.930236 | 216.700930 | 216.700930 |
| 7 | 198.304238 | 197.535586 | 196.755398 | 197.205274 | 197.058144 | 217.989427 | 217.855084 | 215.956707 | 216.953657 | 216.953657 |
| 8 | 198.029164 | 198.101379 | 197.189369 | 197.351627 | 197.424671 | 217.633631 | 218.531336 | 216.566987 | 216.947157 | 216.947157 |

Таблица 4. Ошибки ΔE CIE 1976 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора NCS и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент

In [67]: 1 NCS_precalc_delta_E

Out[67]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | | | | | Mean ΔE |
|---|----------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|---------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | |
| 3 | 115.994692 | 207.767380 | 259.235376 | 214.588592 | 305.010256 | 97.053565 | 202.431612 | 245.640463 | 202.503454 | |
| 4 | 89.334382 | 248.246489 | 162.077248 | 145.739838 | 280.692646 | 87.450769 | 219.484204 | 209.978240 | 197.894399 | |
| 5 | 63.069168 | 260.755636 | 164.221803 | 149.257204 | 278.287048 | 59.346072 | 254.109027 | 210.255517 | 205.538013 | |
| 6 | 56.204556 | 259.147259 | 143.902756 | 154.362364 | 274.468452 | 40.940234 | 282.460190 | 176.602585 | 218.248316 | |
| 7 | 13.500177 | 286.031437 | 155.489691 | 147.987252 | 276.174135 | 13.158314 | 278.152530 | 174.701404 | 214.498044 | |
| 8 | 10.612311 | 307.455674 | 151.958885 | 145.593746 | 278.448161 | 11.333710 | 308.341824 | 164.937715 | 217.905555 | |

Теперь рассмотрим ошибку колориметрической реконструкции с точки зрения метрики CIEDE 2000.

Таблица 5. Ошибки ΔE CIEDE 2000 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора Munsell Glossy и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент

In [68]: 1 munsell_delta_E_2000

Out[68]:

| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | | | | |
|---|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 7.925807 | 6.218281 | 6.776830 | 5.214478 | 3.555133 | 4.959469 | 2.645616 | 2.808463 | 1.264655 | 1.684607 |
| 4 | 2.912662 | 1.730049 | 0.901608 | 0.493561 | 0.427609 | 3.395873 | 2.149358 | 1.507626 | 0.910472 | 0.748922 |
| 5 | 1.630954 | 1.331513 | 0.858370 | 0.494229 | 0.412665 | 1.620014 | 1.503465 | 0.983940 | 0.509039 | 0.537501 |
| 6 | 1.571617 | 1.122874 | 0.687707 | 0.478940 | 0.184952 | 1.299208 | 1.110904 | 0.678121 | 0.386963 | 0.353045 |
| 7 | 0.445351 | 0.681053 | 0.348010 | 0.106393 | 0.180067 | 0.392006 | 0.994082 | 0.475401 | 0.135023 | 0.264298 |
| 8 | 0.348312 | 0.608873 | 0.096395 | 0.094067 | 0.150449 | 0.322860 | 0.828396 | 0.172619 | 0.109978 | 0.207700 |

Таблица 6. Ошибки ΔE CIEDE 2000 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора NCS и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент

In [69]: 1 NCS_delta_E_2000

Out[69]:

| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | | | | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 27.924891 | 28.202428 | 27.446391 | 27.875106 | 27.700026 | 30.993940 | 31.208850 | 30.388122 | 30.992131 | 30.68531 |
| 4 | 27.603466 | 27.338412 | 26.857130 | 27.189690 | 27.212340 | 30.711803 | 31.118030 | 30.091612 | 30.946557 | 31.04568 |
| 5 | 28.046494 | 27.122355 | 26.972928 | 27.215333 | 27.196286 | 30.933081 | 31.183526 | 30.399951 | 31.062225 | 31.11960 |
| 6 | 28.275266 | 27.145280 | 27.085013 | 27.192632 | 27.276211 | 31.696988 | 31.326483 | 30.519399 | 30.991145 | 31.25624 |
| 7 | 27.841940 | 27.419717 | 27.084161 | 27.288121 | 27.275860 | 31.465473 | 31.464560 | 30.620989 | 31.144631 | 31.17584 |
| 8 | 27.584824 | 27.492190 | 27.311347 | 27.324396 | 27.339970 | 31.263087 | 31.543101 | 30.997534 | 31.124301 | 31.18372 |

Таблица 7. Ошибки ΔE CIEDE 2000 колориметрической реконструкции с использованием спектров из набора NCS и двух стандартных источников освещения при различном числе главных компонент, полученных путём центрирования данных по набору спектров Munsell

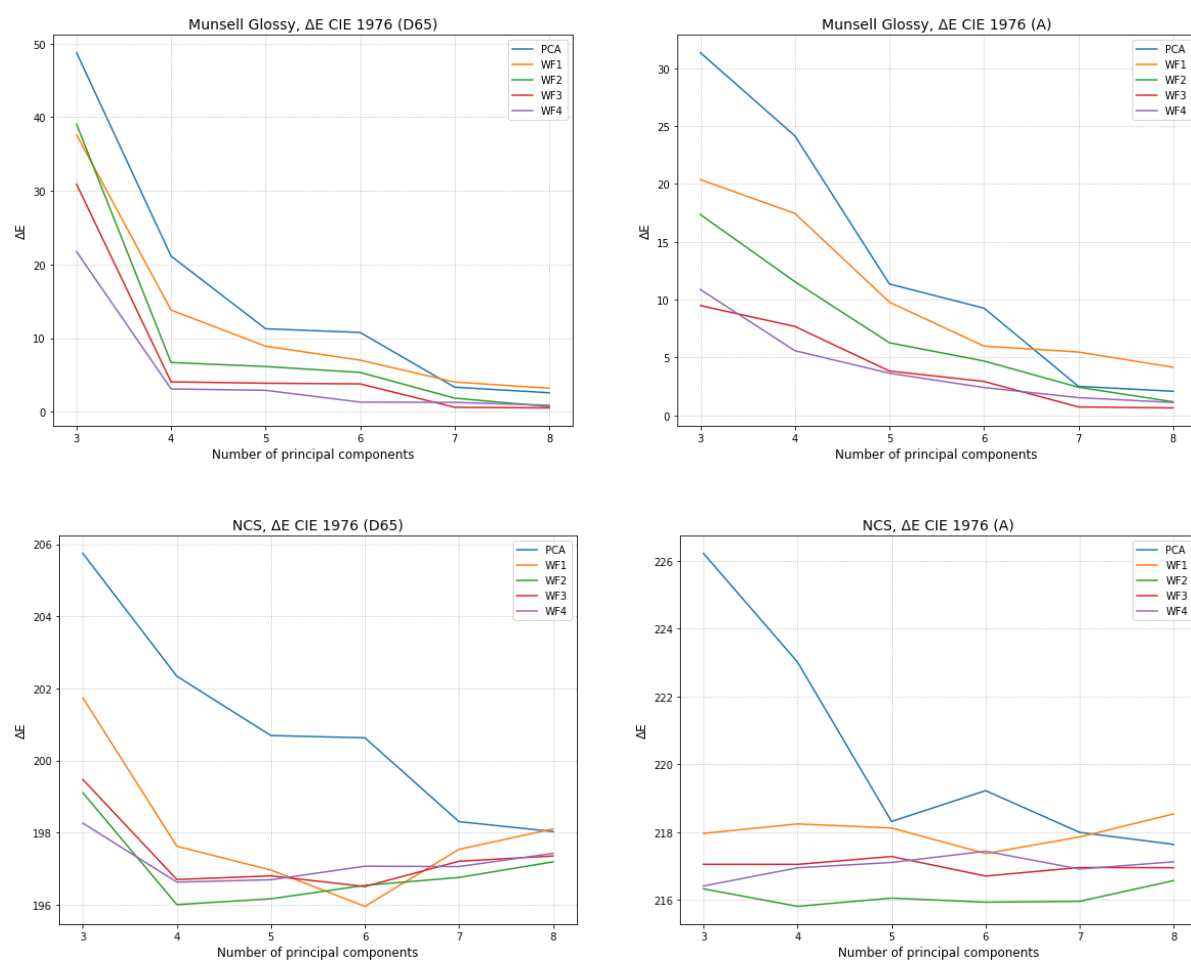
Glossy

In [70]: 1 NCS_precalc_delta_E_2000

Out[70]:

| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | | | | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 9.063578 | 17.463604 | 29.251831 | 26.731469 | 32.212348 | 9.512466 | 15.850357 | 27.506772 | 24.491189 | 31.348114 |
| 4 | 8.708562 | 21.588995 | 13.223255 | 14.000492 | 26.106014 | 9.534631 | 16.475202 | 21.862345 | 23.034062 | 32.840727 |
| 5 | 5.748382 | 20.970423 | 13.016822 | 14.318557 | 26.286279 | 5.244597 | 18.136707 | 19.542958 | 22.332234 | 33.025640 |
| 6 | 5.734914 | 18.589660 | 11.464475 | 15.253097 | 25.286897 | 4.773428 | 23.021806 | 17.302270 | 24.729998 | 32.119576 |
| 7 | 2.176629 | 23.356098 | 13.222272 | 12.758238 | 25.546187 | 2.112674 | 21.246901 | 15.342296 | 22.886126 | 34.165870 |
| 8 | 1.677332 | 24.280456 | 13.262340 | 12.524340 | 25.372259 | 1.699141 | 21.991334 | 14.374947 | 23.124608 | 34.191014 |

Рис. 5. Зависимость ошибок CIE 1976 колориметрической реконструкции от числа главных компонент



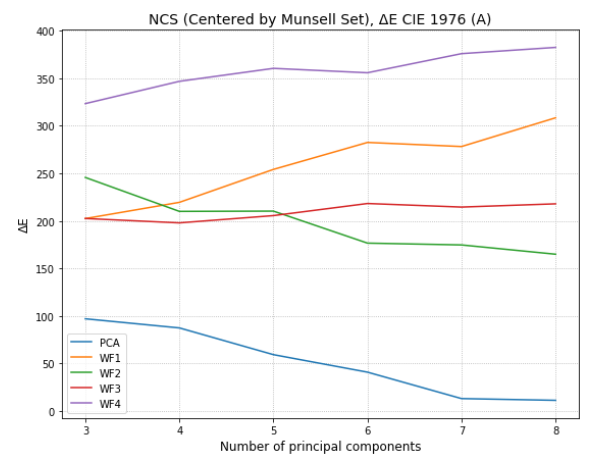
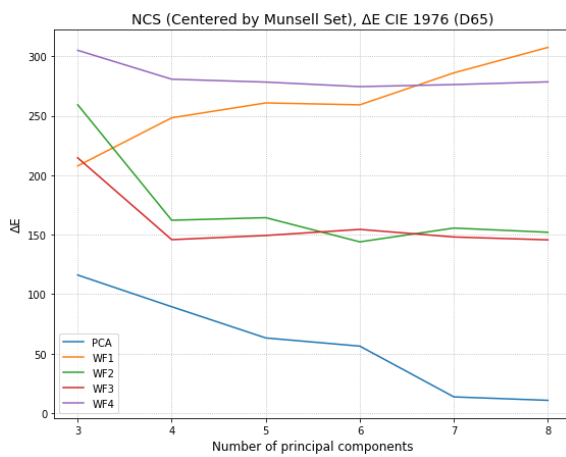
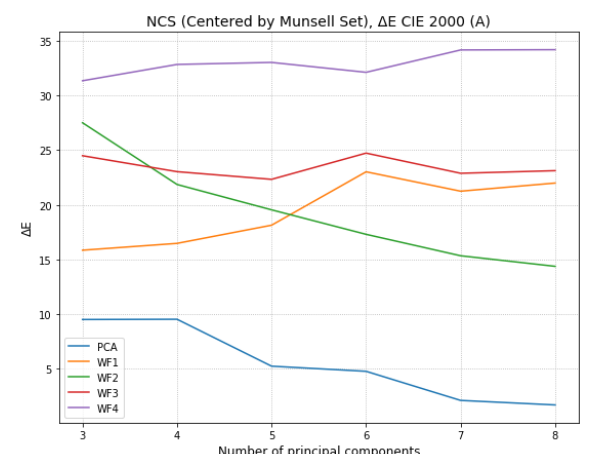
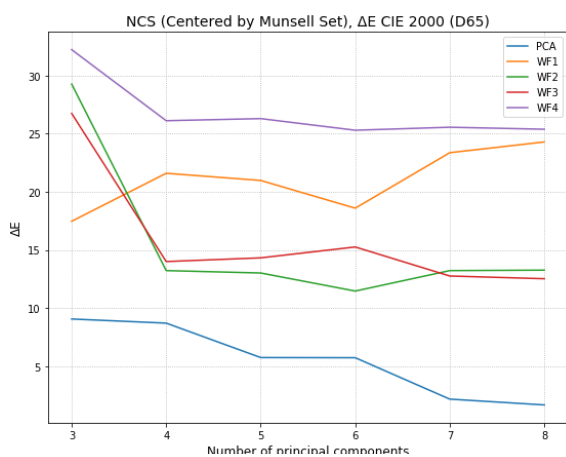
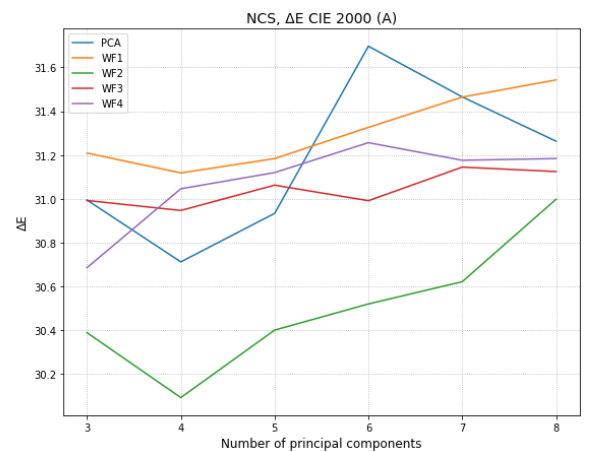
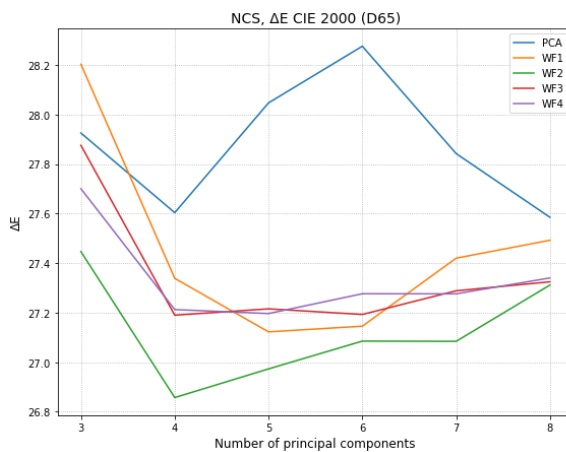
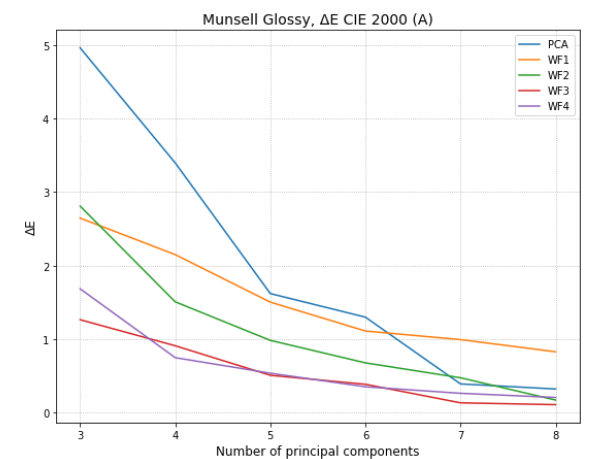
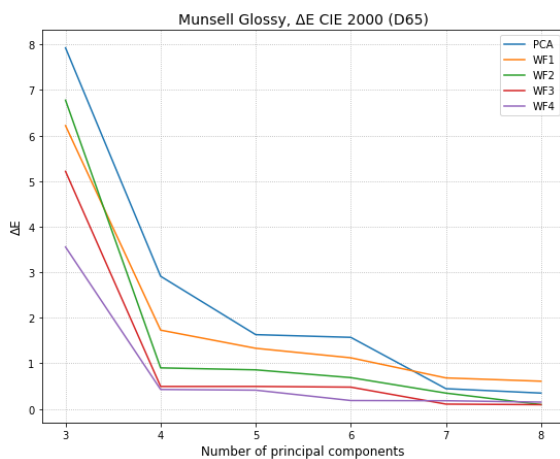


Рис. 6. Зависимость ошибок CIEDE 2000 колориметрической реконструкции от числа главных компонент



Результаты колориметрической реконструкции для природных спектров не подтверждают результатов статьи. Только для спектров из набора Munsell Glossy можно заметить схожую зависимость с той, что описана в статье, однако сами величины ошибок в данном эксперименте на порядок выше для CIE 1976 и примерно в два раза больше для CIEDE 2000.

Так как тестовый набор данных в данном эксперименте достаточно однообразен и мал, попробуем рассмотреть случай спектральной и колориметрической реконструкции для большего корпуса спектров.

Попытка улучшить результаты восстановления тестовых спектров путём увеличения объёма данных

Тестовый набор 183 спектров NCS был дополнен 337 спектрами окрасок листьев берёз, 370 спектрами окрасок хвои сосен и 349 спектрами, соответствующих окраскам хвои елей.

Спектральная реконструкция

Таблица 7. Ошибки спектральной реконструкции расширенной базы тестовых спектров при разном числе главных компонент, полученных из набора Munsell Glossy

In [81]: 1 forest_errors

Out[81]:

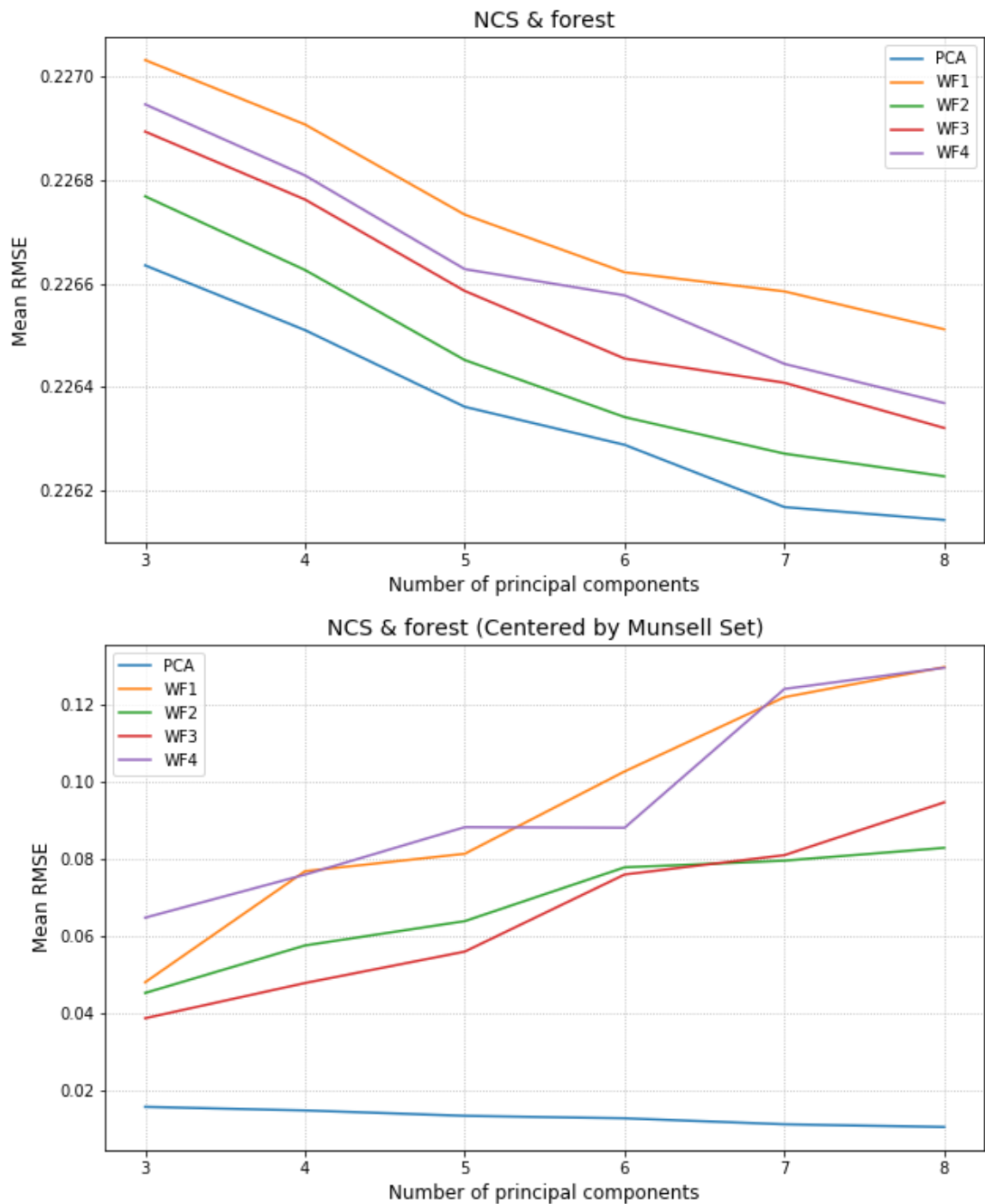
| | RMSE NCS & forest | | | | | RMSE NCS & forest (Centered by Munsell Set) | | | | |
|---|-------------------|----------|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 0.226635 | 0.227032 | 0.226769 | 0.226894 | 0.226947 | 0.015655 | 0.047969 | 0.045194 | 0.038639 | 0.064721 |
| 4 | 0.226510 | 0.226908 | 0.226626 | 0.226763 | 0.226809 | 0.014724 | 0.076775 | 0.057519 | 0.047771 | 0.075896 |
| 5 | 0.226362 | 0.226733 | 0.226452 | 0.226586 | 0.226628 | 0.013330 | 0.081309 | 0.063829 | 0.055928 | 0.088209 |
| 6 | 0.226288 | 0.226622 | 0.226342 | 0.226455 | 0.226577 | 0.012689 | 0.102664 | 0.077783 | 0.075928 | 0.088052 |
| 7 | 0.226168 | 0.226585 | 0.226271 | 0.226408 | 0.226445 | 0.011129 | 0.121930 | 0.079519 | 0.080948 | 0.124061 |
| 8 | 0.226143 | 0.226512 | 0.226227 | 0.226321 | 0.226369 | 0.010439 | 0.129726 | 0.082840 | 0.094644 | 0.129558 |

In [82]: 1 all_errors # Ниже продублирована таблица 2 для удобства сравнения.

Out[82]:

| | RMSE Munsell | | | | | RMSE NCS | | | | | |
|---|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PC |
| 3 | 0.021134 | 0.026510 | 0.022945 | 0.024092 | 0.024941 | 0.072012 | 0.076329 | 0.073412 | 0.074761 | 0.075345 | 0.0441 |
| 4 | 0.014436 | 0.018955 | 0.015725 | 0.016939 | 0.017557 | 0.070087 | 0.074778 | 0.071383 | 0.072991 | 0.073501 | 0.0408 |
| 5 | 0.010574 | 0.015060 | 0.011600 | 0.013047 | 0.013577 | 0.068179 | 0.073226 | 0.069448 | 0.071198 | 0.071776 | 0.0352 |
| 6 | 0.008268 | 0.012668 | 0.008966 | 0.010542 | 0.012275 | 0.066694 | 0.071490 | 0.067543 | 0.069102 | 0.070904 | 0.0322 |
| 7 | 0.006289 | 0.011220 | 0.007254 | 0.009135 | 0.009606 | 0.064806 | 0.070522 | 0.066287 | 0.068140 | 0.068655 | 0.0282 |
| 8 | 0.005022 | 0.009916 | 0.005636 | 0.007457 | 0.008237 | 0.064276 | 0.069756 | 0.065419 | 0.066747 | 0.067534 | 0.0269 |

Рис. 7. Зависимость величины ошибки спектральной реконструкции от числа главных компонент для расширенного тестового набора



Как видим, расширение спектральной тестовой выборки оказало отрицательное влияние на случай, когда не используется центрирование по обучающей выборке. Учитывая малые отклонения ошибок, увеличение числа главных компонент практически не улучшает спектральную реконструкцию в этом случае.

В то же время, это позволило более чем в два раза улучшить спектральную реконструкцию при использовании стандартного PCA для случая использования центрирования по обучающей выборке. Прочие версии PCA, хоть как и ранее не улучшают реконструкцию при увеличении числа компонент и проигрывают стандартному методу, также повысили точность на порядок.

Колриметрическая реконструкция

In [94]: 1 NCS_forest_delta_E

Out[94]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | | | | Mean |
|---|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 |
| 3 | 439.472620 | 440.937125 | 439.864968 | 440.398915 | 440.622127 | 441.965083 | 443.300131 | 442.220153 | 442.771151 |
| 4 | 440.541353 | 441.063274 | 440.579190 | 440.812179 | 440.874985 | 442.466908 | 443.157324 | 442.477008 | 442.763144 |
| 5 | 440.957389 | 440.952187 | 440.647997 | 440.803145 | 440.862796 | 442.848142 | 443.083960 | 442.628024 | 442.771060 |
| 6 | 440.899298 | 440.745384 | 440.714870 | 440.750095 | 440.879070 | 442.793625 | 442.812780 | 442.584908 | 442.650561 |
| 7 | 440.932807 | 440.977960 | 440.832689 | 440.882941 | 440.879163 | 442.662455 | 442.904429 | 442.643569 | 442.725381 |
| 8 | 440.973628 | 441.019207 | 440.869730 | 440.905549 | 440.931672 | 442.691047 | 442.884603 | 442.667519 | 442.722411 |

In [95]: 1 NCS_delta_E

Out[95]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | | | | Mean |
|---|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 |
| 3 | 205.743696 | 201.739025 | 199.104657 | 199.474175 | 198.261287 | 226.210838 | 217.958818 | 216.324507 | 217.047314 |
| 4 | 202.337215 | 197.621455 | 196.003388 | 196.698163 | 196.626465 | 223.008540 | 218.236471 | 215.809042 | 217.045341 |
| 5 | 200.691628 | 196.961088 | 196.163667 | 196.799388 | 196.692906 | 218.310663 | 218.117596 | 216.051628 | 217.277941 |
| 6 | 200.628923 | 195.955384 | 196.536968 | 196.504449 | 197.067539 | 219.218677 | 217.364060 | 215.930236 | 216.700931 |
| 7 | 198.304238 | 197.535586 | 196.755398 | 197.205274 | 197.058144 | 217.989427 | 217.855084 | 215.956707 | 216.953651 |
| 8 | 198.029164 | 198.101379 | 197.189369 | 197.351627 | 197.424671 | 217.633631 | 218.531336 | 216.566987 | 216.947151 |

In []: 1

In [96]: 1 NCS_forest_precalc_delta_E

Out[96]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | | | | Mean ΔE |
|---|------------------------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|-----------------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 |
| 3 | 79.506621 | 116.069142 | 101.329206 | 84.008044 | 153.701512 | 48.228564 | 106.631259 | 114.751486 | 99.521199 |
| 4 | 52.160205 | 162.332974 | 88.740794 | 71.371732 | 149.998243 | 47.020875 | 121.437977 | 103.991455 | 98.858578 |
| 5 | 52.154295 | 160.641699 | 92.593296 | 73.770144 | 149.100784 | 42.797689 | 135.750154 | 104.689125 | 103.204655 |
| 6 | 49.854160 | 151.448876 | 87.352485 | 74.375462 | 147.382728 | 37.001875 | 145.859181 | 89.924338 | 109.240779 |
| 7 | 12.205430 | 173.478018 | 94.544384 | 75.455669 | 148.505183 | 12.286268 | 146.680700 | 90.514141 | 108.063867 |
| 8 | 8.228669 | 179.242831 | 95.560886 | 75.144324 | 149.489119 | 10.610328 | 154.901011 | 85.518539 | 109.644125 |

In [97]: 1 NCS_precalc_delta_E

Out[97]:

| | Mean ΔE CIE 76 (D65) | | | | | | | | Mean ΔE CIE 76 (D65) | |
|---|------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------------------------|------------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 115.994692 | 207.767380 | 259.235376 | 214.588592 | 305.010256 | 97.053565 | 202.431612 | 245.640463 | 202.503454 | 202.503454 |
| 4 | 89.334382 | 248.246489 | 162.077248 | 145.739838 | 280.692646 | 87.450769 | 219.484204 | 209.978240 | 197.894399 | 197.894399 |
| 5 | 63.069168 | 260.755636 | 164.221803 | 149.257204 | 278.287048 | 59.346072 | 254.109027 | 210.255517 | 205.538013 | 205.538013 |
| 6 | 56.204556 | 259.147259 | 143.902756 | 154.362364 | 274.468452 | 40.940234 | 282.460190 | 176.602585 | 218.248316 | 218.248316 |
| 7 | 13.500177 | 286.031437 | 155.489691 | 147.987252 | 276.174135 | 13.158314 | 278.152530 | 174.701404 | 214.498044 | 214.498044 |
| 8 | 10.612311 | 307.455674 | 151.958885 | 145.593746 | 278.448161 | 11.333710 | 308.341824 | 164.937715 | 217.905555 | 217.905555 |



In []: 1

In [98]: 1 NCS_forest_delta_E_2000

Out[98]:

| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 7.687776 | 12.777319 | 16.577661 | 14.701460 | 27.251338 | 5.902154 | 12.473963 | 23.870205 | 22.707882 | 35.587843 |
| 4 | 5.786769 | 17.449147 | 9.705297 | 10.023602 | 24.658339 | 7.519545 | 13.344785 | 19.641188 | 22.120901 | 36.312583 |
| 5 | 5.067541 | 16.298293 | 9.772811 | 10.460875 | 24.780936 | 4.257967 | 15.495507 | 16.439783 | 21.466030 | 36.383049 |
| 6 | 5.140417 | 14.995303 | 9.201905 | 11.058010 | 23.911719 | 4.210805 | 20.640345 | 14.024504 | 24.220320 | 35.551085 |
| 7 | 2.625279 | 17.626625 | 10.088148 | 9.721450 | 24.155986 | 3.225236 | 18.665446 | 13.084882 | 22.460151 | 38.285274 |
| 8 | 1.940230 | 17.782917 | 10.430611 | 9.516520 | 24.021796 | 2.549139 | 19.425023 | 11.416195 | 22.779133 | 38.362851 |



In [99]: 1 NCS_delta_E_2000

Out[99]:

| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 27.924891 | 28.202428 | 27.446391 | 27.875106 | 27.700026 | 30.993940 | 31.208850 | 30.388122 | 30.992131 | 30.68531 |
| 4 | 27.603466 | 27.338412 | 26.857130 | 27.189690 | 27.212340 | 30.711803 | 31.118030 | 30.091612 | 30.946557 | 31.04568 |
| 5 | 28.046494 | 27.122355 | 26.972928 | 27.215333 | 27.196286 | 30.933081 | 31.183526 | 30.399951 | 31.062225 | 31.11960 |
| 6 | 28.275266 | 27.145280 | 27.085013 | 27.192632 | 27.276211 | 31.696988 | 31.326483 | 30.519399 | 30.991145 | 31.25624 |
| 7 | 27.841940 | 27.419717 | 27.084161 | 27.288121 | 27.275860 | 31.465473 | 31.464560 | 30.620989 | 31.144631 | 31.17584 |
| 8 | 27.584824 | 27.492190 | 27.311347 | 27.324396 | 27.339970 | 31.263087 | 31.543101 | 30.997534 | 31.124301 | 31.18372 |



In []: 1

In [100]: 1 NCS_forest_precalc_delta_E_2000

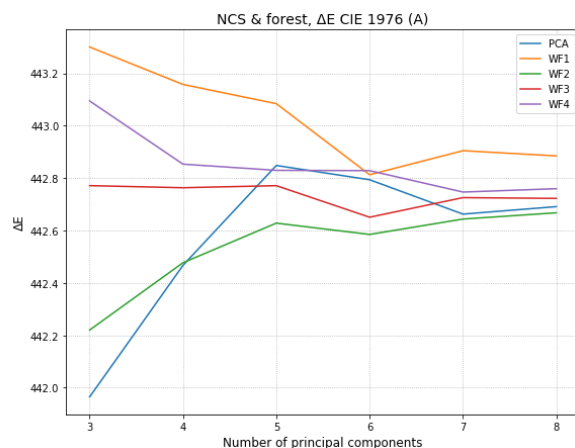
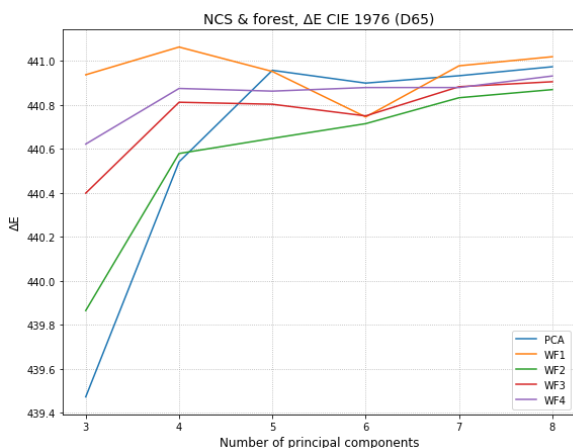
Out[100]:

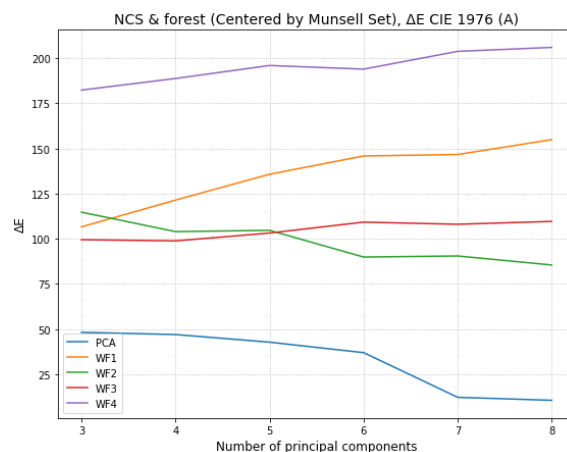
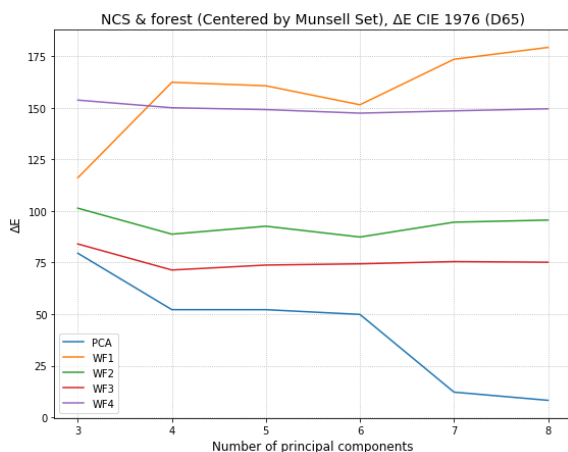
| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | | | | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 7.687776 | 12.777319 | 16.577661 | 14.701460 | 27.251338 | 5.902154 | 12.473963 | 23.870205 | 22.707882 | 35.587843 |
| 4 | 5.786769 | 17.449147 | 9.705297 | 10.023602 | 24.658339 | 7.519545 | 13.344785 | 19.641188 | 22.120901 | 36.312583 |
| 5 | 5.067541 | 16.298293 | 9.772811 | 10.460875 | 24.780936 | 4.257967 | 15.495507 | 16.439783 | 21.466030 | 36.383049 |
| 6 | 5.140417 | 14.995303 | 9.201905 | 11.058010 | 23.911719 | 4.210805 | 20.640345 | 14.024504 | 24.220320 | 35.551085 |
| 7 | 2.625279 | 17.626625 | 10.088148 | 9.721450 | 24.155986 | 3.225236 | 18.665446 | 13.084882 | 22.460151 | 38.285274 |
| 8 | 1.940230 | 17.782917 | 10.430611 | 9.516520 | 24.021796 | 2.549139 | 19.425023 | 11.416195 | 22.779133 | 38.362851 |

In [101]: 1 NCS_precalc_delta_E_2000

Out[101]:

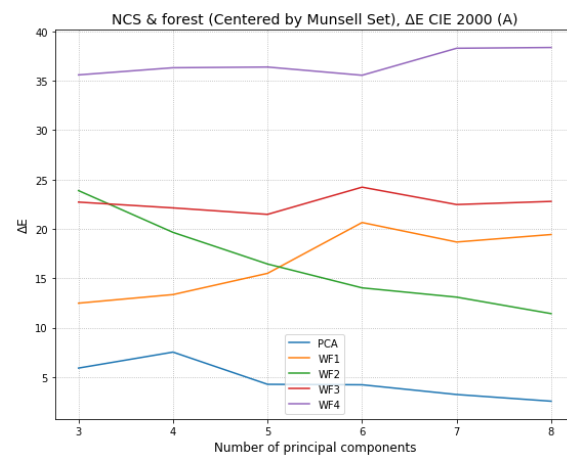
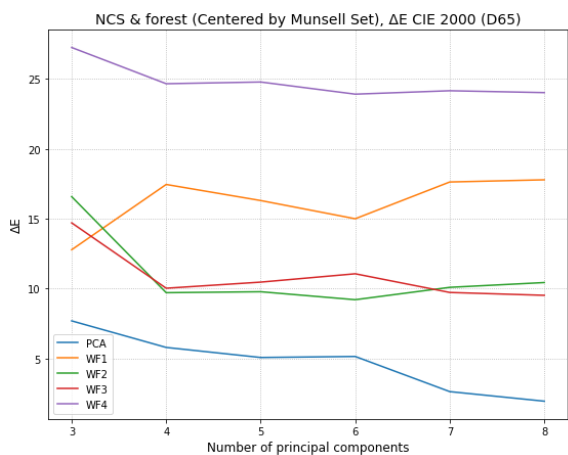
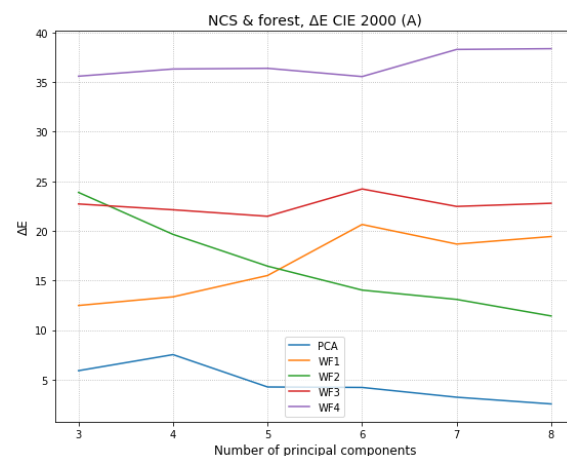
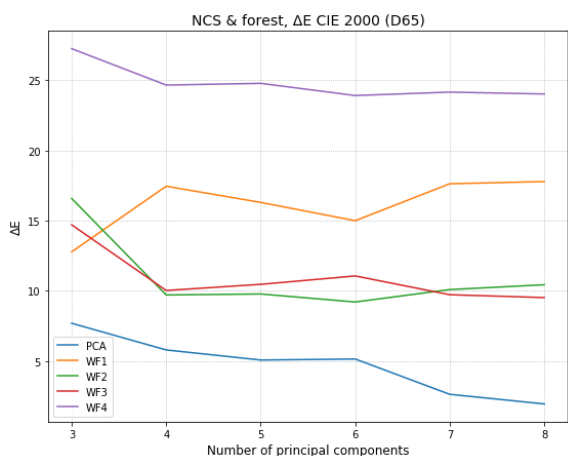
| | Mean ΔE CIE 2000 (D65) | | | | | Mean ΔE CIE 2000 (A) | | | | |
|---|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 | PCA | WF1 | WF2 | WF3 | WF4 |
| 3 | 9.063578 | 17.463604 | 29.251831 | 26.731469 | 32.212348 | 9.512466 | 15.850357 | 27.506772 | 24.491189 | 31.348114 |
| 4 | 8.708562 | 21.588995 | 13.223255 | 14.000492 | 26.106014 | 9.534631 | 16.475202 | 21.862345 | 23.034062 | 32.840727 |
| 5 | 5.748382 | 20.970423 | 13.016822 | 14.318557 | 26.286279 | 5.244597 | 18.136707 | 19.542958 | 22.332234 | 33.025640 |
| 6 | 5.734914 | 18.589660 | 11.464475 | 15.253097 | 25.286897 | 4.773428 | 23.021806 | 17.302270 | 24.729998 | 32.119576 |
| 7 | 2.176629 | 23.356098 | 13.222272 | 12.758238 | 25.546187 | 2.112674 | 21.246901 | 15.342296 | 22.886126 | 34.165870 |
| 8 | 1.677332 | 24.280456 | 13.262340 | 12.524340 | 25.372259 | 1.699141 | 21.991334 | 14.374947 | 23.124608 | 34.191014 |





In []:

1



Очевидно, попытка улучшить результаты за счёт увеличения числа тестовых данных, не принесла никаких положительных результатов в случае колориметрической реконструкции. В целом, учитывая однообразие дополнительных спектров, значительного улучшения ожидать и не приходилось. Это подтверждает идею о важности разнообразия спектров в наборах данных для полноценной реконструкции.

Вывод

В целом, большая часть результатов проведённых экспериментов не подтверждает, а местами прямо противоречит результатам Cao et al. Это может быть вызвано рядом причин, однако доказывает тот факт, что колориметрическая реконструкция сильно зависит от данных, а также их обработки и условий

эксперимента. В связи с этим легко поставить под сомнение универсальность выводов в этой теме. Скорее всего, на потенциальной практике следует заранее проводить серию экспериментов с имеющимися данными, чтобы понять какой метод лучше.